

Полевое исследование процесса укладки асфальтобетонной смеси с компонентами автоматизации технологии неразрушающего контроля уплотнения

А.П. Прокопьев, Р.Т. Емельянов, Е.Ю. Янаев, Е.С. Турьшева, А.Е. Потапов
Сибирский федеральный университет, Красноярск

Аннотация: Представлены результаты экспериментального исследования процесса укладки асфальтобетонной смеси с компонентами автоматизации технологии неразрушающего непрерывного контроля уплотнения в полевых условиях дорожного строительства. Исследование проводилось с целью получения данных реального процесса для создания системы контроля качества уплотнения дорожных материалов в режиме реального времени. Во время исследования измерялись режимные параметры укладчика (скорость движения, частота ударов трамбуемого бруса, частота вибрации плиты), температура уплотненной асфальтобетонной смеси, толщина слоя дорожного покрытия, вертикальное ускорение вибрационной плиты. В исследовании использовалась асфальтобетонная смесь типа А марки I по ГОСТ 9128-2013. Варьировались режимные параметры: частота ударов трамбуемого бруса, частота вибрации плиты. Ускорение вибрационной плиты определялось с использованием цифрового акселерометра с беспроводной передачей сигнала через Bluetooth на смартфон с операционной системой Android. В работе получены значения безразмерных комплексов, показатель уплотнения асфальтобетонной смеси – пик-фактора, характеризующие изменение качества уплотнения асфальтобетонной смеси.

Ключевые слова: асфальтобетонная смесь, неразрушающие технологии, непрерывный контроль уплотнения, показатель уплотнения, ускорение вибрационной плиты.

Повышение качества уплотнения дорожных материалов возможно за счет внедрения непрерывного неразрушающего контроля [1] уплотнения в процессе строительства покрытий. Применение таких автоматизированных систем на асфальтоукладчиках позволяет значительно повысить эффективность процесса уплотнения, перейти на уровень применения киберфизических систем в строительстве [2, 3]. В строительной отрасли получают распространение методы неразрушающего контроля для оценки эксплуатационных характеристик строительных материалов и конструкций [4, 5]. Известны исследования [6-8] зарубежных ученых по технологии интеллектуального уплотнения.

При оптимальной настройке режимных параметров современные асфальтоукладчики могут обеспечить уплотнение асфальтобетонной смеси с коэффициентом 0,96 и выше. Это позволяет повысить качество асфальтобетонных покрытий и уменьшить стоимость дорожного строительства за счет сокращения типов и количества дорожных катков.

Экспериментальные исследования процесса укладки асфальтобетонной смеси с уплотнением трамбуемыми и вибрационными воздействиями проводились осенью 2021 г. на объекте строительства автомобильной дороги в пригороде г. Красноярска. Температура окружающего воздуха была в диапазоне от 18 °С до 20 °С. Объект исследования – асфальтобетонная смесь типа А марки I по ГОСТу 9128-2013 «Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов», верхний слой, толщина 50 мм, ширина покрытия 3,6 м, вибрационный рабочий орган укладчика Vogele Super. Температура смеси за рабочим органом укладчика 130 °С – 135 °С.

Цель исследования – определить временные зависимости ускорения вибрационной плиты рабочего органа укладчика при уплотнении асфальтобетонной смеси верхнего слоя дороги.

Варьируемые режимные параметры: частота трамбуемого бруса f_t (максимальная частота 30 Гц – 100 %) / частота вибрационной плиты f_{scr} (максимальная частота 50 Гц – 100 %). Определение коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси по зависимостям, полученным СоюздорНИИ, ВНИИСтройдормаш [9, 10].

Технические средства, измерительные приборы: для измерения информационного сигнала вертикального ускорения вибрационной плиты применялся цифровой датчик акселерометр WitMotion Bluetooth 2,0 BWT61CL, рис. 1, с беспроводной передачей сигнала через Bluetooth 2,0 (MPU6050 на ПК/Android/MCU).



Рис. 1. Акселерометр WitMotion Bluetooth 2,0 BWT61CL

Программное обеспечение Witmotion. Смартфон (операционная система Android). Измерение скорости движения по приборам укладчика - Vogele Super. Толщина слоя ручным шаблоном – проволочный щуп 50 мм. Температура смеси определялась бесконтактным инфракрасным пирометром ADA TempPro 900. Коэффициент уплотнения K_y определялся по графикам ВНИИСтройдормаш, Союздорнии [9, 10].

Результаты измерений вертикального ускорения вибрационной плиты рабочего органа укладчика получены при реализации трех вариантов соотношений режимных параметров f_t/f_{scr} : 12 Гц/30 Гц (40 %/60 %); 15 Гц/35 Гц (50 %/70 %); 18 Гц/40 Гц (60 %/80 %). Скорость укладчика $V_a = 5$ м/мин.

Выполнен расчет безразмерных комплексов (для рабочего органа трамбуемый брус – вибрационная плита):

число ударов вибрационной плиты и трамбуемого бруса, приходящиеся на элементарный участок поверхности укладываемого покрытия [7]:

$$n_{scr} = \frac{f_{scr} \cdot l_{scr}}{V_a}; n_t = \frac{f_t \cdot l_t}{V_a}; n_{t.scr} = \frac{f_t \cdot l_{scr}}{V_a},$$

где f_{scr} – частота колебаний вибрационной плиты, Гц; l_{scr} – длина вибрационной плиты, м; V_a – скорость передвижения укладчика, м/с; f_t – частота колебаний трамбуемого бруса, Гц; l_{scr} – длина трамбуемого бруса, м.

Пик-фактор (Крест-фактор, Crest factor). Пик-фактор – параметр, определяющий количество ударных импульсов во временном сигнале.

Пик-фактор определяется по следующей формуле:

$$C = a_p / a_{\text{rms}},$$

где a_p – максимальное абсолютное значение ускорения, м/с²; a_{rms} – среднеквадратичное значение ускорения вибрационной плиты.

Максимальное абсолютное значение ускорения (a_p). Этот показатель описывает изменение амплитуды сигнала ускорения вибрационной плиты:

$$a_p = \max \{|a_{zi}\}| \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

где a_{zi} – случайно измеренное вертикальное (ось Z) значение ускорения вибрационной плиты укладчика, м/с²; n – количество собранных образцов за определенный период.

Среднеквадратичное значение ускорения вибрационной плиты a_{rms} отражает эффективность вибрационного ускорения в процессе уплотнения:

$$a_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{zi}^2} = \sqrt{\frac{a_{z1}^2 + a_{z2}^2 + \dots + a_{zn}^2}{n}}.$$

Результаты обработки экспериментальных данных приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты обработки экспериментальных данных

Режимы трамбуемого бруса, вибрационной плиты, f_t/f_{scr}	V_a , м/мин	K_y	Безразмерные комплексы			a_{rms} , м/с ²	a_p , м/с ²	Пик-фактор, C	Временной период осциллограммы
			n_{scr}	n_t	$n_{t,scr}$				
12Гц/30Гц (40%/60%)	5	0,9	118,	5,0	47,5	1,12	0,26	0,24	5 с
		2	8	4	2	1,02	0,26	0,26	60 с
15Гц/35Гц (50%/70%)	5	0,9	138,	6,3	59,4	1,16	0,89	0,77	5 с
		3	6			1,62	0,89	0,55	60 с
18Гц/40Гц (60%/80%)	5	0,9	158,	7,5	71,2	1,07	1,01	0,94	5 с
		4	4	6	8	0			

						1,35	1,02	0,75	60 с
						2	1		

По результатам расчета, с увеличением вибрационного воздействия за счет увеличения частоты колебаний трамбуемого бруса и вибрационной плиты от 12 Гц/30 Гц до 18 Гц/40 Гц, пик-фактор увеличивается от 0,26 до 0,75, что соответствует увеличению коэффициента уплотнения. Полученные результаты позволяют предложить идею использования параметра ускорения вибрационной плиты рабочего органа укладчика для создания системы непрерывного контроля уплотнения асфальтобетонной смеси.

Графики зависимостей a_{rms} , a_p и пик-фактора C от коэффициента уплотнения K_y (экспертная оценка) представлены на рис. 2 – рис. 4.

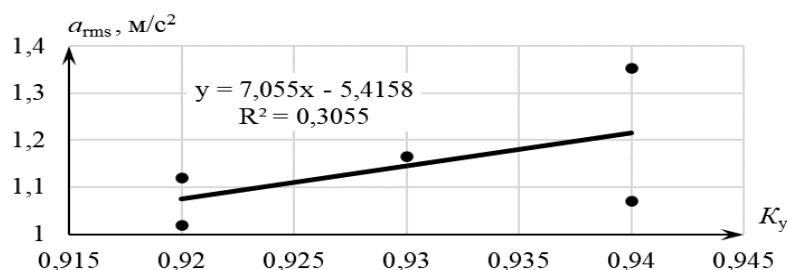


Рис. 2. Зависимость среднеквадратичного вертикального ускорения a_{rms} от коэффициента уплотнения смеси K_y

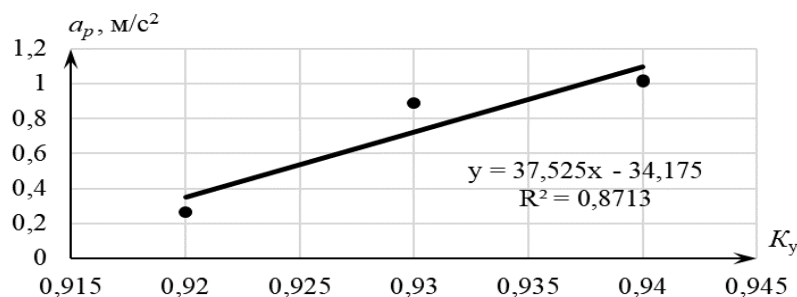


Рис. 3. Зависимость максимального абсолютного значения вертикального ускорения a_p от коэффициента уплотнения смеси

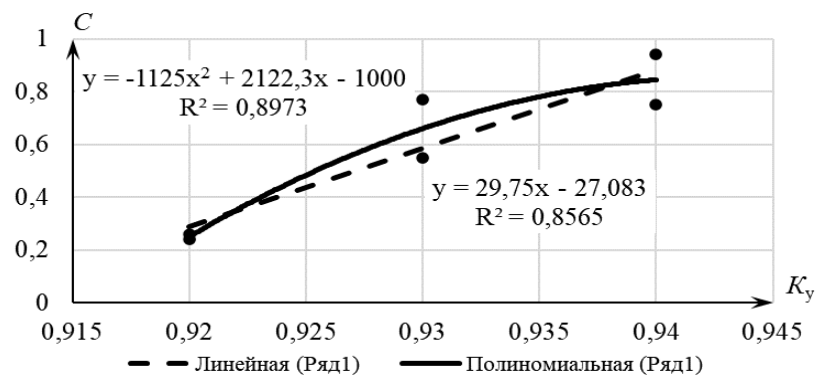


Рис. 4. Зависимость пик-фактора C от коэффициента уплотнения смеси K_y

Результаты экспериментального исследования, табл. 1, рис. 2-4, подтверждают наличие зависимости ускорения вибрационной плиты укладчика от степени уплотнения асфальтобетонной смеси. Однородность структуры асфальтобетона формируется под действием факторов – уплотняющей нагрузки и температуры. В процессе укладки, когда температура 130 – 140 °С, можно получить требуемое качество уплотнения.

Выводы. Полевые исследования процесса укладки асфальтобетонной смеси подтвердили возможности автоматизации технологии непрерывного неразрушающего контроля качества уплотнения. Определены амплитудные значения вертикального ускорения вибрационной плиты. Графическая зависимость пик-фактора C от коэффициента уплотнения в линейном виде имеет достоверность 0,86, полиномиальном – 0,9. Цифровой акселерометр с Bluetooth обеспечил значительные преимущества при документировании результатов экспериментальных измерений.

Литература

1. Каневский И.Н., Сальникова Е.Н. Неразрушающие методы контроля // Владивосток: ДВПИ им. В.В. Куйбышева, 2007. 243 с.
2. Насонов Е.И., Макиша Е.В. Киберфизические системы в строительной отрасли // Инженерный вестник Дона. 2019, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5678.



3. Чельшков П.Д. Киберфизическая интеграция строительных систем // Естественные и технические науки. 2018. № 6. С. 198-200.

4. Яворский О.В., Чернов С.А., Ширяев Н.И. Оценка качества производства работ по устройству верхних слоев покрытия автомобильных дорог неразрушающим методом // Инженерный вестник Дона, 2018, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4845.

5. Новоселова И.В., Денисенко Ю.С., Гагиева З.И., Питык А.Н. Применение методов неразрушающего контроля при обследовании зданий в рамках строительно-технической экспертизы // Инженерный вестник Дона, 2019, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5470.

6. Xu Q. and Chang G.K. Adaptive quality control and acceptance of pavement material density for intelligent road construction. Autom. Constr., 62, 2016, pp. 78-88. DOI: 10.1016/j.autcon.2015.11.004.

7. Zhu X., Bai S., Xue G., Yang J., Cai Y., Hu W., Jia X. and Huang B. Assessment of compaction quality of multi-layer pavement structure based on intelligent compaction technology. Constr. Build. Mater., 161, 2018, pp. 316-329. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.139.

8. Foroutan, Maziar, Bijay, K.C., Ghazanfari, Ehsan. Evaluation of Correlations between Intelligent Compaction Measurement Values and In Situ Spot Measurements, American Society of Civil Engineers Geo-Congress 2020 – Minneapolis, Minnesota. 2020, pp. 602-611. DOI: 10.1061/9780784482810.062.

9. Кизряков А.Н., Кабанов В.В., Фруктов П.А. Определение параметров виброуплотняющих органов асфальтоукладчиков // Труды ВНИИСтройдормаш. Вып. 107. 1986. С. 63-68.

10. Марышев Б.С., Слепая Б.М., Питецкий Ю.Н., Скрыльник А.П., Островский Э.Б., Либерман М.А., Ксоврели П.И. Уплотнение асфальтобетонных смесей асфальтоукладчиками // Автомобильные дороги. 1979. № 11. С. 11-12.

References

1. Kanevskiy I.N., Sal'nikova E.N. DVPI im. V.V. Kuybysheva, 2007. 243 p.
2. Nasonov E. I., Makisha E. V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5678.
3. Chelyshkov P. D. Estestvennye i tehicheskie nauki. 2018. № 6. pp. 198-200.
4. YAvorskij O.V., CHernov S.A., SHiryaev N.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4845.
5. Novoselova I.V., Denisenko YU.S., Gagieva Z.I., Pityk A.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5470.
6. Xu Q. and Chang G. K. Autom. Constr., 62, 2016, pp. 78-88.
7. Zhu X., Bai S., Xue G., Yang J., Cai Y., Hu W., Jia X. and Huang B. Constr. Build. Mater, 161, 2018, pp. 316-329.
8. Foroutan, Maziar, Bijay, K.C.; Ghazanfari, Ehsan. Evaluation of Correlations between Intelligent Compaction Measurement Values and In Situ Spot Measurements, American Society of Civil Engineers Geo-Congress 2020. Minneapolis, Minnesota. 2020, pp. 602-611.
9. Maryshev B.S., Slepaja B.M., Piteckij Ju.N., Skryl'nik A.P., Ostrovskij Je.B., Liberman M.A., Ksovreli P.I. Avtomobil'nye dorogi. 1979. № 11. pp. 11-12.
10. Kizrjakov A.N., Kabanov V.V., Frukto P.A. Trudy VNIISTrojdomash. 1985. 102. pp. 3-7.