

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА УПЛОТНЕНИЯ ДОРОЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ АСФАЛЬТОУКЛАДЧИКОВ

*Прокопьев А.П., Емельянов Р.Т., Авласевич А.И., Кравцов К.С., Некрасов И.О.
Сибирский федеральный университет, Красноярск*

Ключевые слова: асфальтоукладчик, показатель качества уплотнения, коэффициент уплотнения, безразмерный комплекс, показатель эффективности.

Аннотация. Рассмотрены результаты исследования по разработке показателей качества уплотнения дорожных материалов и эффективности для асфальтоукладчиков. На основе метода анализа размерностей аналитическим путем получен безразмерный комплекс, учитывающий величину хода трамбующего бруса рабочего органа асфальтоукладчика, для использования при разработке и синтезе систем непрерывного неразрушающего контроля качества уплотнения, автоматического управления и оценки эффективности рабочего процесса. Получены показатели для оценки эффективности существующих и вновь создаваемых моделей асфальтоукладчиков, имеющие тесную корреляционную связь с коэффициентом уплотнения асфальтобетонной смеси. Представлены результаты расчета и анализ этих показателей для 10-ти моделей асфальтоукладчиков. Предложена формула, предназначенная для сравнения различных моделей укладчиков при создании новых моделей, модернизированных вариантов, а также для обоснования решения на приобретение асфальтоукладчиков.

METHODOLOGY FOR DETERMINING INDICATORS FOR ASSESSING THE QUALITY OF COMPACTION OF ROAD MATERIALS AND EFFICIENCY FOR ASPHALT PAVERS

*Prokopen A.P., Emelyanov R.T., Avlasevich A.I., Kravtsov K.S., Nekrasov I.O.
Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

Keywords: asphalt paver, compaction quality indicator, compaction coefficient, dimensionless complex, efficiency indicator.

Abstract. The results of a study on the development of indicators of the quality of compaction road materials and efficiency for asphalt pavers are considered. On the basis of the method of dimension analysis, a dimensionless complex was obtained by analytical means, taking into account the magnitude of the stroke of the tamper beam of the asphalt paver's working body, for use in the development and synthesis of systems for continuous non-destructive quality control of compaction, automatic control and assessment of the efficiency of the work process. Indicators for assessing the efficiency of existing and newly created models of asphalt pavers, which have a close correlation with the compaction coefficient of the asphalt concrete mixture, have been obtained. The results of calculation and analysis of these indicators for 10 models of asphalt pavers are presented. A formula is proposed to compare different models of pavers when creating new models, modernized versions, as well as to justify the decision to purchase asphalt pavers.

Введение

Недоуплотнение слоев дорожной одежды приводит к преждевременным многочисленным повреждениям в процессе эксплуатации. Согласно своду правил СП 78.13330.2012 «Автомобильные дороги», при укладке и уплотнении верхнего слоя асфальтобетонного покрытия применяются комплекты машин – асфальтоукладчик, отряд катков. Звено катков состоит из легких (массой 5÷6 т), средних (8÷10 т) и тяжелых (10÷15 т). Исследования [1] показали, «что легкие катки обеспечивают коэффициент уплотнения (K_c) равный 0,85÷0,88, средние – $K_c = 0,92÷0,94$ и тяжелые $K_c = 0,97÷1,0$ ». С учетом этих данных и результатов других научных работ [2-4] можно сделать вывод о перспективном направлении улучшения качества асфальтобетонных покрытий за счет применения современных высокоэффективных асфальтоукладчиков при уменьшении количества и разновидностей катков. В работе [5] приведены данные о высокой уплотняющей способности асфальтоукладчиков с такими рабочими органами. В процессе укладки и уплотнения асфальтоукладчиком (скорость движения 1,5 м/мин, частота трамбующего бруса 27,5 Гц)

крупнозернистых смесей (тип А и Б, с содержанием щебня более 40%) получена степень уплотнения близкая к нормативной. В этом случае, после укладчика требуется только подкатка статическим катком тяжелого типа. Важным фактором эффективности такого варианта применения асфальтоукладчиков является температура смеси в рабочем диапазоне $140^{\circ}\text{C} \pm 100^{\circ}\text{C}$. Непрерывное изменение плотности и температуры смеси приводит к постоянному росту деформативных и прочностных характеристик уплотняемого слоя. С понижением температуры смеси модуль деформации и предел прочности вырастают. При этом, модуль деформации растет быстрее, чем предел прочности. Так, при уменьшении температуры смеси с 140°C до 90°C модуль деформации, являющийся мерой жесткости материала, возрастает в 6 раз, а предел прочности только в три раза [6]. Для контроля качества объектов строительства используются неразрушающие методы [7-9].

Материалы и методы исследования

Эффективность асфальтоукладчиков объективно можно установить при их анализе в одинаковых эксплуатационных условиях. Обобщенный показатель P_{NG} , равный произведению удельной энергоемкости N_S на удельную металлоемкость G_S , дает возможность оценить эффективность асфальтоукладчиков принадлежащих к одной размерной группе в диапазоне ограниченного изменения главного параметра [10].

Определение входящих в выражения P_{NG} , N_S , G_S величин N и G не представляет трудностей, так как для отечественных и зарубежных асфальтоукладчиков они всегда приводятся в проспектах и технических характеристиках. Задача состоит в определении производительности асфальтоукладчиков.

Производительность P асфальтоукладчиков можно определить по следующей зависимости [10]:

$$P = 3600 \cdot B \cdot h \cdot V \cdot \rho, \quad (1)$$

где B – ширина укладываемой полосы дорожного полотна, м; h – толщина укладываемого слоя, м; V – рабочая скорость асфальтоукладчика, м/с; ρ – плотность асфальтобетонного покрытия, уплотненного рабочим органом асфальтоукладчика, $\text{т}/\text{м}^3$. Однако непосредственное применение данной формулы для оценки эффективности асфальтоукладчиков затруднено из-за отсутствия четких данных по параметрам V и ρ , которые зависят не только от параметров асфальтоукладчиков, но и от типа уплотняемого материала.

Рассмотрим рабочий процесс асфальтоукладчика и параметры, входящие в формулу производительности. Асфальтоукладчик осуществляет прием асфальтобетонной смеси, транспортирование от бункера к шнековому распределителю, распределение по ширине покрытия и уплотнение. К полезной работе асфальтоукладчика можно отнести работу на распределение и уплотнение асфальтобетонной смеси.

Результаты

Асфальтоукладчики используются для укладки асфальтобетонных смесей разных типов. При оценке эффективности асфальтоукладчиков можно исключить из показателей оценки параметры, характеризующие свойства уплотняемого материала, так как можно установить зависимости между входящими в формулу производительности величинами и параметрами асфальтоукладчика.

Плотность ρ асфальтобетонной смеси, с учетом корреляционных связей с параметрами уплотняющих рабочих органов асфальтоукладчика и дорожных материалов, может быть представлена следующей функцией:

$$\rho = \varphi(e, f_t, V, h),$$

где $e = 2 \cdot r_t$ – ход бруса, м; r_t – эксцентриситет вала привода трамбующего бруса, м; f_t – частота колебаний трамбующего бруса, Гц.

Коэффициент уплотнения смеси [11]

$$K_c = \rho / \rho_{st}, \quad (2)$$

где ρ – плотность асфальтобетонной смеси, уплотненной рабочим органом укладчика, т/м³; ρ_{st} – плотность этого же переформованного образца, уплотненного стандартным способом в лаборатории, т/м³.

В работе [5] для расчета параметров асфальтоукладчиков предложен показатель n_t , который характеризует число воздействий трамбующего бруса на элементарный участок поверхности слоя смеси:

$$n_t = f_t \cdot l_t / V, \quad (3)$$

где l_t – длина трамбующего бруса, м; V – м/с.

Длина трамбующих брусьев современных асфальтоукладчиков по данным производителей составляет от 0,023 до 0,043 м. Для разработки системы управления режимными параметрами асфальтоукладчиков требуются дополнительные факторы, оказывающие значительное влияние на эффективность процесса уплотнения. На основе результатов экспериментальных исследований [2, 11] можно выделить переменную, соответствующую этой задаче – ход трамбующих брусьев, который влияет на уплотняющую способность асфальтоукладчиков. Он устанавливается при подготовке асфальтоукладчиков к работе на объекте от 0,004 до 0,012 м в зависимости от толщины слоя и типа дорожного материала [11].

На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований [2, 5, 11] методом анализа размерностей параметров [12] получен показатель $n_{t,e}$ рабочих органов асфальтоукладчика, который имеет тесную корреляционную связь с коэффициентом уплотнения K_c смеси:

$$n_{t,e} = f_t \cdot e / V. \quad (4)$$

По данным об уплотняемости смеси при оптимальных режимах работы асфальтоукладчиков [11] выполнен анализ значений показателя $n_{t,e}$ (4).

Результаты расчетов показателя $n_{t,e}$ представлены в таблице 1.

Табл. 1. Результаты расчета безразмерного комплекса

| Модель асфальтоукладчика. Режим работы | Гранулометрический тип смеси | Коэф- фициент уплотнения | $n_{t,e}$ |
|--|---|--------------------------------|-----------|
| С-750 (ФРГ). Частота вращения вала привода – 1400 мин ⁻¹ , ход бруса – 4 мм, частота вращения вала плиты – 3000 мин ⁻¹ , амплитуда колебаний – 0,5 мм, скорость движения укладчика – 2,5 м/мин. | Крупнозернистая Среднезернистая типа А Среднезернистая типа Б | 0,95 0,93 0,92 | 2,19 |
| Супер-204 (ФРГ). Частота вращения вала привода – 400÷720 мин ⁻¹ , ход бруса – 4 мм, частота вращения вала плиты – 3000 мин ⁻¹ , амплитуда колебаний – 1,5 мм, скорость движения укладчика – 2,5 м/мин. | Среднезернистая типа В Мелкозернистая типа Б Песчаная типа Г | 0,90 0,92 0,88 | 1,14 |
| Супер-1602 (ФРГ). Частота вращения вала привода – 1160 мин ⁻¹ , ход бруса – 4 мм, частота вращения вала плиты – 2850 мин ⁻¹ , амплитуда колебаний – 0,8 мм, скорость движения укладчика – 2,5 м/мин. | Мелкозернистая типа А Мелкозернистая типа Б | 0,94 0,91 | 1,84 |

На основе формулы (4) показателя $n_{t,e}$, учитывая функциональную зависимость коэффициента уплотнения K_c смеси от величины хода e трамбующего бруса, можно получить выражение

$$K_c = K \cdot \frac{f_t \cdot e}{V} + K_{c.in}, \quad (5)$$

где K – коэффициент пропорциональности; $K_{c.in}$ – значение начального коэффициента уплотнения смеси до уплотняющего воздействия рабочим органом укладчика.

Значения K и $K_{c.in}$ можно определить как коэффициенты регрессионного уравнения по методике работы [5], где авторы на основе экспериментальных исследований получили зависимости с использованием нескольких безразмерных комплексов. Для варианта работы трамбуемого бруса с плитой статического действия в работе [5] получено выражение

$$K_c = 0,000145 \cdot \frac{f_t \cdot l_{scr}}{V} + 0,878,$$

где l_{scr} – длина выглаживающей плиты, м.

Задача определения значений K и $K_{c.in}$ соавторами данной работы формулируется как направление дальнейшего исследования.

Приравнявая выражения (2) и (5), получим формулу для расчета рабочей скорости асфальтоукладчика

$$V = K \cdot e \cdot f_t \cdot \rho_{st} / \rho + K_{c.in} \cdot \rho_{st} \quad (6)$$

Подставляя выражение (6) в формулу (1), получим следующую зависимость:

$$P = 3600 \cdot B \cdot h \cdot e \cdot f_t \cdot K \cdot \rho_{st} + K_{c.in} \cdot \rho_{st} \cdot V$$

Принимая $K, h, \rho_{st}, K_{c.in} \approx const$, производительность можно представить в следующем виде:

$$P = 3600 \cdot B \cdot e \cdot f_t \cdot V \quad (7)$$

Учитывая, что уплотняющие рабочие органы асфальтоукладчиков могут иметь несколько трамбующих брусьев, выражение (7) можно представить в следующем виде:

$$P = 3600 \cdot B \cdot f_t \cdot \sum_{i=1}^n e_i \cdot V \quad (8)$$

где n – количество трамбующих брусьев.

Для асфальтоукладчиков оснащенных рабочими органами с трамбующими брусьями удельная энергоемкость, удельная металлоемкость и обобщенный показатель [12], соответственно, определяются следующими зависимостями:

$$N_s = \frac{N}{3600 \cdot B \cdot f_t \cdot \sum_{i=1}^n e_i}; \quad G_s = \frac{G}{3600 \cdot B \cdot f_t \cdot \sum_{i=1}^n e_i}; \quad P_{NG} = \frac{G \cdot N}{\left(3600 \cdot B \cdot f_t \cdot \sum_{i=1}^n e_i\right)^2} \quad (9)$$

По полученным выражениям (9) для сравнения различных моделей асфальтоукладчиков выполнен расчет удельных и обобщенного показателей эффективности. Результаты расчета приведены в таблице 2.

Табл. 2. Результаты расчета показателей эффективности

| Модель асфальтоукладчика | B , м | G/N , т/кВт | P , м ² /ч | G_s/N_s , (т ч/м ²)/(кВт ч/м ²) | P_{NG} , т кВт ч ² /м ⁴ |
|------------------------------|---------|---------------|-------------------------|--|---|
| Титан-420 | 12,5 | 29,5/167 | 5513 | 0,0053/0,030 | $1,6 \cdot 10^{-4}$ |
| Титан-410 С | 12,0 | 22,3/88 | 7409 | 0,0030/0,0119 | $3,6 \cdot 10^{-5}$ |
| ДР-150 С | 12,5 | 23,5/165 | 5625 | 0,0042/0,0293 | $1,2 \cdot 10^{-4}$ |
| Супер-2000 | 12,5 | 25,0/150 | 10773 | 0,0023/0,0140 | $3,2 \cdot 10^{-5}$ |
| Титан-280 | 7,5 | 15,1/65 | 3308 | 0,0046/0,020 | $9,2 \cdot 10^{-5}$ |
| ДР-120 S | 8,5 | 19,7/82 | 4131 | 0,0048/0,020 | $9,6 \cdot 10^{-5}$ |
| Супер-1700 | 8,5 | 18,0/94 | 6120 | 0,003/0,015 | $4,5 \cdot 10^{-5}$ |
| 11011 К | 7,0 | 15,5/54 | 2520 | 0,006/0,021 | $1,2 \cdot 10^{-4}$ |
| ДС-179, один трамбуемый брус | 7,0 | 18,0/77 | 3402 | 0,0053/0,023 | $1,2 \cdot 10^{-4}$ |
| ДС-179, два трамбуемых бруса | 7,0 | 18,0/77 | 5103 | 0,0035/0,015 | $5,2 \cdot 10^{-5}$ |

Таким образом, по результатам расчета показателей эффективности асфальтоукладчиков по техническим параметрам B, e, f_i можно сделать вывод, что среди рассмотренных моделей наибольшей эффективностью по G_s, N_s, P_{NG} обладают модели Супер-1700, ДС-179 с двумя брусью (ширина рабочего органа $5 \div 7$ м), и Титан-410 С, Супер-2000 (ширина рабочего органа $12 \div 12,5$ м). Из таблицы 2 видно, что для повышения эффективности отечественного асфальтоукладчика ДС-179 необходимо уменьшить металлоемкость и увеличить ход брусьев.

Однозначные оценки технического уровня асфальтоукладчиков целесообразно производить, используя методику [13] вычисления коэффициента технического уровня:

$$K_{t,l} = P_o / P_m,$$

где $K_{t,l} < 1$ – средний уровень; $K_{t,l} > 1$ – для лучших вариантов моделей асфальтоукладчиков; P_o – базовый (нормативный или средний) показатель; P_m – показатель эффективности.

Используя полученные зависимости, можно перейти к конкретным вычислениям, например, по обобщенным показателям:

$$K_{t,l} = \frac{G_o \cdot N_o \cdot \left(B_m \cdot f_{im} \cdot \sum_{i=1}^n e_{mi} \right)^2}{G_m \cdot N_m \cdot \left(B_o \cdot f_{io} \cdot \sum_{i=1}^n e_{oi} \right)^2}.$$

Показатели дают возможность производить оценку существующих и вновь создаваемых машин, но они не могут служить основой для расчета конкретных параметров e, f_i, N, G, V и др. Данные параметры асфальтоукладчиков должны рассчитываться по известным зависимостям и находиться в пределах определенных ограничений, обеспечивающих оптимальное качество работ (коэффициент уплотнения, ровность и т.д.) при строительстве асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог.

Выводы

На основе метода анализа размерностей предложен показатель $n_{t,e} = f_i \cdot e / V$ по величине хода трамбуемых брусьев рабочего органа асфальтоукладчика, который можно рекомендовать для использования при проектировании систем непрерывного неразрушающего контроля качества уплотнения и автоматического управления уплотнением дорожных материалов асфальтоукладчиками. Безразмерный комплекс может использоваться при создании интеллектуальной системы контроля и управления уплотнением дорожных материалов. В результате преобразований получены выражения удельных и обобщенного показателей для оценки эффективности асфальтоукладчиков.

Получена формула для оценки технического уровня асфальтоукладчиков по коэффициенту технического уровня, что полезно на этапах создания новых моделей, модернизированных вариантов, а также для обоснования решения на приобретение моделей асфальтоукладчиков.

Список литературы

1. Пермяков В.Б., Захаренко А.В. Обоснование значений контактного давления при уплотнении асфальтобетонных смесей // Строительные и дорожные машины. – 1989. – № 5. – С. 12-13.
2. Böhmer P. Untersuchungen über die Verdichtung – Wirkung von Schwarzdeckenfertigm Baumaschine und Bautechnik. 1974, no. 7-8, pp. 233-238.
3. Prang R Hochverdichtungsbonle der ABG Die Asphaltstrasse. 1989, no 8, pp. 22-26.
4. Jian S., Guiyun X. Dynamics Modeling and Analysis of Paver Screed Based on Computer Simulation // Appl. Sci. 2013, no. 13, pp. 1059-1065.
5. Кизряков А.Н., Кабанов В.В., Фруктов П.А. Определение параметров виброуплотняющих органов асфальтоукладчиков // Повышение эффективности ударных машин: Труды ВНИИстройдормаш. – 1986. – Вып. 107. – С. 63-68.
6. Богуславский А.М. Дорожные асфальтобетонные покрытия. – М.: Высшая школа, 1965. – 115 с.

7. Прокопьев А.П., Емельянов Р.Т., Янаев А.С., Турышева Е.С., Потапов А.Е. Полевое исследование процесса укладки асфальтобетонной смеси с компонентами автоматизации технологии неразрушающего контроля уплотнения // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 2. – С. 292-299. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7465.
8. 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. – №1. – С. 131. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4845.
9. 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. – С. 109. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5470.
10. Баловнев В.И., Ермилов А.Б., Новиков А.Н. Дорожно-строительные машины и комплексы. – М.: Машиностроение, 1988. – 384 с.
11. Кустарев Г.В., Павлов С.А., Ушков А.В. Высокоэффективные комплексы для скоростного строительства асфальтобетонных покрытий: монография. – М.: МАДИ, 2019. – 140 с.
12. Schenck H.Jr. Theories of engineering experimentation. – McGraw-Hill Book Company, New York, 1979. – 239 p
13. Баловнев В.И. Подобие и моделирование в системе проектирования дорожно-строительных машин. – М.: МАДИ, 2014. – 148 с.

References

1. Permyakov V.B., Zakharenko A.V. Justification of the Values of Contact Pressure in the Compaction of Asphalt Concrete Mixtures // Construction and road vehicles. 1989, no. 5, pp. 12-13.
2. Böhmer P. Untersuchungen über die Verdichtung – Wirkung von Schwarzdeckenfertigmern Baumaschine und Bautechnik. 1974, no. 7-8, pp. 233-238.
3. Prang R Hochverdichtungsbonle der ABG Die Asphaltstrasse. 1989, no 8, pp. 22-26.
4. Jian S., Guiyun X. Dynamics Modeling and Analysis of Paver Screed Based on Computer Simulation // Appl. Sci. 2013, no. 13, pp. 1059-1065.
5. Kizrazakov A.N., Kabanov V.V., Fruktov P.A. Determination of the parameters of vibro-compaction organs of asphalt pavers // Improving the efficiency of impact machines: Proceedings of VNIIsroydormash. 1986, vol. 107, pp. 63-68.
6. Boguslavskiy A.M. Road asphalt concrete pavements. – М.: Higher School, 1965. – 115 p.
7. Prokopev A.P., Emelyanov R.T., Yanaev A.S., Turysheva E.S., Potapov A.E. Field Study of the Process of Laying Asphalt Concrete Mixture with Automation Components of Non-Destructive Compaction Testing Technology // Engineering Bulletin of the Don. 2022, no. 2, pp. 292-299. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7465.
8. Yavorskiy O.V., Chernov S.A., Shiryaev N.I. Assessment of the quality of production of work on the arrangement of the upper layers of automobile road pavement by a non-destructive method // Engineering Bulletin of the Don. 2018, no. 1, p. 131. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4845.
9. Novoselova I.V., Denisenko Yu.S., Gagieva Z.I., Pityk A.N. Application of non-destructive control methods in the inspection of buildings within the framework of construction and technical expertise // Engineering Bulletin of the Don. 2019, no. 1, p. 109 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5470.
10. Balovnev V.I., Ermilov A.B., Novikov A.N. Road-building machines and complexes. – М.: Mechanical Engineering, 1988. – 384 p.
11. Kustarev G.V., Pavlov S.A., Ushkov A.V. Highly Effective Complexes for Speed Construction of Asphalt Concrete Pavements: Monograph. – М.: MADI, 2019. – 140 p.
12. Schenck H.Jr. Theories of engineering experimentation. – McGraw-Hill Book Company, New York, 1979. – 239 p
13. Balovnev V.I. Similarity and Modeling in the System of Designing Road-Building Machines. – М.: MADI, 2014. – 148 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

| | |
|---|--|
| Емельянов Рюрик Тимофеевич – доктор технических наук, профессор | Emelyanov Rurik Timofeevich – doctor of technical sciences, professor |
| Прокопьев Андрей Петрович – кандидат технических наук, доцент | Prokopev Andrey Petrovich – candidate of technical sciences, associate professor |
| Авласевич Александр Иванович – кандидат технических наук, доцент | Avlasevich Alexander Ivanovich – candidate of technical sciences, associate professor |
| Кравцов Константин Сергеевич – аспирант | Kravtsov Konstantin Sergeevich – postgraduate student |
| Некрасов Илья Олегович – аспирант | Nekrasov Ilya Olegovich – postgraduate student |
| ert-44@yandex.ru | |

Получена 11.10.2023