



Статистический анализ оценки прочности нежѐстких дорожных одежд



Артѐм ТИРАТУРЯН
Artem N. TIRATURYAN

Евгения УГЛОВА
Evgenia V. UGLOVA



Statistical Analysis of Strength Assessment of Nonrigid Pavement Surfacing

(текст статьи на англ. яз. – English text of the
article – p. 94)

Авторы рассматривают вопросы, связанные со статистической обработкой результатов измерения упругих прогибов на поверхности нежѐстких дорожных одежд, сделанного с помощью установки ударного нагружения FWD. На основе полученных данных уточнен характер распределения упругих прогибов и осуществлена оценка их однородности для дорожных одежд на участках с различными сроками службы. При этом установлено, что с достаточной долей вероятности распределение таких прогибов может быть описано логнормальным законом.

Ключевые слова: автомобиль, нежѐсткая дорожная одежда, упругий прогиб, модуль упругости, установка ударного нагружения, коэффициент вариации, логнормальное распределение.

Тиратурян Артѐм Николаевич – кандидат технических наук, старший преподаватель Ростовского государственного строительного университета (РГСУ), Ростов-на-Дону, Россия. Углова Евгения Владимировна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Автомобильные дороги» РГСУ, Ростов-на-Дону, Россия.

Фундамент долговременной прочности нежѐсткой дорожной одежды закладывается на стадии ее проектирования. Конструируя дорожную одежду и определяя основные механические параметры отдельных её слоѐв, проектировщик осуществляет расчёт по трем критериям: расчёт конструкции в целом на допустимый упругий прогиб, расчёт конструкции на сопротивление монолитных слоѐв усталостному разрушению от растяжения при изгибе, расчёт по условию сдвигоустойчивости подстилающего грунта и малосвязных конструктивных слоѐв. При этом единственным параметром, который возможно отслеживать на стадии эксплуатации, становится упругий прогиб на поверхности дорожной одежды. И только затем второй – рассчитываемый на его основе общий модуль её упругости, который можно оценить с использованием оборудования статического и динамического нагружения.

МЕХАНИЗМ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ

Следует отметить, что значение общего модуля упругости дорожной одежды (а соот-

ветственно и упругого прогиба) в предполагаемой конструкции, закладываемое на стадии проектирования, является детерминированным, в то время как в реальных условиях эксплуатации на его величину влияние оказывает значительное количество различных факторов вероятностной природы, связанных с технологическим процессами строительства, общими механизмами деградации несущей способности дорожной одежды, климатическими условиями и т.д. А уточнить реальные вероятностные характеристики распределения упругого прогиба (а с ним и общего модуля упругости дорожной одежды) дает лишь проведение масштабных измерений на участках эксплуатируемых автомобильных дорог.

Решение данной задачи требует применения высокопроизводительного оборудования для оценки прочности нежестких дорожных конструкций. В качестве такого оборудования представляется возможным применение установки ударного нагружения FWD Primag 1500, представляющей собой двухосный полуприцеп со смонтированным на нем механизмом ударного нагружения и балкой с датчиками-геофонами для регистрации чаши прогиба на поверхности дорожной одежды. Механизм ударного нагружения позволяет прикладывать к поверхности покрытия нагрузку в диапазоне 20–110 кН при времени воздействия $t = 0,03$ с. В практике использования подобной установки на дорогах Российской Федерации испытания проводятся при нагрузке 50 кН. Производительность FWD Primag достигает 40 км/смену при измерениях с шагом в 100 м, что предполагает получать большие массивы данных о значениях упругого прогиба и общего модуля упругости дорожной одежды на протяженных участках автомобильных дорог [1–5].

Наличие такой информации, безусловно, требует ее обработки и анализа в первую очередь на основе статистических методов. Вопросы применения методов математической статистики в задачах изучения однородности и надежности автомобильных дорог исследуются в работах В. А. Семенова, И. А. Золотаря, В. В. Столярова, Н. Е. Кокодовой [6–10] и других авторов. В частности, эти исследования касаются характера распределения таких параметров дорожной одежды, как упругие

деформации, ровность (просвет под трехметровой рейкой), толщина слоев асфальтобетона, толщина слоя щебня. Полученные в ходе анализа результаты позволили установить, что при достаточно высокой однородности (т.е. при коэффициенте вариации $C_v < 20\%$) закономерности распределения рассматриваемых параметров не противоречат закону нормального распределения, а при более высокой неоднородности (коэффициенте вариации $C_v > 0,2$) распределение исследуемых параметров может быть описано законом Вейбулла и экспоненциальным законом [6].

Результаты исследований, приведенные в нашей статье, акцентируются прежде всего на оценке деформативных характеристик дорожной одежды и направлены на уточнение реальных параметров распределения упругих прогибов поверхности современных жестких дорожных покрытий. Делается это на основе натурных измерений, которые осуществлялись с помощью установки ударного нагружения FWD.

СТАТИСТИКА И ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

В течение 2015 года осуществлялась оценка прочности жестких дорожных одежд на участках автомобильных дорог М-4 «Дон» и М-1 «Беларусь». Обследуемые участки разбивались на три группы в зависимости от срока их эксплуатации. К I-й группе относились участки автомобильных дорог со сроком эксплуатации до 5 лет (четыре участка), ко II-й – со сроком 5–10 лет (четыре участка), к III-й группе – участки, находящиеся в эксплуатации более 10 лет (восемь участков).

С использованием установки FWD была произведена регистрация упругого прогиба покрытия дорожной одежды, после чего сделан расчет общего модуля упругости. Измерения проводились с шагом 100 метров на участках дорог с одинаковыми конструкциями дорожных одежд. При этом они осуществлялись в течение весеннего и осеннего периодов года.

Всего на участках I-й группы было зарегистрировано 1242 значения упругого прогиба, II и III групп соответственно 328 и 1346 значений. Для каждой выборки приведена описательная статистика в таблице 1.



Таблица 1

Основные статистические параметры результатов измерения упругого прогиба нежѣсткой дорожной одежды по группам участков

Группа участков	Объѣм выборки (количество измерений), N	Среднее значение динамического упругого прогиба, мм	Стандартное отклонение, s	Коэффициент вариации – C _v , %
I группа	1242	0.18	0.04	20
II группа	328	0.26	0.08	28
III группа	1346	0.36	0.14	39

Таблица 2

Оценка соответствия фактического закона распределения упругих прогибов нежѣсткой дорожной одежды логнормальному закону

Участок	Число измерений	Характер распределения	S _Ω	p-value	S _Ω	p-value	χ ² _n	p-value
I группа								
414+700–464+300	397	Логнорм.	0.03	0.78	0.49	0.75	20	0.20
599+000–633+000	243	Логнорм.	0.04	0.74	0.36	0.89	6.46	0.60
907+000–913+000	198	Логнорм.	0.043	0.82	0.46	0.78	12.72	0.62
1207+000–1240+000	404	Логнорм.	0.031	0.82	0.23	0.97	9.9	0.35
II группа								
287+200–296+500	60	Логнорм.	0.057	0.98	0.19	0.99	4.07	0.66
401+000–414+700	102	Логнорм.	0.07	0.65	0.54	0.70	8.93	0.26
1119+500–1134+500	104	Логнорм.	0.071	0.65	0.48	0.76	10.92	0.090
1134+500–1138+500	62	Логнорм.	0.07	0.90	0.35	0.89	6.12	0.632
III группа								
1341+000–1351+000	82	Логнорм.	0.06	0.86	0.30	0.94	5.19	0.88
1537+000–1542+000	64	Логнорм.	0.036	0.99	0.13	0.99	2.25	0.94
299+000–308+000	184	Логнорм.	0.045	0.84	0.55	0.69	4.41	0.62
355+000–384+000	260	Логнорм.	0.044	0.70	0.62	0.63	5.6	0.35
460+000–463+000	62	Логнорм.	0.095	0.59	0.79	0.48	11.16	0.083
242+000–253+000	128	Логнорм.	0.053	0.85	0.28	0.94	7.0	0.95
315+000–325+300	162	Логнорм.	0.039	0.95	0.33	0.91	4.88	0.30
382–392	404	Логнорм.	0.036	0.65	0.45	0.80	14.69	0.32

На каждом отдельном участке осуществлялся анализ характера распределения упругих прогибов покрытия нежѣсткой дорожной одежды в соответствии с критериями хи-квадрат Пирсона (1), Колмогорова–Смирнова (2) и Андерсона–Дарлинг-га (3).

$$\chi_n^2 = n \sum_{i=1}^k \frac{(n_i / n - P_i(\theta))^2}{P_i(\theta)}, \quad (1)$$

где n – количество измерений; P_i(θ) – вероятность попадания измерения в интервал.

$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F(x)|, \quad (2)$$

где Sup S – точная верхняя грань множества S = |F_n(x) – F(x)|; F – предполагаемая модель.

$$S_{\Omega} = -n - 2 \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{2i-1}{2n} \ln(F(x_i, \theta)) + \left(1 - \frac{2i-1}{2n} \right) \ln(1 - F(x_i, \theta)) \right\}, \quad (3)$$

где F(x_p, θ) – теоретическое распределение исследуемой величины; n – объѣм выборки; x₁, x₂, ..., x_n – упорядоченные по возрастанию элементы выборки.

Анализ фактического распределения упругих прогибов осуществлялся на предмет соответствия его нормальному, логнормальному, экспоненциальному закону распределения и закону распределения Вейбулла. Для сравнения в таблицах 2 и 3 (на примере логнормального и нормального распределений (как наилучшим образом описывающих фактическое рас-

Таблица 3

Оценка соответствия фактического закона распределения упругих прогибов нежѣсткой дорожной одежды нормальному закону

Участок	Число измерений	Характер распределения	S_{Ω}	p-value	S_{Ω}	p-value	χ^2_n	p-value
I группа								
414+700–464+300	397	Норм.	0.081	0.00	4.54	0.004	57.70	0.001
599+000–633+000	243	Норм.	0.077	0.105	2.02	0.088	12.53	0.128
907+000–913+000	198	Норм.	0.087	0.092	1.89	0.104	23.27	0.078
1207+000–1240+000	404	Норм.	0.047	0.316	0.97	0.372	10.41	0.317
II группа								
287+200–296+500	60	Норм.	0.07	0.86	0.37	0.87	4.70	0.58
401+000–414+700	102	Норм.	0.05	0.92	0.30	0.93	10.17	0.17
1119+500–1134+500	104	Норм.	0.10	0.21	1.50	0.17	10.05	0.12
1134+500–1138+500	62	Норм.	0.09	0.65	0.56	0.68	13.22	0.10
III группа								
1341+000–1351+000	82	Норм.	0.11	0.24	1.21	0.26	0.10	0.39
1537+000–1542+000	64	Норм.	0.10	0.48	0.93	0.39	3.81	0.80
299+000–308+000 (а.н.)	184	Норм.	0.06	0.41	1.07	0.31	8.22	0.22
355+000–384+000 (а.н.)	260	Норм.	0.11	0.01	6.41	0.06	38.15	0.00
460+000–463+000 (а.н.)	62	Норм.	0.14	0.15	2.26	0.06	19.00	0.01
242+000–253+000	128	Норм.	0.16	0.00	22.77	0.00	183.4	0.00
315+000–325+300	162	Норм.	0.16	0.00	17.72	0.00	178.2	0.00
382–392	404	Норм.	0.09	0.02	5.04	0.02	49.30	0.00

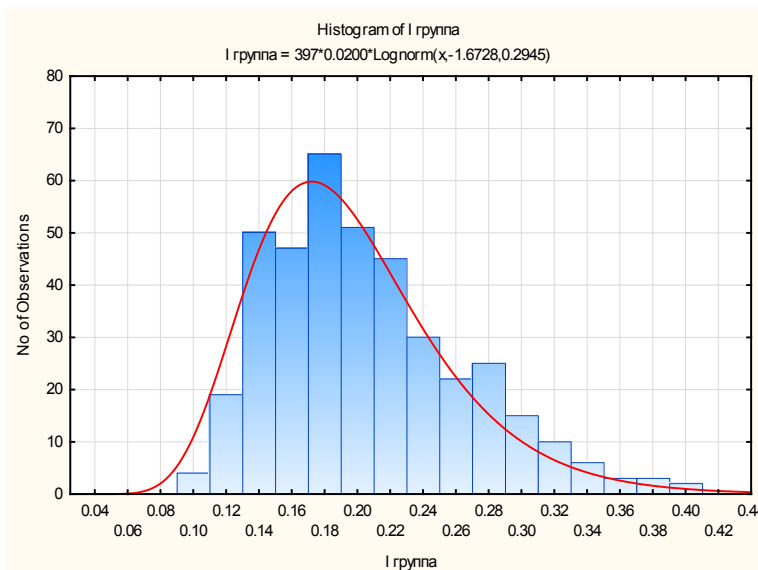


Рис. 1. Распределение динамических упругих прогибов на участке I группы (км 414+700–464+300).

пределение) приведены результаты оценки статистик по каждому из критериев соответствия и их уровней надежности (p-value), характеризующих вероятность ошибки в случае отклонения гипотезы о законе распределения (ошибки первого рода).

Сопоставление значений статистик и уровней надежности, рассчитанных по каждому из критериев, позволяет сделать вывод, что логнормальный закон достаточно адекватно описывает распределение упругих прогибов, а соответственно и общих модулей упругости дорожной кон-



Таблица 4

Средние значения параметров логнормального распределения для различных групп участков

Группы обследов. участков	I группа (со сроком службы менее 5 лет)	II группа (со сроком службы 5–10 лет)	III группа (со сроком службы более 10 лет)
Статистический параметр			
m	–1.72	–1.01	– 0.94
σ	0.22	0.24	0.36

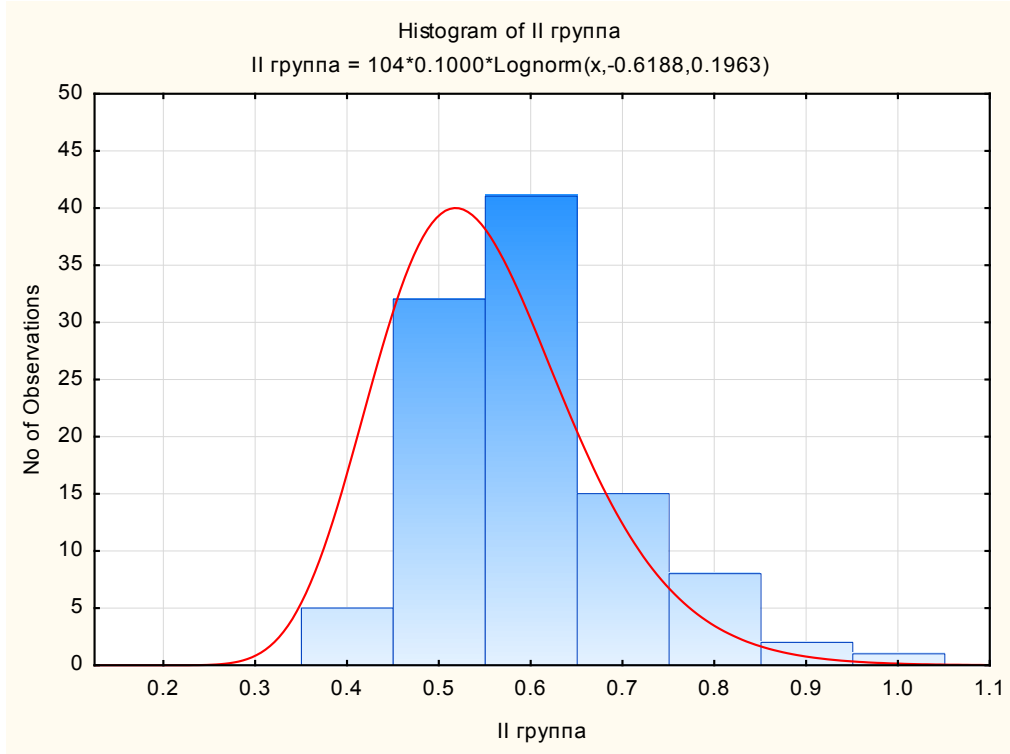


Рис. 2. Распределение динамических упругих прогибов на участке II группы (км1119+500–1138+000).

струкции на различных этапах ее эксплуатации. Примеры полученных результатов показаны на рис. 1–3.

Как известно, плотность логарифмически нормального распределения описывается законом:

$$f(t)=\frac{1}{\sigma t\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(\ln t-m)^2}{2\sigma^2}},$$

где m и σ – параметры логнормального распределения, называемые параметрами масштаба и формы распределения.

Средние значения параметров, позволяющих описать распределение упругих прогибов нежёсткой дорожной одежды на разных этапах ее эксплуатации, были рассчитаны на основе результатов натурных

исследований для каждой из групп участков (таблица 4).

Используя данные параметры, возможным представляется описать характер распределения упругих прогибов на поверхности дорожной конструкции на различных этапах ее эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение установки ударного нагружения FWD на участках автомобильных дорог с различным сроком службы позволяет:

- 1. Оценить фактическую однородность значений упругих прогибов на поверхности дорожной одежды для участков с различным сроком службы. Так, для участков I-й

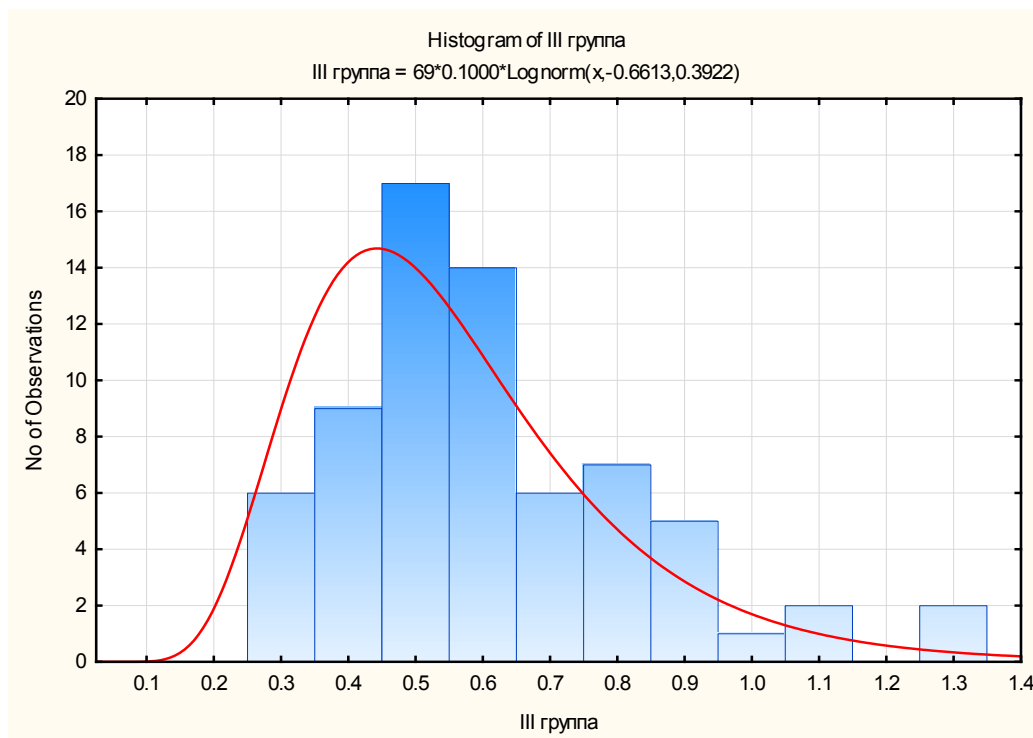


Рис. 3. Распределение динамических упругих прогибов на участке III группы (км 1341+000–1351+000).

группы коэффициент вариации составил 28%, II и III групп – 36% и 58%.

2. Уточнить характер распределения фактических упругих прогибов на поверхности нежесткой дорожной конструкции для участков автомобильных дорог с различным сроком службы. Как показали результаты обработки измеренных значений упругих прогибов, с достаточной долей вероятности их распределение может быть описано логнормальным законом.

3. Установить средние параметры плотности логнормального распределения, позволяющие описать характер распределения упругого прогиба на поверхности дорожной одежды для участков автомобильных дорог с учётом срока эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Henderson G Long term pavement performance program manual for Falling Weight Deflectometer Measurements. Washington: Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2006. 98 p.
2. Kwasi Appea A Validation of FWD Testing Results at the Virginia Smart Road: Theoretically and by Instrument Responses. Blacksburg: Department of

Transportation, Federal Highway Administration, 2007. 130 p.

3. Углова Е. В., Тиратурян А. Н. Исследование однородности и прочности нежесткой дорожной конструкции с использованием установки динамического нагружения FWD // Дороги и мосты. – 2015. – № 33. – С. 163–173.

4. Углова Е. В., Тиратурян А. Н. Оценка прочности нежестких дорожных одежд // Дорожная держава. – 2014. – № 57. – С. 42–45.

5. Углова Е. В., Саенко С. С., Тиратурян А. Н. Эталонный участок // Автомобильные дороги. – 2014. – № 11. – С. 27–30.

6. Семенов В. А. Качество и однородность автомобильных дорог. – М.: Транспорт, 1989. – 122 с.

7. Золотарь И. А. Повышение надёжности автомобильных дорог. – М.: Транспорт, 1977. – 102 с.

8. Столяров В. В., Зверкова Е. Е., Фомина А. С. Оценка надёжности нежестких дорожных одежд на основе законов распределения общих модулей упругости // Дороги и мосты. – 2014. – № 30. – С. 153–174.

9. Кокодеева Н. Е. Методологические основы комплексной оценки надёжности автомобильных дорог в системе технического регулирования дорожного хозяйства / Автореф. дис ... док. техн. наук. – Саратов, 2011. – 339 с.

10. Кокодеева Н. Е. Определение срока службы дорожной одежды и темпов ее разрушения с учётом изменения влажности грунта в расчётный период года (с позиции теории риска) // Известия ОрелГТУ: Строительство и реконструкция. – 2009. – № 6/26. – С. 86–93.

Координаты авторов: Тиратурян А. Н. – Tiraturjan@list.ru, Углова Е. В. – Uglova.ev@ya.ru.

Статья поступила в редакцию 18.02.2016, принята к публикации 25.05.2016.

