

К.Ю. Тюрюханов¹, К.Г. Пугин^{1,2}

¹Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

²Пермский государственный аграрно-технологический университет
имени академика Д.Н. Прянишникова, Пермь, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСФАЛЬТОБЕТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТРАБОТАННОЙ ФОРМОВОЧНОЙ СМЕСИ

Расширение номенклатуры материалов, позволяющих получать асфальтобетоны заданного качества, в настоящее время является актуальной задачей. Это обусловлено увеличением объемов строительства сети автодорог, а также дефицитом качественных дорожно-строительных материалов во многих районах Российской Федерации. Использование отходов промышленности позволяет решить данную проблему, но требует проведения большого количества лабораторных экспериментов по подбору состава асфальтобетона. Это связано с тем, что многие техногенные материалы по своим физико-механическим характеристикам могут быть уникальны, и применение того или иного отхода требует обширного лабораторного исследования. Однако потенциал одного отхода может раскрыться полностью в дорожно-климатических зонах с избыточным увлажнением, но не показать требуемых характеристик в дорожно-климатических зонах вечной мерзлоты. В статье представлено математическое моделирование физико-механических свойств горячей плотной мелкозернистой асфальтобетонной смеси типа Б марки I в зависимости от двух изменяющихся факторов – содержания битума и выступающей в качестве мелкого минерального заполнителя отработанной формовочной смеси. Использование в качестве мелкого минерального заполнителя отработанной формовочной смеси позволяет сократить расходы на закупку сырья для производства асфальтобетона, что приводит к удешевлению всего строительства в целом. Исходя из полученных уравнений регрессий и поверхностей функции отклика показателей было сделано заключение, что для соответствия требований ГОСТ 9128–2013 физико-механических показателей горячего плотного мелкозернистого асфальтобетона типа Б марки I оптимальное содержание битума должно составлять от 5,0 до 5,3 % и отработанной формовочной смеси – от 10 до 15 %.

Ключевые слова: асфальтобетон, отработанная формовочная смесь, математическая модель, уравнение регрессии, отходы промышленности.

K.Y. Tyuryukhanov¹, K.G. Pugin^{1,2}

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Perm State Agro-Technological University
named after Academician D.N. Pryanishnikov, Perm, Russian Federation

MATHEMATICAL MODELING OF THE PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ASPHALT-CONCRETE WITH THE USE OF THE WASTE FOUNDRY SAND

Expansion of the range of materials allowing to obtain asphalt concrete of a given quality is currently an urgent task. This is due to an increase in the construction of a network of highways, as well as a shortage of high-quality road-building materials in many regions of Russia. The use of industrial waste solves this problem, but requires a large number of laboratory experiments on the selection of the composition of asphalt concrete. This is due to the fact that many technogenic materials may be unique in terms of their physical and mechanical characteristics, and the use of a particular waste requires extensive laboratory research. However, the potential of one waste can unfold completely in the road-climatic zones with excessive moisture, but does not show the required characteristics in the road-climatic zones of permafrost. The article presents mathematical modeling of the physico-mechanical properties of hot dense fine-grained asphalt concrete mix Type B, mark I, from two varying factors, the content of bitumen and acting as fine mineral aggregate of the waste foundry sand. The use of waste foundry sand as a fine mineral aggregate reduces the cost of purchasing raw materials for the production of asphalt concrete, which leads to cheaper construction in general. Based on the obtained regression equations and the surfaces of the response function of the indicators, it was concluded that to achieve the requirements of GOST 9128-2013 physical and me-

chanical parameters of hot dense fine-grained asphalt concrete type B of grade I, the optimum bitumen content is from 5.0 to 5.3% and the waste foundry sand from 10 to 15%.

Keywords: asphalt concrete, waste foundry sand, mathematical model, regression equation, industrial waste.

Асфальтобетон является распространенным дорожно-строительным материалом, в состав которого входят различные каменные минеральные материалы. Регулирование прочностных, физико-механических и деформационных характеристик дает возможность получать асфальтобетон с необходимым набором параметров, удовлетворяющим запросы конечного потребителя. С учетом того что Российская Федерация располагается в разных климатических зонах, требования, предъявляемые к асфальтобетонам, различны [1, 2].

Климатические и погодные условия влияют на транспортно-эксплуатационные характеристики покрытия автомобильной дороги, а также на выбор типа и марки используемого асфальтобетона, воспринимающего расчетные нагрузки от подвижного состава. Постоянная высокая или низкая температура окружающей среды оказывает менее негативное влияние, чем весенне-осеннее время года, когда происходит избыточное увлажнение покрытия и переходы через 0 °С в дневное и ночное время суток. Это связано с тем, что вода, попав в поры асфальтобетонного покрытия, при отрицательных температурах увеличивается в объеме и разрушает его. Предотвратить это воздействие возможно за счет подбора состава асфальтобетонной смеси, сводя к минимуму (к нижней границе) показатель водонасыщения и трещиностойкости. Регулировать вышеназванные показатели возможно за счет введения в асфальтобетонную смесь мелкого минерального материала, который будет выполнять функцию заполнителя свободных пор в минеральной структуре асфальтобетона. Однако в регионах с жарким климатом необходимо учитывать воздействие солнечной радиации, которая влияет на подвижность и сдвиговые деформации асфальтобетонного покрытия. Чтобы избежать преждевременных деформаций, следует производить укладку асфальтобетонного покрытия с более жестким структурным каркасом.

Определение состава асфальтобетона для конкретных условий эксплуатации представляет собой многофакторную систему, оптимальные параметры которой зависят от нескольких взаимовлияющих друг на друга факторов. Повышение процентного содержания битума в составе асфальтобетонной смеси одновременно влечет увеличение показателя водонасыщения и трещиностойкости, при этом уменьшает прочностные показатели и параметры сдвигоустойчивости. При повышенном содержании в смеси крупного щебеночного материала увеличиваются прочностные показатели и коэффициент водостойкости, при этом уменьшается водонасыщение. Однако с большим содержанием мелкого минерального материала и вяжущего существенно снижается показатель водонасыщения и остаточной пористости, но при этом происходит резкое уменьшение прочностных характеристик, трещиностойкости, сдвигоустойчивости.

В этой связи поиск оптимальных параметров асфальтобетонной смеси позволяет проводить математическое моделирование физико-механических свойств. Ряд авторов указывают, что получили положительные результаты при моделировании свойств цементобетонов, асфальтобетонов и некоторых других строительных материалов, в том числе с использованием в составе не только природного сырья, но и техногенного [3–11]. В целом математическое моделирование физико-механических свойств строительных материалов позволяет в несколько раз сократить программу испытаний при подборе оптимального соотношения компонентов, входящих в их состав.

Для достижения требуемых характеристик асфальтобетона необходимо использовать качественное исходное сырье. Многие регионы РФ не в силах обеспечить дорожно-строительные организации сырьем для производства асфальтобетона, которое бы отвечало всем требованиям ГОСТа. Но стоит отметить, что в ряде регионов функционируют промышленные предприятия, образующие в результате своей деятельности многотоннажные отходы, которые отвечают требованиям ГОСТа, предъявляемым к дорожно-строительным материалам [12–17]. Так, одним из

недооцененных отходов сталелитейного производства является отработанная формовочная смесь (ОФС). Она представляет собой сыпучий материал, неоднократно использовавшийся при производстве форм для литья металлических изделий. Основой данного материала является кварцевый песок, сцепляющим веществом – формальдегид и затвердитель. После неоднократного воздействия механических и температурных факторов происходит модификация поверхности частиц кварцевого песка с превращением его в уникальный строительный материал.

На базе Пермского национального исследовательского политехнического университета, на кафедре «Автомобильные дороги и мосты», был выполнен подбор горячего плотного мелкозернистого асфальтобетона типа Б марки I, с использованием в качестве мелкого минерального заполнителя ОФС. Были произведены лабораторные испытания асфальтобетонных образцов на соответствие ГОСТ 9128–2013 по следующим физико-механическим показателям:

- показатель средней плотности;
- показатель водонасыщения;
- предел прочности при сжатии при 50, 20, 0 °С;
- показатель трещиностойкости;
- коэффициент водостойкости.

Для определения оптимального содержания в составе асфальтобетона битума и ОФС был проведен полный центральный ортогональный двухфакторный эксперимент с изменяющимися факторами на трех уровнях. Это позволяет получить математическую модель и поверхность функции отклика выше представленных показателей для горячего плотного мелкозернистого асфальтобетона типа Б марки I, а также определить границы оптимального содержания ОФС и битума в составе асфальтобетона.

Математическое моделирование позволяет проводить меньшее количество лабораторных экспериментов, направленных на изучение влияния содержания ОФС на физико-механические свойства асфальтобетона. Ранее опубликованные данные по испытаниям образцов асфальтобетона, в состав которого была включена ОФС, послужили основой для разработки уравнений регрессии показателей асфальтобетона. Анализ полученных результатов выполнялся на персональном компьютере с использованием программного комплекса STATISTICA. Выбранные факторы были закодированы следующим образом: X_1 – содержание битума в асфальтобетоне; X_2 – содержание ОФС в асфальтобетоне. На основе фактических результатов лабораторных испытаний асфальтобетонных образцов с разным содержанием битума и ОФС искомые зависимости функций отклика (Y_1 – показатель средней плотности; Y_2 – показатель коэффициента водонасыщения; Y_3 – показатель предела прочности при сжатии при 50 °С; Y_4 – показатель предела прочности при сжатии при 20 °С; Y_5 – показатель предела прочности при сжатии при 0 °С; Y_6 – показатель трещиностойкости; Y_7 – показатель коэффициента водостойкости от факторов X_1 и X_2) имеют следующий вид:

$$Y_1 = 1,9034 + 0,2266 \cdot X_1 - 0,008 \cdot X_2 - 0,0245 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,0018 \cdot X_1 \cdot X_2 - 8,1819 \cdot 10^{-5} \cdot X_2 \cdot X_2, \quad (1)$$

$$Y_2 = 57,5673 - 21,1667 \cdot X_1 + 0,0038 \cdot X_2 + 2,0462 \cdot X_1 \cdot X_1 - 0,0726 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,0145 \cdot X_2 \cdot X_2, \quad (2)$$

$$Y_3 = 41,5383 - 15,5297 \cdot X_1 + 0,0532 \cdot X_2 + 1,4762 \cdot X_1 \cdot X_1 + 0,0196 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,007 \cdot X_2 \cdot X_2, \quad (3)$$

$$Y_4 = 74,9513 - 27,8036 \cdot X_1 + 0,3157 \cdot X_2 + 2,5818 \cdot X_1 \cdot X_1 + 0,0706 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,0288 \cdot X_2 \cdot X_2, \quad (4)$$

$$Y_5 = 156,5747 - 61,858 \cdot X_1 + 1,713 \cdot X_2 + 6,0507 \cdot X_1 \cdot X_1 - 0,0083 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,0705 \cdot X_2 \cdot X_2, \quad (5)$$

$$Y_6 = 78,4566 - 31,0784 \cdot X_1 + 0,7945 \cdot X_2 + 3,0602 \cdot X_1 \cdot X_1 + 0,0018 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,0326 \cdot X_2 \cdot X_2, \quad (6)$$

$$Y_7 = -2,5941 + 1,2539 \cdot X_1 + 0,0521 \cdot X_2 - 0,1166 \cdot X_1 \cdot X_1 - 0,0034 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,0012 \cdot X_2 \cdot X_2. \quad (7)$$

После получения математических уравнений были построены трехмерные поверхности функции отклика физико-механических показателей изменяющихся факторов X_1 и X_2 , которые представлены на рис. 1–5.

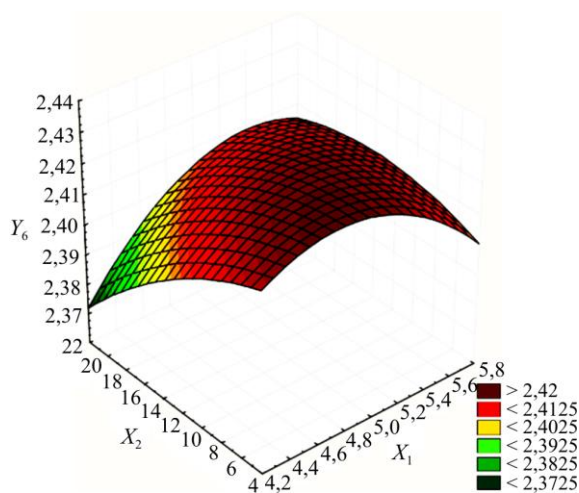


Рис. 1. Трехмерная поверхность функции отклика показателя средней плотности

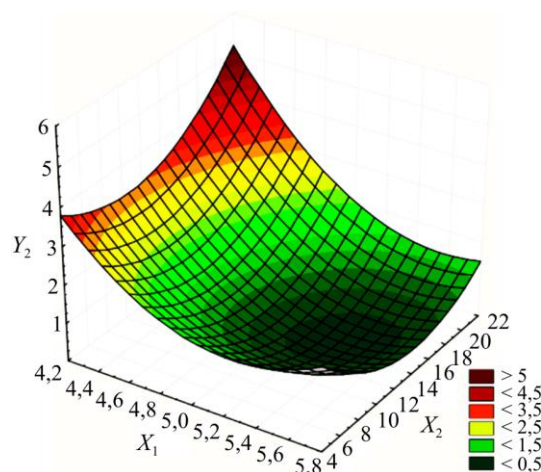


Рис. 2. Трехмерная поверхность функции отклика показателя коэффициента водонасыщения

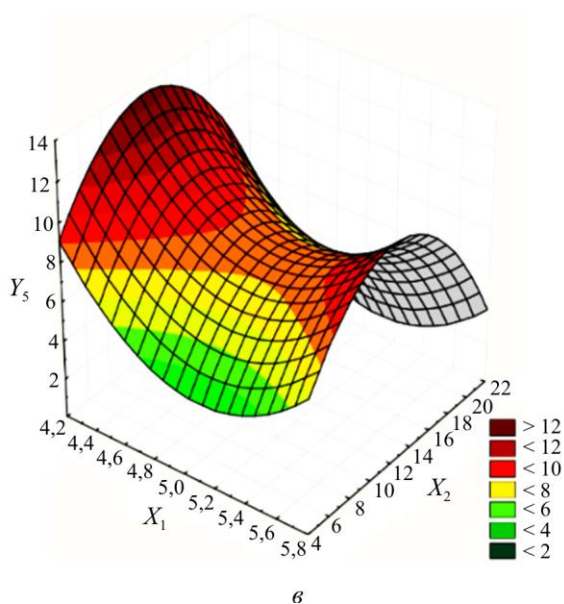
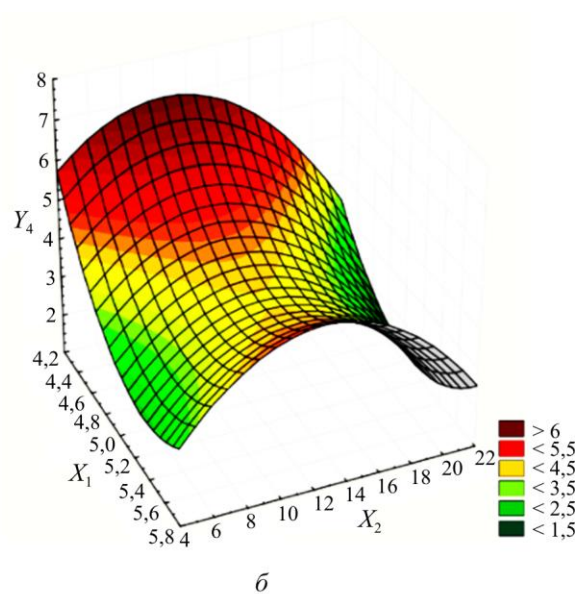
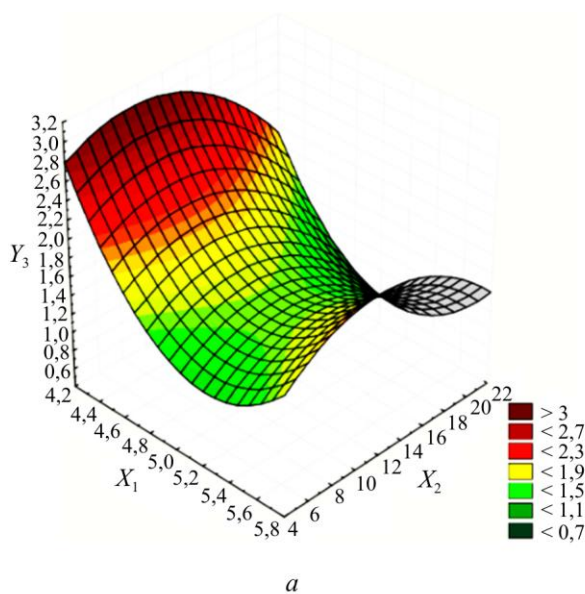


Рис. 3. Трехмерная поверхность функции отклика показателя: а – предела прочности при сжатии при 50 °С; б – предела прочности при сжатии при 20 °С; в – предела прочности при сжатии при 0 °С

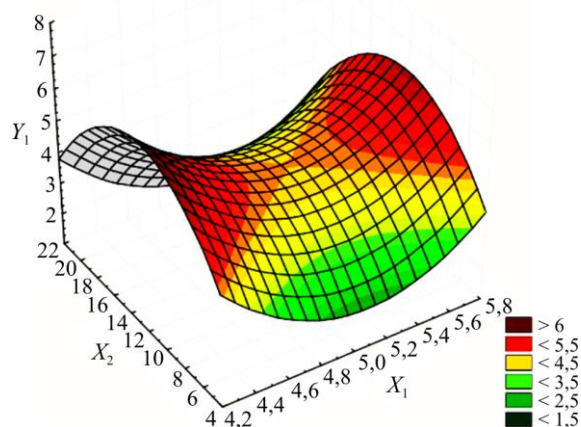


Рис. 4. Трехмерная поверхность функции отклика показателя трещиностойкости

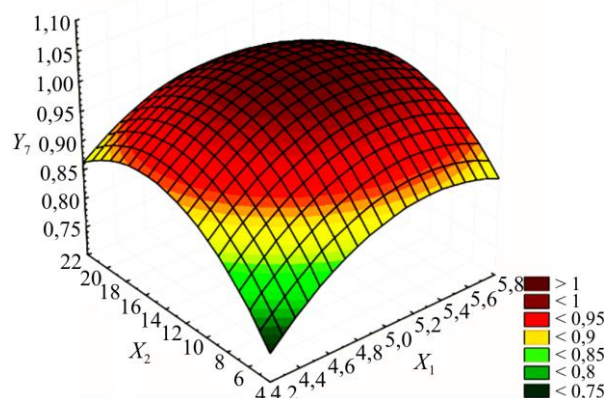


Рис. 5. Трехмерная поверхность функции отклика показателя коэффициента водостойкости

Анализ трехмерной поверхности функции отклика показателя средней плотности позволяет сделать вывод, что максимальную величину можно получить при содержании битума от 4,8 до 5,2 %, а ОФС – от 8 до 16 %.

Анализ трехмерной поверхности функции отклика показателя коэффициента водонасыщения позволяет сделать вывод, что максимальную величину можно получить при содержании битума от 4,9 до 5,5 %, а ОФС – от 8 до 20 %. Требования ГОСТ 9128–2013, предъявляемые к данному показателю, составляют от 1,5 до 4 %. Исходя из этого оптимальным содержанием битума может считаться 5,3 % и ОФС – 12 %, где данный показатель составляет 1,51 %.

Анализ трехмерной поверхности функции отклика предела прочности при сжатии при 50, 20, 0 °С позволяет сделать вывод, что максимальную величину можно получить при содержании битума от 4,7 до 5,6 %, а ОФС – от 8 до 16 %. Исходя из этого оптимальным содержанием битума может считаться 5,2 % и ОФС – 12 %, где данные показатели достигают максимальных значений.

Анализ трехмерной поверхности функции отклика показателя трещиностойкости позволяет сделать вывод, что максимальную величину можно получить при содержании битума от 4,7 до 5,4 %, а ОФС от 9 до 16 %. Требования ГОСТ 9128–2013, предъявляемые к данному показателю, составляют от 3,5 до 6 МПа. Исходя из этого оптимальным содержанием битума может считаться 5,1 % и ОФС – 13 %, где данный показатель составляет 3,56 МПа.

Анализ трехмерной поверхности функции отклика показателя коэффициента водостойкости позволяет сделать вывод, что максимальную величину можно получить при содержании битума от 4,7 до 5,6 %, а ОФС – от 8 до 18 %. Значение согласно требованиям ГОСТ 9128–2013, предъявляемым к данному показателю, составляет не менее 0,90. Исходя из этого оптимальным содержанием битума может считаться 5,2 % и ОФС – 13 %, где данный показатель составляет 1,0.

Выводы

Исходя из полученных математических уравнений и поверхностей можно сделать заключение, что для достижения максимально удовлетворяющих требованиям ГОСТ 9128–2013 физико-механических показателей горячего плотного мелкозернистого асфальтобетона типа Б марки I оптимальное содержание битума должно составлять от 5,0 до 5,3 % и ОФС – от 10 до 15 %.

Использование в качестве мелкого минерального заполнителя ОФС позволяет сократить расходы на закупку сырья для производства асфальтобетона, что приводит к удешевлению всего строительства в целом, сократить потребление природных каменных материалов, а также снизить техногенную нагрузку на окружающую среду.

Список литературы

1. Ковалев Н.С. Обоснование длительности воздействия климатических факторов при моделировании ускоренного испытания асфальтобетона из шлаковых материалов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2014. – № 3 (42). – С. 163–171.
2. Матвиенко О.В., Унгер Ф.Г., Базуев В.П. Математические модели производственных процессов для приготовления битумных дисперсных систем. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2015. – 336 с.
3. Ядыкина В.В., Траутвайн А.И. Влияние активности наполнителей из техногенного кремнеземсодержащего сырья на прочность цементных систем // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 5–1. С. 174–179.
4. Математическая модель оценки геометрических параметров щебня для асфальтобетона / В.Н. Веник, О.И. Недавний, С.П. Осипов, И.Г. Ядренкин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 1 (38). – С. 139–148.
5. Бойцев А.В., Шестопапов А.А. Моделирование условий создания изотропного асфальтобетонного покрытия в процессе его уплотнения // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 4 (57). – С. 150–156.
6. Герцог В.Н., Долгих Г.В., Кузин Н.В. Расчет дорожных одежд по критериям ровности. Ч. 1. Обоснование норм ровности асфальтобетонных покрытий // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – № 5 (57). – С. 45–57.
7. Математическое моделирование сдвигоустойчивости асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог / О.В. Матвиенко, В.П. Базуев, В.Н. Веник, Р.Б. Базаров, Э.Р. Арутюнян // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 4 (63). – С. 158–170.
8. Применение экономико-математических методов для определения областей использования видов покрытий / А.В. Скрыльников, В.Г. Козлов, Д.В. Ломакин, Е.Ю. Микова // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2017. – Т. 21. – № 5. – С. 23–32.
9. Тиратурян А.Н., Углова Е.В., Ляпин А.А. Исследование распределения энергии динамического воздействия транспортных средств в слоях нежесткой дорожной конструкции // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 2. – С. 178–194.
10. Пугин К.Г., Пугина В.К. Математическое моделирование эмиссии загрязняющих веществ утилизации отходов производства // Системы контроля окружающей среды. – 2017. – № 7 (27). – С. 146–150.
11. Степушин А.П., Сабуренкова В.А. Надежность цементобетонных покрытий аэродромов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2017. – № 1 (48). – С. 84–89.
12. Бочков Н.Н. Дорожно-строительные материалы на основе отходов глиноземного производства: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2017. – 209 с.
13. Эффективное использование пород шахтных отвалов в дорожном строительстве / А.Г. Доля, Д.А. Шатворян, Д.В. Смирнова, И.П. Жуков // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2017. – № 2 (124). – С. 94–101.
14. Осмонова Б.Ж. Эколого-экономическая целесообразность применения золы уноса в дорожном // Universum: технические науки. – 2016. – №7 (28). – С. 13.
15. Исследование углеродминеральных продуктов горючих сланцев в качестве сырья для получения минеральных компонентов / В.Д. Галдина, Е.В. Гурова, О.И. Кривонос, М.С. Черногорова // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2016. – № 2 (48). – С. 82–89.
16. Применение электросталеплавильных шлаков в конструкциях нежестких дорожных одежд / А.С. Погромский, Г.С. Духовный, Т.В. Аниканова, Ш.М. Рахимбаев. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2018. – 100 с.

17. Arabani M., Mirabdolazimi S.M. Experimental investigation of the fatigue behaviour of asphalt concrete mixtures containing waste iron powder // J. of Materials Science and Engineering. – 2011. – Vol. 528, iss. 10–11. – P. 3866–3870.

References

1. Kovalev N.S. Obosnovanie dlitel'nosti vozdeistviia klimaticheskikh faktorov pri modelirovanii uskorenogo ispytaniia asfal'tobetona iz shlakovykh materialov. [Substantiation of climatic factors exposure duration when modeling accelerated test of asphalt concrete from slag materials]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2014, no. 3 (42), pp. 163-171.
2. Matvienko O.V., Unger F.G., Bazuev V.P. Matematicheskie modeli proizvodstvennykh protsessov dlia prigotovleniia bitumnykh dispersnykh system. [Mathematical models of production processes for the preparation of dispersed bitumen systems]. Tomsk, Izdatel'stvo Tomskii gosudarstvennii arkhitekturno-stroitel'nii universitet, 2015, 336 p.
3. Yadykina V.V., Trautvain A.I. Vliianie aktivnosti napolnitelei iz tekhnogennogo kremnezemsoderzhashchego syr'ia na prochnost' tsementnykh system. [The influence of the active filler based on the technogenic siliceous raw materials on the strength cement systems]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2015, no 5-1. pp. 174-179.
4. Venik V.N., Nedavnii O.I., Osipov S.P., Iadrenkin I.G. Matematicheskaia model' otsenki geometricheskikh parametrov shchebniia dlia asfal'tobetona. [Mathematical model of cube-chaped crushed stone taking into account the flakiness of grains]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2013, no 1 (38), pp. 139-148.
5. Boitsev A.V., Shestopalov A.A. Modelirovanie uslovii sozdaniia izotropnogo asfal'tobetonnoogo pokrytiia v protsesse ego uplotneniia. [Modeling of conditions for the creating of isotropic asphalt concrete pavement in the process of compaction]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2016, no 4 (57), pp. 150-156.
6. Gertsog V.N., Dolgikh G.V., Kuzin N.V. Raschet dorozhnykh odezhd po kriteriiam rovnosti. Chast' 1. Obosnovanie norm rovnosti asfal'tobetonnykh pokrytii. [Calculation criteria for road pavement evenness Part 1: substantiating the flatness standards of asphalt concrete pavement]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*, 2015, no 5 (57), pp. 45-57.
7. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Bazarov R.B., Arutiunian E.R. Matematicheskoe modelirovanie sdvigoustoichivosti asfal'tobetonnykh pokrytii avtomobil'nykh dorog. [Mathematical modelling of road pavement shear-resistance]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2017, no. 4 (63), pp. 158-170.
8. Skryl'nikov A.V., Kozlov V.G., Lomakin D.V., Mikova E.Iu. Primenenie ekonomiko-matematicheskikh metodov dlia opredeleniia oblasti ispol'zovaniia vidov pokrytii. [The use of economic-mathematical methods to identify areas of use of types of coatings]. *Lesnoi vestnik. Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 5, pp. 23-32.
9. Tiraturian A.N., Uglova E.V., Liapin A.A. Issledovanie raspredeleniia energii dinamicheskogo vozdeistviia transportnykh sredstv v sloiakh nezhestkoi dorozhnoi konstruksii. [Studying the energy distribution of the dynamic influences of road transport on the layers of nonrigid pavements]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2017, no. 2, pp. 178-194.
10. Pugin K.G., Pugina V.K. Matematicheskoe modelirovanie emissii zagriazniaiushchikh veshchestv utilizatsii otkhodov proizvodstva. [Mathematical modeling of pollutant emissions for the expansion of methods of disposal of industrial waste]. *Sistemy kontroliia okruzhaiushchei sredy*, 2017, no. 7 (27), pp. 146-150.
11. Stepushin A.P., Saburenkova V.A. Nadezhnost' tsementobetonnykh pokrytii aerodromov. [Reliability of the concrete airport pavement]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*, 2017, no. 1 (48), pp. 84-89.
12. Bochkov N.N. Dorozhno-stroitel'nye materialy na osnove otkhodov glinozemnogo proizvodstva [Road construction materials based on alumina production waste]. Ph. D. thesis. Tomsk, 2017, 209 p.
13. Dolia A.G., Shatvorian D.A., Smirnova D.V., Zhukov I.P. Effektivnoe ispol'zovanie porod shakhtnykh otvalov v dorozhnom stroitel'stve. [Effective use of rocks mine dumps in road construction]. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury*, 2017, no. 2 (124), pp. 94-101.
14. Osmonova B.Zh. Ekologo-ekonomicheskaiia tselesoobraznost' primeneniia zoly unosa v dorozhnom. [Ecological and economical advantages of fly ash application in road construction]. *Universum: tekhnicheskie nauki*, 2016, no. 7 (28), p. 13.
15. Galdina V.D., Gurova E.V., Krivonos O.I., Chernogorodova M.S. Issledovanie uglerodmineral'nykh produktov goriuchikh slantsev v kachestve syr'ia dlia polucheniia mineral'nykh komponentov. [Research of carbon of the mineral products combustible slates as raw materials for reception of the mineral components asphalt concrete]. *Vestnik Sibirskoi gosudarstvennoi avtomobil'no-dorozhnoi akademii*. 2016, no. 2 (48), pp. 82-89.
16. Pogromskii A.S., Dukhovnyi G.S., Anikanova T.V., Rakhimbaev Sh.M. Primenenie elektrostaleplavil'nykh shlakov v konstruksiiakh nezhestkikh dorozhnykh odezhd. [The use of electric steel slag in the construction of non-rigid pavements]. Belgorod: izdatel'stvo BSTU, 2018. 100 p.
17. M. Arabani, S.M. Mirabdolazimi. Experimental investigation of the fatigue behaviour of asphalt concrete mixtures containing waste iron powder. J. of Materials Science and Engineering. vol. 528, iss. 10–11, 25 April 2011, pp. 3866-3870.

Получено 04.02.2019

Об авторах

Тюрюханов Кирилл Юрьевич (Пермь, Россия) – ведущий инженер кафедры «Автомобильные дороги и мосты» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: Turuchfnov.k.u@list.ru).

Пугин Константин Георгиевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобили и технологические машины» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: 123zzz@rambler.ru), профессор кафедры «Технический сервис и ремонт машин» Пермского государственного аграрно-технологического университета имени академика Д.Н. Прянишникова (614990, г. Пермь, ул. Петропавловская, 23).

About the authors

Kirill Yu. Tyuryukhanov (Perm, Russian Federation) – Leading Engineer, Department of Highways and Bridges, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: Turuchfnov.k.u@list.ru).

Konstantin G. Pugin (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Automobiles and Technological Machines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: 123zzz@rambler.ru), Professor of the Department of Technical Service and Repair of Machines, Perm State Agrarian University of Technology named after Academician D.N. Pryanishnikov (614990, Perm, Petropavlovskaya st., 23).