

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

УДК 691.168

DOI DOI 10.17816/transsyst2022845-13

© **К.А. Васильев, Г.А. Аверченко**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Санкт-Петербург, Россия)

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ПЕРЕМЕШИВАНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ**

Рассматривается процесс перемешивания минеральных компонентов с органическими вяжущими в технологии приготовления горячих асфальтобетонных смесей. В качестве рабочей гипотезы принято предположение о функциональной зависимости между расходом мощности электродвигателя мешалки и сопротивлением перемешиванию. Необходимо установить зависимости расхода мощности привода мешалки от различных технологических параметров. Были проведены эксперименты: в лабораторных и производственных условиях, которые показали достаточно простые зависимости.

Ключевые слова: асфальтобетонная смесь, органические вяжущие, перемешивание, вязкость смеси, свойства асфальтобетона.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

© **K.A. Vasilev, G.A. Averchenko**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(St. Petersburg, Russia)

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE MIXING PROCESS
OF ASPHALT CONCRETE MIXTURES**

The process of mixing mineral components with organic binders in the technology of preparation of hot asphalt concrete mixtures is considered. As a working hypothesis, the assumption of a functional relationship between the power consumption of the electric motor of the agitator and the mixing resistance is accepted. It is necessary to establish the dependence of the power consumption of the agitator drive on various technological parameters. Experiments were carried out: in laboratory and production conditions, which showed fairly simple dependencies.

Key words: asphalt concrete mixture, organic binders, mixing, viscosity of the mixture, properties of asphalt concrete.

ВВЕДЕНИЕ

В технологии приготовления горячих асфальтобетонных смесей наиболее сложным и наименее изученным процессом является перемешивание минеральных компонентов с органическими вяжущими. Решение задачи усложняется тем, что при этом изменяются такие свойства среды, как вязкость и агрегатное состояние.

Изучению этого процесса посвящен ряд работ [1–4], в которых на основании изменения расхода мощности привода мешалки предлагается судить не только о достижении однородности смеси [5], но и об оценке качества асфальтобетонных смесей в процессе перемешивания компонентов, которое в конечном итоге определяет работоспособность асфальтобетонного покрытия.

Помимо диспергирования органического вяжущего, теплообмена и массопереноса в смесителе могут протекать процессы окислительной поликонденсации, существенно изменяющие реологические характеристики асфальтобетона. Последнее обстоятельство используется в технических решениях по приготовлению горячих асфальтобетонных смесей путем совмещения процессов окисления или доокисления вяжущего и перемешивания компонентов смеси в одной операции [6, 7].

ИССЛЕДОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Применение такой технологии для получения асфальтобетонных смесей обуславливает необходимость контроля за изменением консистенции вяжущего в процессе перемешивания. В качестве общей рабочей гипотезы принято предположение о функциональной зависимости между расходом мощности электродвигателя мешалки и сопротивлением перемешиванию, вызванным изменяющейся вязкостью смеси. Поэтому необходимо установить зависимости расхода мощности привода мешалки от различных технологических параметров (температуры смеси, времени перемешивания, инициатора процесса окисления и скорости ввода его в мешалку).

С этой целью в лабораторных и производственных условиях были проведены эксперименты. Для получения стабильных значений расходов мощности параметры технологического процесса приготовления горячих асфальтобетонных смесей выдерживались на строго заданных уровнях.

Принцип действия лабораторной установки, следующий: напряжение, пропорциональное мощности, потребляемой электродвигателем постоянного тока мешалки, поступало на фильтр нижних частот (ФНЧ), а с выхода ФНЧ напряжение подавалось на цифровой вольтметр В7-16 и шлейфовый осциллограф НО-431. Число

оборотов мешалки контролировалось с помощью электронного цифрового тахометра ТЦ-1.

Температура смеси в процессе перемешивания измерялась с помощью термопары «ХК» и регистрировалась на диаграммах потенциометра КСП-4 и шлейфового осциллографа НО-431.

Таким образом, на диаграммной ленте шлейфового осциллографа НО-431 одновременно записывались расход мощности электродвигателя мешалки и изменения температуры смеси. Применение двигателя постоянного тока П-12 и стабилизированных выпрямителей ТЗС-13, УИП-2 позволяло задавать идентичные начальные условия эксперимента. В связи с относительной неоднородностью перемешиваемой асфальтобетонной смеси нагрузка на двигатель, а следовательно, и потребляемая им мощность, в течение одного оборота вала мешалки изменяются несколько раз.

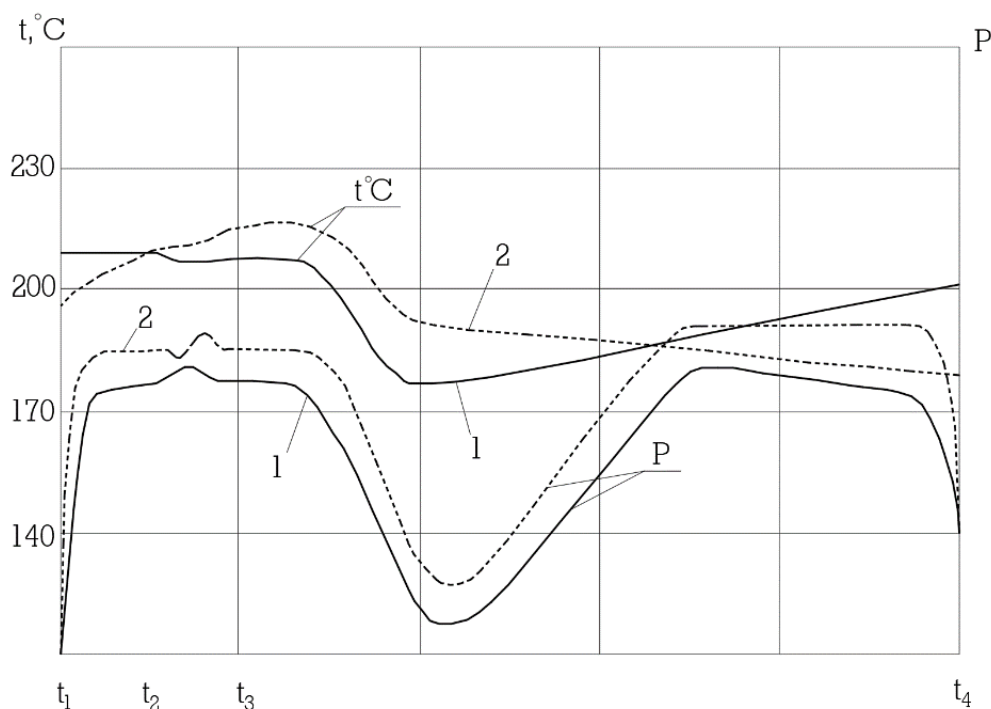


Рис. 1. Зависимость расхода мощности и температуры смеси от времени перемешивания:

- 1 — лабораторной мешалке;
- 2 — на смесителе Д-597;
- t_1 — начало введения минерального материала;
- t_2 — начало введения вяжущего;
- t_3 — начало введения инициатора окисления;
- t_4 — выгрузка смеси

Однако целью эксперимента было выявить изменения мощности, на один-два порядка более продолжительные во времени, обусловленные изменением вязкости смеси [8–11]. Для этого в экспериментальной

установке применен ФНЧ. Лабораторная мешалка была снабжена встроенным подогревателем, что позволило снимать функциональные зависимости расхода мощности от температуры, а также стабилизировать температуру смеси. Типичная запись влияния параметров процесса на расход мощности и температуру приведена на Рис. 1. После ввода минерального материала в мешалку расход мощности на диаграмме возрастает до определенного значения, а затем стабилизируется, что свидетельствует о равномерном распределении частиц минеральных компонентов смеси в объеме. С введением в перемешиваемый минеральный материал гудрона расход мощности, потребляемой приводом мешалки, возрастает с последующей стабилизацией. На диаграмме, кроме изменений уровня расхода мощности, в этот период отмечаются изменения значений температуры смеси. В момент ввода инициатора окислительного процесса наблюдается резкое снижение расхода мощности и температуры. Снижение расхода мощности объясняется возникновением эффекта псевдооживления в перемешиваемой смеси. Инициатор процесса окисления (водная пульпа гипохлорида кальция) в результате резкого повышения температуры при контакте с перемешиваемой горячей смесью (180–220°C) в кратчайший промежуток времени превращается в пар с образованием в объеме смеси подобия микровзрывов [12–13]. Это вызывает при равномерной подаче инициатора псевдооживление перемешиваемой зернистой массы смеси, частицы которой под действием восходящих потоков пара оказываются взвешенными и приобретают текучесть. Снижение температуры смеси в этот период связано с потерями тепла на парообразование. Эффект псевдооживления продолжается во время подачи инициатора окислительного процесса и прекращается после эвакуации парогазовой смеси из мешалки. С окончанием псевдооживления смеси расход мощности существенно возрастает, что можно объяснить ростом удельного сопротивления сдвига, вызванного понижением температуры и качественным изменением состава вяжущего. В дальнейшем в лабораторном эксперименте температура смеси начинает расти. Это явление не имеет никакого отношения к процессам, происходящим при смешении, и может быть объяснено только наличием нагревателя и значительной (по отношению к массе смеси) массой самой нагретой мешалки, температура которой оказывается выше, чем температура смеси [14–15].

Так как после ввода инициатора окислительного процесса происходит структурообразование пленки вяжущего, то представляло определенный интерес проследить, как изменяется характер зависимости расхода мощности от температуры до и после ввода инициатора в одних и тех же смесях (Рис. 2). Как видно, экспериментальные точки с достаточной степенью точности можно аппроксимировать линейными функциями вида:

$$P(t) = P_0 - kt, \quad (1)$$

где $P_0, k - \text{const}$, t – температуры смеси.

Из полученных данных следует, что постоянные P_0, k принимают следующие значения: до ввода инициатора окислительного процесса $P_0 \in (70 - 110)$, $k \in (0,1 - 0,2)$; после ввода — $P_0 \in (160 - 220)$, $k \in (0,4 - 0,7)$.

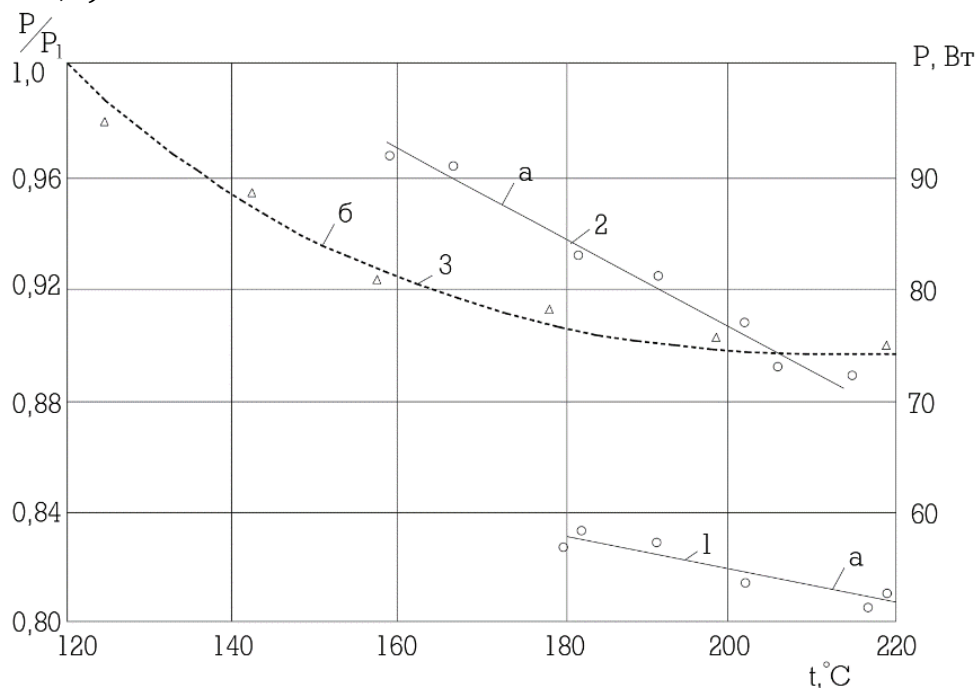


Рис. 2. Зависимость расхода мощности от температуры смеси:

- а – на лабораторной мешалке;
- б – на смесителе Д-597;
- 1,3 – до ввода инициатора процесса;
- 2 – после ввода инициатора процесса

В производственных условиях эксперимент проводился на смесителе Д-597. Так как привод мешалки выполнен на основе асинхронного двигателя, то схема измерения расхода мощности отличается от лабораторной. В разрыв одной из фаз питания двигателя мешалки подключался трансформатор тока И54М. Со вторичной обмотки И54М напряжение поступало на выпрямитель, далее на ФНЧ.

Для контроля и тарировки записи мощности на ленте шлейфового осциллографа использовался измерительный комплект К506, с помощью которого измерялась мощность, величина тока для каждой из фаз, напряжение между соответствующими фазами и правильность их чередования (см. рис. 1, пунктир). Как видно, характер изменения расхода мощности на производственном смесителе качественно отличался от изменений расходов мощностей в лабораторном эксперименте. Это

объясняется главным образом различной конструкцией мешалок и различными соотношениями масс металла к массам смесей (а следовательно, соотношениями их теплоемкостей).

Зависимость расхода мощности от температуры, аналогичную представленной на Рис. 2, на производственном смесителе Д-597 не удастся получить, так как нет возможности целенаправленно изменять температуру смеси в мешалке. Таким образом, прирост мощности привода мешалки вследствие изменения консистенции вяжущего после ввода инициатора окислительного процесса можно оценить только аналитически. Для этого надо знать зависимость расхода мощности привода мешалки от температуры до ввода инициатора (Рис. 2, пунктир). Для этой функциональной зависимости наиболее удовлетворительно подходит эмпирическая формула (ошибка относительно экспериментальных данных менее 1 %).

$$\frac{P(t)}{P_1} = at^b + c, \quad (2)$$

где $a = 3,6 \cdot 10^5$; $b = -3,102$; $c = 0,877$; t – температура смеси; P_1 – расход мощности при $t = 120^\circ\text{C}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в лабораторных и производственных экспериментах наблюдался прирост мощности привода мешалки после начала изменения консистенции вяжущего и, следовательно, увеличения вязкости смеси. В связи с тем, что последнее обуславливает изменение физико-механических свойств асфальтобетона, можно сделать заключение о возможности создания прибора оперативного контроля и управления качеством асфальтобетона в процессе его приготовления. Достаточно простые зависимости (1), (2) позволяют технически реализовать их в приборе с использованием более простой (по сравнению с цифровой) аналоговой обработки полезного сигнала (напряжения, пропорционального расходу мощности привода мешалки). Использование данного исследования напрямую влияет на срок службы асфальтобетонного покрытия, увеличение срока службы в среднем составит 7–10 %.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов.
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Лазарев Ю.Г., Новик А.Н., Симонов Д.Л. Формирование потребительских и эксплуатационных свойств автомобильных дорог // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2016. – № 1(35). – С. 43–47. [Lazarev YuG, Novik AN, Simonov DL. Formation of consumer and operational properties of highways. *Technical and technological problems of service*. 2016;1(35):43-47. (In Russ.)]. Ссылка активна на 06.12.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25952921>
2. Скоробогатченко Д.А., Засорина Г.Д. Техничко-экономическое обоснование строительства автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения на основании из переуплотненного грунта // Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2019. – № 1(44). – С. 121–133. [Skorobogatchenko DA, Zazorina GD. Feasibility study for the construction of highways with low traffic intensity on the basis of overcompacted soil. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture*. 2019;1(44):121-133. (In Russ.)]. Ссылка активна на 06.12.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37422263>
3. Сенькин Н.А., Филимонов А.С., Халимбеков И.М. и др. Предложения по строительству эстакадных конструкций и транспортно-пересадочных узлов высокоскоростной магистрали в Санкт-Петербурге // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 99–123. [Senkin NA, Filimonov AS, Khalimbekov IM, et al, editors. Proposals for the construction of overpass structures and transport hubs for the high-speed highway in St. Petersburg. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(1):99-123 (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20217199-123
4. Плеханов П.А., Шматченко В.В. Стандартизация магнитолевитационных транспортных систем в России // Транспортные системы и технологии. – 2018. – Т. 4. – №4. – С. 32–43. Plekhanov PA, Shmatchenko VV. Standardization of Maglev Transportation Systems in Russia. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(4):32-43. (In Russ., in Engl.). doi: 10.17816/transsyst20184432-43
5. Кривых Е.С. Метод объемного проектирования асфальтобетонных покрытий «спас» – как способ увеличения межремонтных сроков эксплуатации дорог России // Наука сегодня: теория и практика. 2019. – С. 12–16. [Krivykh ES. The method of volumetric design of asphalt concrete pavements "Spas" - as a way to increase the overhaul life of Russian roads. *Science Today: Theory and Practice*. 2019;12-16. (In Russ.)]. Ссылка активна на 06.12.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41198888>
6. Гатиятуллин М.Х., Исмагилов А.И. Эффективные методы содержания автомобильных дорог // Техничка и технология транспорта. – 2017. – № 2(3). – С. 8. [Gatiyatullin MKh, Ismagilov AI. Efficient methods of road maintenance. *Technique and technology of transport*. 2017;2(3):8. (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29771638>. Ссылка активна на 06.12.2022.
7. Трифонова А.А., Алексеев С.В., Егосин А.М. Актуальные конструкции деформационных швов автодорожных мостов // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 2. – С. 42–54. [Trifonova AA, Alekseev SV, Yegoshin AM. Resent constructions of road bridges expansion joints. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(2):42-54 (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20217242-54
8. Пугачев И.Н., Куликов Ю.И., Васильев А.Е. Особенности нагруженности автомобильных дорог в различных аспектах // Дальний восток: проблемы

- развития архитектурно-строительного комплекса. – 2016. – № 1. – С. 101–105. [Pugachev IN, Kulikov YuI, Vasiliev AE. Peculiarities of road loading in various aspects. *Far East: problems of development of the architectural and construction complex*. 2016;1:101-105 (In Russ.)]. Ссылка активна на 06.12.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28140445>
9. Юшков В.С., Кычкин В.И., Бармин Н.Д. Реализация диагностики и ремонта мостовых сооружений // Вестник МГСУ. – 2016. – № 6. – С. 118–125. [Yushkov VS, Kychkin VI, Barmin ND. Realizaciya diagnostiki i remonta mostovykh sooruzhenij. *Vestnik MGSU*. 2016;(6):118-125. (In Russ.)]. Ссылка активна на 17.03.2021. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26210458>
 10. Тимофеев Д.Р., Тимофеев Д.Д. Усиление мостовых конструкций с использованием композиционных материалов // Актуальные проблемы автомобильного, железно-дорожного, трубопроводного транспорта в Уральском регионе : материалы междунар.науч.-техн. конф. (1–3 декабря 2005 г.). Пермь: ПГТУ. – 2005. – С. 45–51. [Timofeev DR, Timofeev DD. Usilenie mostovykh konstrukcij s ispol'zovaniem kompozicionnyh materialov. *Aktual'nye problemy avtomobil'nogo, zhelezno-dorozhnogo, truboprovodnogo transporta v Ural'skom regione: materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (1-3 dekabrya 2005 g.)*. Perm': PGU. 2005;45-51. (In Russ.)]. Ссылка активна на 06.12.2022. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002872497>
 11. Денисов В.П., Траутвайн А.И., Яковлев Е.А. Разработка математического инструмента расчета температуры смешивания и уплотнения асфальтобетонной смеси // Вестник белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2019. – № 8. – С. 8–13. [Denisov VP, Trautvain AI, Yakovlev EA. Development of a mathematical tool for calculating the temperature of mixing and compaction of an asphalt concrete mixture. *Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov*. 2019;8:8-13 (In Russ.)]. Ссылка активна на 06.12.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39559272>
 12. Лазарев Ю.Г., Синицына Е.Б. Современное состояние проблемы совершенствования транспортной инфраструктуры // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2013. – № 4(26). – С. 71–74. [Lazarev YuG, Sinitsyna EB. The current state of the problem of improving the transport infrastructure. Technical and technological problems of service. 2013;4(26):71-74 (In Russ.)]. Ссылка активна на 06.12.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20808009>
 13. Ермошин Н.А., Лазарев Ю.Г. Многокритериальная оптимизация в задачах транспортного планирования // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2017. – № 1(39). – С. 58–62. [Ermoshin NA, Lazarev YuG. Multicriteria optimization in transport planning problems. Technical and technological problems of service. 2013;4(26):71-74 (Russ., Engl.)]. Ссылка активна на 06.12.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29005493>
 14. Лазарев Ю.Г., Петухов П.А., Широких М.В. Формирование методики оценки точности (надежности) проектирования дорожных одежд нежесткого типа // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 2(55). – С. 38–46. [Lazarev YuG, Petukhov PA, Shirokikh MV. Formation of a methodology for assessing the accuracy (reliability) of designing non-rigid type pavements. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2016;2(55):38-46. (In Russ.)]. Ссылка активна на 06.12.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26366397>
 15. Гарсия А., Шланген Э., Мартин В.Д.В., Герберт В.Б. Оптимизация состава и процесса смешивания дренающего асфальтобетона со свойством самозакрытия трещин // Вестник томского государственного архитектурно-строительного

университета. – 2013. – № 3(40). – С. 367–382. [Garcia A, Schlangen E, Martin WDW, Herbert WB. Optimization of the composition and mixing process of draining asphalt concrete with the property of self-closing cracks. Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2013;3(40):367-382. (In Russ.)]. Ссылка активна на 06.12.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21150783>

Сведения об авторах:

Васильев Кирилл Андреевич, студент, Инженерно-строительный институт;
eLibrary SPIN: 8250-4609; ORCID: 0000-0002-1013-2029;
E-mail: vkirill99@yandex.ru

Аверченко Глеб Александрович, ассистент, Инженерно-строительный институт;
eLibrary SPIN: 1707-9958; ORCID: 0000-0001-8813-545X;
E-mail: averchenko_ga@spbstu.ru

Information about the authors:

Kirill A. Vasilev, student;
eLibrary SPIN: 8250-4609; ORCID: 0000-0002-1013-2029;
E-mail: vkirill99@yandex.ru

Gleb A. Averchenko, assistant;
eLibrary SPIN: 1707-9958; ORCID: 0000-0001-8813-545X;
E-mail: averchenko_ga@spbstu.ru

Цитировать:

Васильев К.А., Аверченко Г.А. Экспериментальное исследование процесса перемешивания асфальтобетонных смесей // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 5–13. doi: 10.17816/transsyst2022845-13

To cite this article:

Vasilev KA, Averchenko GA. Experimental study of the mixing process of asphalt concrete mixtures. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):5-13. doi: 10.17816/transsyst2022845-13