

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 4. С. 211–225.

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (4): 211–225.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.7/8

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-211-225

EDN: FКОННУ

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ФАКТОРОВ НА ПАРАМЕТРЫ ЧАШИ ПРОГИБА НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД НА ОСНОВЕ ИСПЫТАНИЙ ПРОЧНОСТИ УСТАНОВКАМИ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

**Михаил Юрьевич Горский¹, Евгений Николаевич Симчук¹,
Георгий Фаррухович Кадыров¹, Алексей Евгеньевич Симчук²**

¹Научно-исследовательский институт
транспортно-строительного комплекса, г. Москва, Россия

²Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет, г. Москва, Россия

Аннотация. В статье приведены результаты исследования влияния температурных факторов на параметры чаши прогиба дорожной одежды при испытаниях по оценке прочности установками динамического нагружения.

Актуальность работы обусловлена высоким влиянием температуры асфальтобетона на результаты испытаний и необходимостью ее учета путем приведения получаемых при фактической температуре результатов к сопоставимому с проектными данными виду при выполнении диагностики эксплуатируемых автомобильных дорог.

Цель экспериментальных исследований – выявление температурных факторов, оказывающих наибольшее влияние на параметры чаши прогибов, и получение зависимостей прогибов от температуры на различных конструкциях дорожных одежд. Для проведения исследований использовалась установка динамического нагружения, имитирующая приложение нагрузки от движущегося грузового автомобиля, оборудованная измерителями прогиба, располагающимися в центре приложения нагрузки и на различном расстоянии от него. В рамках исследований совместно с измерениями прогибов определялась температура воздуха, дорожного покрытия и асфальтобетона на различной глубине, строились зависимости указанных параметров.

В результате проведения исследований удалось выявить факторы, оказывающие наибольшее влияние на параметры чаши прогибов. Достигнутые результаты позволяют приводить прогибы в сопоставимый с проектными значениями вид и в дальнейшем использовать их для определения общей несущей способности, а также оценивать состояние отдельных конструктивных слоев, тем самым повышая достоверность назначения ремонтных мероприятий.

Ключевые слова: дорожная одежда, несущая способность, прочность, динамическое нагружение, чаша прогиба, температура, асфальтобетон, модуль упругости

Для цитирования: Горский М.Ю., Симчук Е.Н., Кадыров Г.Ф., Симчук А.Е. Оценка влияния температурных факторов на параметры чаши прогиба нежест-

ких дорожных одежд на основе испытаний прочности установками динамического нагружения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 211–225. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-211-225. EDN: FKOHHU

ORIGINAL ARTICLE

TEMPERATURE EFFECT ON FLEXURAL BOWL DETERMINED BY FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER TESTING

Mikhail Y. Gorskii¹, Evgenii N. Simchuk¹,
Georgii F. Kadyrov¹, Aleksei E. Simchuk²

¹Research Institute of Transportation and Construction Complex,
Moscow, Russia

²Moscow Automobile and Road Construction State Technical University,
Moscow, Russia

Abstract. The article presents the research results of the temperature influence on the flexural bowl on the road surface determined by falling weight deflectometer testing. The work relevance is conditioned by the high temperature effect of asphalt concrete on test results and the need to take it into account by bringing the results obtained at the actual temperature to a comparable form with the design data, when performing diagnostics of operating highways.

Experiments identify the temperature factors that have an impact on the flexural bowl parameters. Temperature dependences are suggested for the flexural bowl on different road surfaces. A falling weight deflectometer is used to simulate the load produced by a moving truck, equipped with deflection meters located at the load center and various distances from it. Together with flexure bowl measurements, the temperatures of air, pavement and asphalt concrete at various depth is determined and dependences of these parameters are plotted.

The paper identifies factors that have the greatest influence on the flexural bowl parameters. The results make it possible to bring flexural bowls into a form comparable with design values and subsequently use them to determine the overall bearing capacity of the pavement as well as to assess the condition of individual structural layers, thereby increasing the reliability of repair measures.

Keywords: pavement, bearing capacity, strength, dynamic loading, flexural bowl, temperature, asphalt concrete, elastic modulus

For citation: Gorskii M.Yu., Simchuk E.N., Kadyrov G.F., Simchuk A.E. Temperature effect on flexural bowl determined by falling weight deflectometer testing. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (4): 211–225. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-211-225. EDN: FKOHHU

Введение

Одним из основных показателей состояния дорожной одежды является несущая способность. В связи с этим ее обеспечению и контролю уделяется значительное внимание при проектировании, строительстве и эксплуатации автомобильных дорог.

Оценка прочности, т. е. сопоставление фактической несущей способности с требуемым значением, в РФ ранее регламентировалась различными нормативно-техническими документами, в частности ОДН 218.052, ОДМ 218.4.039-2018

и ОДМ 218.2.024-2012. До недавнего времени данный вид диагностики сводился к двум основным методикам:

- к визуальной оценке состояния дорожного покрытия с расчетом вероятного значения коэффициента прочности в зависимости от средневзвешенного балла, вычисляемого по наиболее часто встречающимся видам дефектов;
- к инструментальной оценке, выполняемой установками статического и динамического нагружения, позволяющими оценить прогиб в центре приложения расчетной нагрузки и вычислить фактический модуль упругости, который впоследствии сопоставляется с требуемым значением.

Визуальная оценка не позволяет в полной мере определить состояние дорожной одежды и выявить причины его ухудшения. При этом мероприятия, связанные с заменой верхнего слоя, как наиболее часто встречающийся вид работ, в значительной мере искажают результаты визуальной оценки прочности и приводят к ошибкам при планировании стратегии ремонтных мероприятий для обеспечения требуемых сроков службы.

Инструментальные методы, применяемые ранее, основывались только на определении общей несущей способности и не позволяли оценить состояние отдельных конструктивных слоев. С введением в действие ГОСТ 32729 и ГОСТ Р 59918 в нашей стране, как и во многих ведущих зарубежных странах, прочность дорожных одежд в целом и отдельных конструктивных слоев стала оцениваться комплексно по результатам испытаний установками динамического нагружения (Falling Weight Deflectometer, далее – FWD), исходя из значений прогибов на различном расстоянии от центра приложения нагрузки.

Исследования в данном направлении в последнее десятилетие велись достаточно активно, что позволило разработать и апробировать программные комплексы [1, 2, 3, 4, 5, 6, 10] и методики [7, 8], посвященные расчету фактических модулей упругости отдельных конструктивных слоев на стадии эксплуатации [1, 9, 11]. Подробные характеристики слоев в большинстве случаев необходимы для назначения оптимальных ремонтных мероприятий.

В зарубежной практике исследованиям вопросов определения модулей упругости отдельных конструктивных слоев и временной и частотной корректировки также уделяется значительное внимание [12, 13, 14, 15].

Исходя из действующей методики проектирования нежестких дорожных одежд [16], расчет по критерию упругого прогиба выполняется при температуре слоев из асфальтобетона, составляющей 10 °С. Следовательно, для сопоставления фактических и проектных параметров несущей способности конструкции результаты испытаний по оценке прочности, полученные при различных температурах, необходимо приводить к указанной расчетной температуре.

Основными исходными данными для расчета модулей упругости материалов слоев являются: параметры чаши прогиба, толщины конструктивных слоев и параметры динамического воздействия (фактическая нагрузка, площадь нагрузочной плиты, время импульса).

В свою очередь, прогибы зависят от целого ряда факторов, к основным из которых относятся:

- температурные факторы;
- конструкция дорожной одежды;

- параметры динамического воздействия;
- состояние грунтов земляного полотна.

Опыт выполнения испытаний показывает, что на результаты оценки прочности также могут влиять дополнительные факторы, общий вклад которых определить достаточно сложно. К таким факторам можно отнести:

- наличие дефектов (прежде всего трещин) в слоях из материалов, содержащих вяжущее;
- фактический срок службы в момент испытаний нагружением (включая количество приложений нормативной осевой нагрузки);
- точность и правильность выполнения методики испытаний;
- техническое состояние измерительных установок;
- функциональные возможности используемого программного обеспечения для выполнения аналитических задач и расчетов.

Как было определено в выполняемых исследованиях, одним из наиболее значимых является температурный фактор. Ранее в нормативно-технических документах и исследованиях данному фактору уделялось незначительное внимание. Измерения температуры слоев асфальтобетона практически не выполнялись ввиду их относительной длительности и сложности по сравнению с фиксацией температуры воздуха или поверхности.

Целями выполненных экспериментальных исследований, которые легли в основу данной статьи, стали:

- выявление наиболее значимых температурных параметров для дальнейшего учета при разработке методики корректировки погибов;
- оценка влияния температурных факторов на чаши прогибов и общий модуль упругости;
- определение зависимостей температуры и прогибов различных дорожных конструкций.

Методы

Исследование влияния температуры на прогибы дорожной конструкции выполнялось с использованием установки динамического нагружения производства Dynatest (Дания), соответствующей требованиям ГОСТ 32729.

Принцип действия установок данного типа заключается в создании кратковременной нагрузки с заданными параметрами на поверхности покрытия путем сброса груза определенной массы с различной высоты на систему демпферов, передающих импульс на нагрузочную плиту, имитирующую колесо грузового автомобиля. По результатам испытания фиксируется прогиб в центре приложения нагрузки и на различном расстоянии от него. В рамках исследований на применяемой установке прогиб фиксировался 9 датчиками: в центре нагружения и на расстоянии 200, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500, 1800 мм.

Установка Dynatest (рис. 1) является одним из наиболее распространенных в мире приборов для оценки прочности динамическим нагружением и имеет следующие основные метрологические характеристики:

- диаметр четырехсегментной нагрузочной плиты – 300 мм;
- диапазон создаваемых нагрузок – от 7 до 120 кН;
- датчик измерения прогиба – геофон в количестве 9 шт.;

- длительность импульса нагружения – от 0,025 до 0,030 с;
- погрешность измерений прогиба – не более 2 %;
- производительность – до 60 измерений в час.



Рис. 1. Установка FWD Dynatest 8000

Fig. 1. Dynatest 8000 FWD

В настоящее время в Российской Федерации также производятся и широко применяются установки динамического нагружения, по своим метрологическим характеристикам не уступающие зарубежным аналогам, например, система измерения прочности дорожных одежд «Дина-4».

Для измерения температуры воздуха и температуры поверхности покрытия применялись термометры, размещенные на установке динамического нагружения. Для измерения температуры слоев асфальтобетона на различной глубине применялся термометр Termex диапазоном измерения температуры от -30 до 150 °С с погрешностью $0,1$ °С. Измерения выполнялись в специально просверленных отверстиях в слое асфальтобетона, заполненных смесью воды и глицерина.

Измерение температуры слоев асфальтобетона на различной глубине представлено на рис. 2.

Объектами исследований являлись автомобильные дороги общего пользования различных технических категорий, подведомственные Федеральному дорожному агентству и Государственной компании «Автодор».

Для выполнения комплекса испытаний были выбраны следующие автомобильные дороги:

- 1) автомобильная дорога М-11 «Нева» (Москва – Санкт-Петербург) на участке км 58 – км 68 в Московской области, категория дороги IА;
- 2) автомобильная дорога А-130 в Калужской области, на км 143+600, категория дороги III;
- 3) автомобильная дорога А-108 на участке км 1+200 – км 9+000.

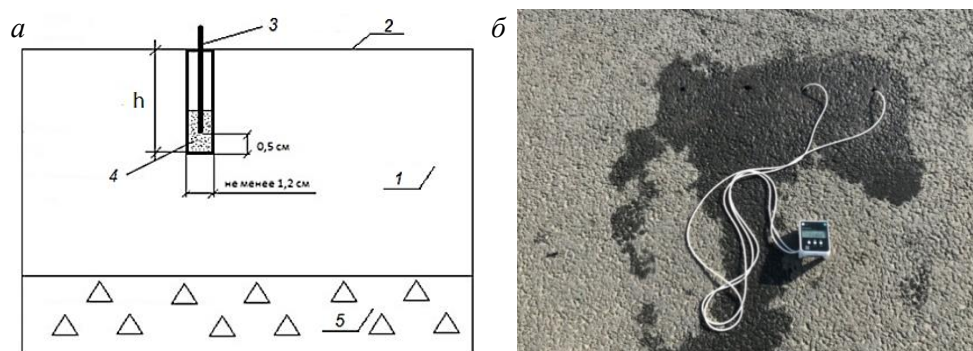


Рис. 2. Схема измерения температуры асфальтобетона (а) и измерения температуры на дороге (б):

1 – слой асфальтобетона; 2 – поверхность покрытия; 3 – термометр; 4 – смесь глицерина и воды; 5 – слой основания под асфальтобетоном

Fig. 2. Schematic of asphalt concrete (a) and road (b) temperature measurements:

1 – asphalt concrete layer; 2 – pavement surface; 3 – thermometer; 4 – glycerin and water mixture; 5 – subgrade

Конструкция дорожной одежды на участке автомобильной дороги М-11:

- щебеночно-мастичный асфальтобетон ЦМА-20 по ГОСТ 31015 – 6 см;
- горячий плотный крупнозернистый асфальтобетон тип Б по ГОСТ 9128 на БНД 60/90 по ГОСТ 22245 – 8 см;
- горячий пористый крупнозернистый асфальтобетон марки 1 по ГОСТ 9128 на БНД 60/90 по ГОСТ 22245 – 15 см;
- щебеночно-песчаная смесь С-4 по ГОСТ 25607 – 48 см;
- песок мелкий по ГОСТ 8236 – 60 см;
- рабочий слой грунта земляного полотна – песок пылеватый – 30 см.

Конструкция на участке автомобильной дороги А-108:

- щебеночно-мастичный асфальтобетон ЦМА-15 по ГОСТ 31015 на полимерно-битумном вяжущем ПБВ 60 по ГОСТ Р 52056 – 5 см;
- горячий плотный мелкозернистый асфальтобетон тип А марки 1 по ГОСТ 9128 на битуме БНД 60/90 по ГОСТ 22245 – 7 см;
- горячий пористый крупнозернистый асфальтобетон марки 2 по ГОСТ 9128 на битуме БНД 60/90 по ГОСТ 22245 – 8 см;
- оптимальная шлаковая смесь СШ-4-0-А по СТО «Автодор» 2.2 – 13 см;
- неоптимальная шлаковая смесь СШ-6-0-А по СТО «Автодор» 2.2 – 18 см;
- разделяющая прослойка из синтетического нетканого материала с прочностью на разрыв не менее 12 кН/м – без толщины;
- песок по ГОСТ 25100 – 40 см.

Конструкция на участке автомобильной дороги А-130:

- щебеночно-мастичный асфальтобетон ЦМА-15 на ПБВ 60 по ГОСТ Р 52056 – 5 см;
- горячий плотный асфальтобетон тип Б марки 1 по ГОСТ 9128 на БНД 60/90 по ГОСТ 22245 – 7 см;
- горячий пористый крупнозернистый асфальтобетон марки 1 по ГОСТ 9128 на БНД 60/90 по ГОСТ 22245 – 7 см;

- ЩПС С-5 по ГОСТ 25607 – 33 см;
- песок средней крупности по ГОСТ 8236 – 50 см;
- рабочий слой грунта земляного полотна – суглинок тяжелый пылеватый.

Конструкции исследуемых дорог имеют различную капитальность, представлены разными материалами конструктивных слоев и грунтами рабочего слоя. Толщины асфальтобетона варьируются от 19 до 29 см, несущих слоев основания – от 31 до 48 см.

Для оценки влияния температуры выполнялись испытания на одних и тех же участках автомобильных дорог в одних и тех же точках при различном сочетании температурных факторов. На каждой дороге выполнено от 19 до 21 серии испытаний при различных температурных условиях. Фиксировались следующие температуры:

- воздуха;
- покрытия;
- слоя асфальтобетона на глубине 2,5 см;
- слоя асфальтобетона 5 см;
- слоя асфальтобетона 15 см;
- слоя асфальтобетона на глубине 20 см (при наличии слоев такой толщины).

Испытания выполнялись в диапазоне температуры воздуха от 7,8 до 31,0 °С, температуры поверхности от 4,8 до 47,6 °С, температуры асфальтобетона на различной глубине 2,5 см от 6,0 до 49,0 °С.

При каждом измерении рассчитывался общий модуль упругости по значениям прогибов в центре приложения нагрузки по формуле

$$E = \frac{p \cdot D(1 - \mu^2)}{l}, \quad (1)$$

где p – удельная нагрузка на подошве штампа, МПа; D – диаметр штампа, мм; μ – коэффициент Пуассона, принимаемый равным 0,3; l – прогиб в центре приложения нагрузки, мм.

Результаты

По полученным экспериментальным данным были построены следующие зависимости для каждой автомобильной дороги:

- зависимость прогибов на всех датчиках и общего модуля упругости от температуры поверхности;
- зависимость прогибов на всех датчиках и общего модуля упругости от температуры воздуха;
- зависимость прогибов на всех датчиках и общего модуля упругости от температуры асфальтобетона на различной глубине.

На рис. 3 и 4 представлены зависимости общего модуля упругости на поверхности дороги от температуры на поверхности покрытия и температуры на глубине 5 см в слое асфальтобетона на исследуемых участках дорог.

По результатам анализа полученных зависимостей была составлена сводная таблица значений достоверности аппроксимации и тем самым выявлены температурные параметры, оказывающие наибольшее влияние на общий модуль упругости и чашу прогибов (табл. 1).

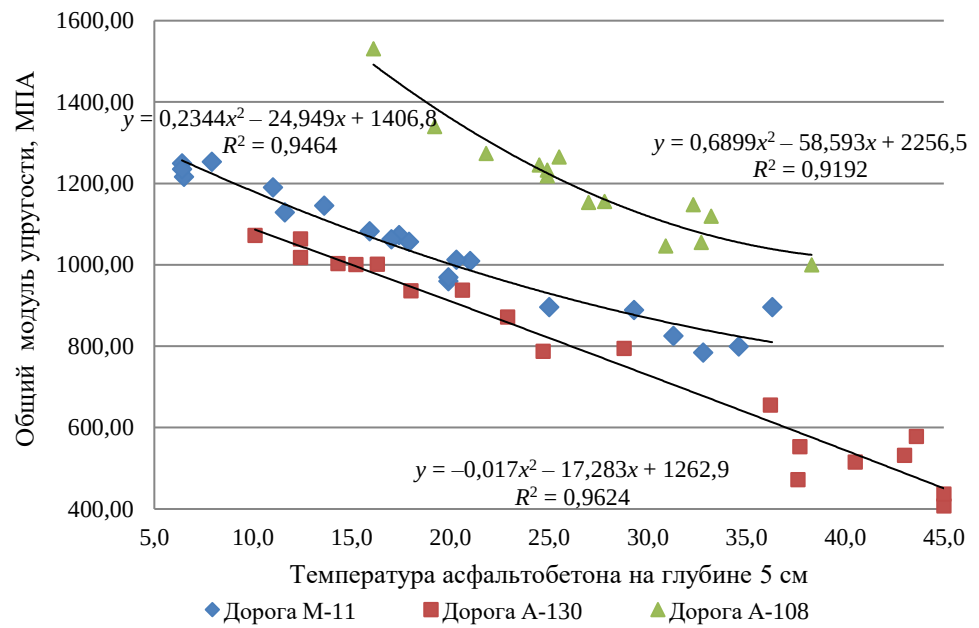


Рис. 3. Зависимость общего модуля упругости от температуры асфальтобетона на глубине 5 см
 Fig. 3. Elastic modulus vs. asphalt concrete temperature at 5 cm depth

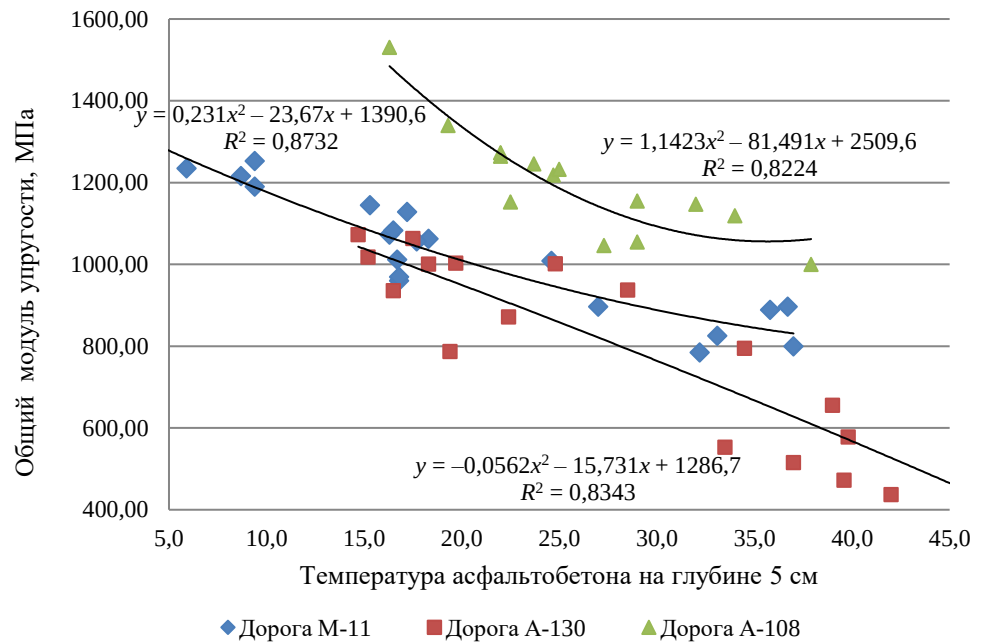


Рис. 4. Зависимость общего модуля упругости от температуры на поверхности покрытия
 Fig. 4. Elastic modulus vs. pavement temperature

Таблица 1

**Зависимость общего модуля упругости дорожной одежды,
определяемого по датчику перемещения
в центре приложения нагрузки, от температурных факторов**

Table 1

**Elastic modulus of pavement determined by displacement sensor
at the load center**

Дорога	Диапазон общего модуля упругости, МПа		Значение достоверности аппроксимации R^2					
	мин	макс	Воздух	Поверхность покрытия	2,5 см	5 см	10 см	15 см
М-11	785	1253	0,92	0,87	0,93	0,95	0,90	0,94
А-130	408	1018	0,69	0,83	0,94	0,96	0,96	0,92
А-108	1000	1530	0,53	0,82	0,83	0,92	0,97	0,95
Среднее значение	—	—	0,71	0,84	0,90	0,94	0,94	0,94

В рамках исследований были также определены зависимости прогибов на различном расстоянии от центра приложения нагрузки и температурных факторов. На примере автомобильной дороги М-11 на рис. 5 и 6 представлены зависимости прогибов в центре приложения нагрузки и прогибов на расстоянии 1200 мм от центра приложения нагрузки и температуры асфальтобетона на глубине 5 см.

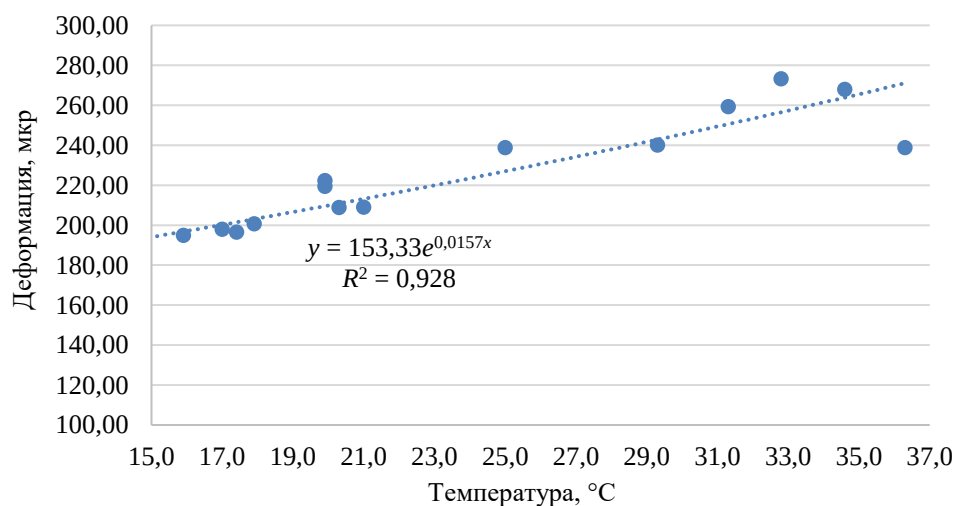


Рис. 5. Зависимость прогиба в центре приложения нагрузки и температуры асфальтобетона на глубине 5 см на автомобильной дороге М-11

Fig. 5. Temperature dependence of flexure at the load center at 5 cm depth on M-11 highway

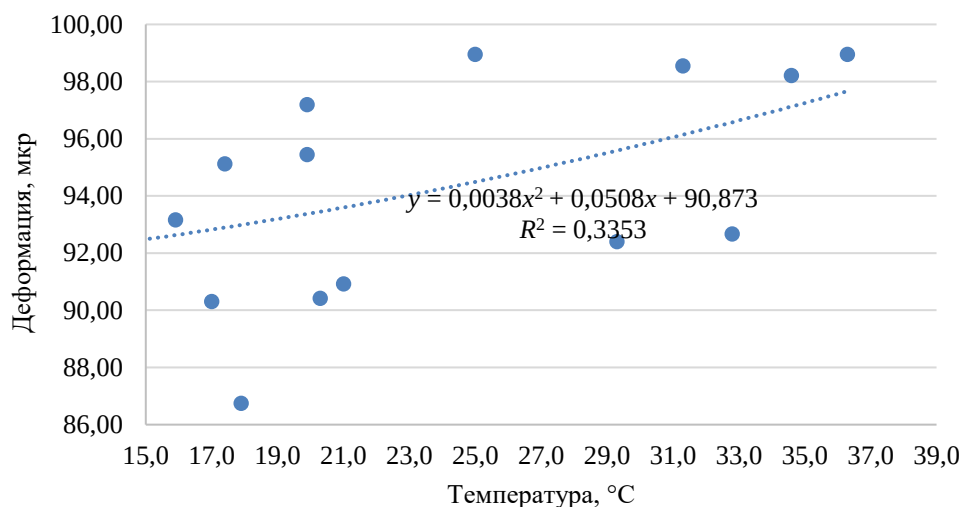


Рис. 6. Зависимость прогиба на расстоянии 1200 мм от центра приложения нагрузки и температуры асфальтобетона на глубине 5 см на автомобильной дороге М-11

Fig. 6. Temperature dependence of flexure at 1200 mm distance to load center at 5 cm depth on M-11 highway

По результатам анализа полученных зависимостей сделаны следующие выводы:

– значения общего модуля упругости, определяемого по датчику перемещения в центре приложения нагрузки, имеют достаточно высокую зависимость от измеренных температур, значение достоверности аппроксимации R^2 составляет от 0,69 до 0,96 (см. табл. 1);

– полученные высокие достоверности аппроксимации между прогибами и температурой слоев асфальтобетона позволяют сделать вывод, что температура асфальтобетона является основным влияющим фактором. Наиболее значимы температуры, измеренные на глубине асфальтобетона от 5 до 15 см. Было выявлено, что влияние температуры на значения прогибов по мере удаления от центра приложения нагрузки значительно снижается. Это подтверждает тот факт, что при выполнении «обратного расчета» [1, 2, 3, 4, 5] прогибы на расстоянии 0,45 м и более характеризуют состояние слоев основания, модули упругости которых не зависят от температуры. Осредненные значения достоверности аппроксимации R^2 составляют от 0,94 для датчиков прогиба в центре приложения нагрузки, до 0,02 для датчиков, расположенных на расстоянии более 1,5 м от точки приложения нагрузки;

– с учетом обеспечения минимальных временных затрат на выполнение замеров, а также единства подхода к исследованиям и сопоставимости получаемых результатов замеры температуры в дальнейших исследованиях и при разработке нормативно-технических документов целесообразно выполнять на глубине 5 см от поверхности покрытия.

С целью приведения экспериментальных чаш прогибов, замеренных при фактической температуре, к расчетной температуре 10 °C были использо-

ваны регрессионные зависимости, полученные в рамках выполненных исследований для различных автомобильных дорог. За основу были взяты регрессионные зависимости изменения прогибов от температуры, замеренной на глубине 5 см для каждого датчика измерения прогиба. Для определения коэффициентов зависимости изменения прогибов от температуры для трех участков автомобильных дорог была принята градация температур от 0 до 50 °С. Коэффициент пересчета для 10 °С равен 1, т. к. данная температура является расчетной.

Анализируя полученные зависимости, можно предположить, что эмпирические коэффициенты в регрессионных уравнениях определяются в том числе толщиной пакета асфальтобетонных слоев, имеющих наибольший модуль упругости среди материалов конструкции. Соответственно на следующем этапе исследований были построены регрессионные зависимости изменения данных эмпирических коэффициентов от фактических толщин пакета асфальтобетонных слоев (табл. 2).

Таблица 2

Эмпирические зависимости для приведения упругих прогибов, замеренных при фактических температурах, к расчетным при температуре 10 °С

Table 2

Empirical dependencies for reducing elastic flexure measured at actual temperatures to reference flexure at 10 °С

№ дат-чика	Расстояние от центра приложения нагрузки	Формула приведения прогибов к расчетной температуре 10 °С
1	0	$l_{T=10}^0 = l_{T_\Phi}^0 (-0,055 \ln(h) + 1,3563)2,72^{((0,004 \ln(h) - 0,0293)T_\Phi)}$
2	200	$l_{T=10}^{200} = l_{T_\Phi}^{200} (-0,043 \ln(h) + 1,2607)2,72^{((0,0045 \ln(h) - 0,0258)T_\Phi)}$
3	300	$l_{T=10}^{300} = l_{T_\Phi}^{300} (-0,031 \ln(h) + 1,2107)2,72^{((0,004 \ln(h) - 0,0233)T_\Phi)}$
4	450	$l_{T=10}^{450} = l_{T_\Phi}^{450} (-0,03 \ln(h) + 1,1856)2,72^{((0,0035 \ln(h) - 0,0198)T_\Phi)}$
5	600	$l_{T=10}^{600} = l_{T_\Phi}^{600} (-0,044 \ln(h) + 1,2111)2,72^{((0,004 \ln(h) - 0,0198)T_\Phi)}$
6	900	$l_{T=10}^{900} = l_{T_\Phi}^{900} (-0,07 \ln(h) + 1,2625)2,72^{((0,007 \ln(h) - 0,0261)T_\Phi)}$
7	1200	$l_{T=10}^{1200} = l_{T_\Phi}^{1200} (-0,083 \ln(h) + 1,2922)2,72^{((0,0076 \ln(h) - 0,0266)T_\Phi)}$
8	1500	$l_{T=10}^{1500} = l_{T_\Phi}^{1500} (-0,032 \ln(h) + 1,135)2,72^{((0,0031 \ln(h) - 0,013)T_\Phi)}$
9	1800	$l_{T=10}^{1800} = l_{T_\Phi}^{1800} (-0,009 \ln(h) + 1,0659)2,72^{((0,0009 \ln(h) - 0,0064)T_\Phi)}$

Примечание. Здесь $l_{T=10}$ – значение прогиба при расчетной температуре; h – толщина асфальтобетонных слоев, см; T_Φ – фактическая температура асфальтобетона, °С.

Анализ результатов, полученных с использованием представленных зависимостей, показал, что разница между значениями приведенных прогибов к расчетной температуре и фактических прогибов, замеренных при 10 °С, не превышает 5 %.

Предложенный алгоритм лег в основу ГОСТ Р 59918 с учетом ограничения максимальной температуры слоев асфальтобетона 30 °С. Это обусловлено возрастанием отклонений фактических результатов от полученных зависимостей по мере увеличения температуры асфальтобетона, что, в свою очередь, может быть связано с вязко-упругопластичными свойствами асфальтобетона и возможным возникновением остаточных деформаций при высоких температурах.

Заключение

Результаты исследований позволяют корректировать чаши прогибов, полученные в ходе экспериментальных испытаний при выполнении оценки прочности эксплуатируемых автомобильных дорог в рамках диагностики с учетом фактической температуры асфальтобетона. Приведение прогибов в сопоставимый с расчетными параметрами вид позволяет получать объективные данные о состоянии конструктивных слоев эксплуатируемых дорог и увеличить точность назначения ремонтных мероприятий. Вместе с тем данные исследования целесообразно продолжать с учетом разнообразия конструкций и материалов дорожных одежд в нашей стране. Методика может быть доработана по мере накопления данных.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Углова Е.В. Оценка модулей упругости слоев дорожной одежды на стадии эксплуатации автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2009. № 2 (23). С. 170–178.
2. Тиратурян А.Н. Анализ программ для «обратного» расчета модулей упругости конструктивных элементов нежестких дорожных одежд на стадии эксплуатации // Строительство и реконструкция. 2012. № 4 (42). С. 72–78.
3. Углова Е.В., Тиратурян А.Н., Мизонов В.В. Разработка теоретических основ «обратного» расчета модулей упругости слоев дорожной конструкции на стадии эксплуатации // Известия Ростовского государственного строительного университета. 2011. № 15. С. 84–89.
4. Мизонов В.В., Ляпин А.А., Илиополов С.К. и др. Обратная задача об определении значений модулей упругости слоев эксплуатируемых дорожных конструкций // Строительство и реконструкция. 2011. № 2 (34). С. 89–96.
5. Бочкарев А.В. Анализ надежности обратного расчета упругих параметров дорожных одежд // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2022. № 3 (33). С. 5–18.
6. Тиратурян А.Н., Углова Е.В. Программный комплекс для «обратного» расчета динамических модулей упругости эксплуатируемых дорожных конструкций с учетом параметров воздействия установок нагружения дорожных одежд // Наукоедение : интернет-журнал. 2012. № 3 (12). URL: <https://naukovedenie.ru/sbornik12/12-120.pdf> (дата обращения: 11.05.2023).
7. Тиратурян А.Н., Ляпин А.А., Углова Е.В. Совершенствование неразрушающего метода определения механических характеристик элементов многослойных конструкций на примере дорожных одежд // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2023. № 1. С. 56–65.
8. Углова Е.В., Тиратурян А.Н. Неразрушающие методы оценки состояния нежестких дорожных одежд на стадии эксплуатации. Ростов-на-Дону : Донской государственный технический университет, 2018. 116 с.

9. Мизонов В.В., Тиратурян А.Н. Определение эксплуатационных значений модулей упругости элементов дорожной конструкции // Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования : материалы VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Омск, 18–20 мая 2011 г. Книга 1. Омск, 2011. С. 40–43.
10. Мизонов В.В., Тиратурян А.Н. Использование метода «обратного» расчёта при эксплуатации автомобильных дорог // Наука и техника в дорожной отрасли. 2011. № 1 (56). С. 25–27.
11. Тиратурян А.Н., Углова Е.В. Расчетно-экспериментальный метод оценки модулей упругости элементов нежестких дорожных конструкций на стадии эксплуатации // Инновационные материалы, технологии и оборудование для строительства современных транспортных сооружений : Международная научно-практическая конференция, Белгород, 08–10 октября 2013 г. Том 1. Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2013. С. 376–382. EDN: ORHUPB
12. Baltzer S., Jansen J.M. Temperature correction of asphalt-moduli for FWD-measurements // Bearing Capacity of Roads and Airfields FHWA : 4th International Conference, U of Minnesota, Army Corps of Engineers, NRC Canada, FAA. 1994. P. 1.
13. Fakhri M., Dezfoulan R.S. Pavement structural evaluation based on roughness and surface distress survey using neural network model // Construction and Building Materials. 2019. T. 204. V. 768–780.
14. Le V.P. et al. Development and validation of a temperature correction model for FWD back-calculated moduli // Australian Journal of Civil Engineering. 2022. P. 1–9.
15. Březina I., Machel O., Zavřel T. Temperature correction of deflections and backcalculated elasticity moduli determined from falling weight deflectometer measurements on asphalt pavements // Communications-Scientific letters of the University of Zilina. 2022. V. 24. № 1. P. D1–D8.
16. Горский М.Ю., Кадыров Г.Ф., Стрельцов А.В., Симчук Е.Н. Совершенствование методики расчета нежестких дорожных одежд с учетом применения решения задачи теории упругости для многослойного полупространства // Дороги и мосты. 2021. № 2(46). С. 53–74. EDN: TPWVZF

REFERENCES

1. Uglova E.V. Elastic moduli of road pavement layers during highway operation. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2009; 2 (23):170–178. (In Russian)
2. Tiraturyan A.N. Analysis of programs for backward calculation of elastic moduli of structural elements of non-rigid pavements at the operation stage. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2012; 4 (42): 72–78. (In Russian)
3. Uglova E.V., Tiraturyan A.N., Mizonov V.V. Development of theoretical foundations of backward calculation of elastic moduli of road layers during operation. *Izvestiya Rostovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*. 2011; (15): 84–89. (In Russian)
4. Mizonov V.V., Lyapin A.A., Iliopolov S.K., et al. Backward calculation of elastic moduli of road layers. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2011; 2 (34): 89–96. (In Russian)
5. Bochkarev A.V. Backward calculation of elastic parameters of pavements. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2022; 3 (33): 5–18. (In Russian)
6. Tiraturyan A.N., Uglova E.V. Software package for backward calculation of elastic moduli of operated road structures with respect to pavement loading. *Naukovedenie*. 2012; 3 (12). Available: <https://naukovedenie.ru/sbornik12/12-120.pdf> (accessed May 11, 2023). (In Russian)
7. Tiraturyan A.N., Lyapin A.A., Uglova E.V. Improvement of non-destructive method for determining mechanical characteristics of elements of multilayer road structures. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*. 2023; (1): 56–65. (In Russian)
8. Uglova E.V., Tiraturyan A.N. Non-destructive methods for assessing non-rigid pavements during operation. Rostov-on-Don, 2018. 116 p. (In Russian)
9. Mizonov V.V., Tiraturyan A.N. Elastic moduli of road structure elements. In: *Proc. 6th All-Russ. Sci. Conf. 'Development of Road Transportation Complex and Construction Infrastructure on the Basis of Rational Environmental Management'*, Omsk, 2011. Pp. 40–43. (In Russian)

10. Mizonov V.V., Tiraturyan A.N. Backward calculation of road operation. *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli*. 2011; 1(56): 25–27. (In Russian)
11. Tiraturyan A.N., Uglova E.V. Theoretical and experimental evaluation of elastic moduli of non-rigid road structures during operation. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Innovative Materials, Technologies and Equipment for Construction of Modern Transport Facilities'*. Belgorod, 2013. Pp. 376–382. EDN: ORHUPB (In Russian)
12. Baltzer S., Jansen J.M. Temperature correction of asphalt-moduli for FWD-measurements. In: *Proc. 4th Int. Conf. 'Bearing Capacity of Roads and Airfields'*, Minneapolis, MN, USA, 1994. Pp. 17–21.
13. Fakhri M., Dezfoulan R.S. Pavement structural evaluation based on roughness and surface distress survey using neural network model. *Construction and Building Materials*. 2019; 204: 768–780.
14. Le V. P., et al. Development and validation of a temperature correction model for FWD back-calculated moduli. *Australian Journal of Civil Engineering*. 2022. Pp. 1–9.
15. Březina I., Machel O., Zavřel T. Temperature correction of deflections and backcalculated elasticity moduli determined from falling weight deflectometer measurements on asphalt pavements. *Communications-Scientific Letters of the University of Zilina*. 2022; 24 (1): D1–D8.
16. Gorskiy M.Y., Kadyrov G.F., Streltsov A.V., Simchuk E.N. Improvement of calculation method of non-rigid pavements taking into account the problem solution of elasticity theory for multi-layer half-space. *Dorogi i mosty*. 2021; 2 (46): 53–74. EDN: TPWVZF (In Russian)

Сведения об авторах

Михаил Юрьевич Горский, инженер, руководитель лаборатории оценки транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог, АНО «НИИ ТСК», 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 73А, gorskiy@niitsk.ru

Евгений Николаевич Симчук, канд. экон. наук, генеральный директор, АНО «НИИ ТСК», 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 73А, simchuk@niitsk.ru

Георгий Фаррухович Кадыров, инженер, руководитель асфальтобетонной лаборатории, АНО «НИИ ТСК», 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 73А, kadyrovgf@niitsk.ru

Алексей Евгеньевич Симчук, магистрант, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, 125319, г. Москва, Ленинградский проспект, 64, alexsimchuk@bk.ru

Authors Details

Mikhail Y. Gorskiy, Engineer, Head of the Laboratory, Research Institute of Transportation and Construction Complex, 111024, 73A, Aviamotornaya Str., Moscow, Russia, gorskiy@niitsk.ru

Evgenii N. Simchuk, PhD, Director General, Research Institute of Transportation and Construction Complex, 111024, 73A, Aviamotornaya Str., Moscow, Russia, simchuk@niitsk.ru

Georgii F. Kadyrov, Engineer, Head of the Laboratory, Research Institute of Transportation and Construction Complex, 111024, 73A, Aviamotornaya Str., Moscow, Russia, kadyrovgf@niitsk.ru

Aleksei E. Simchuk, Graduate Student, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, 64, Leningradskii Ave., 125319, Moscow, Russia, alexsimchuk@bk.ru

Вклад авторов

Горский М.Ю. – концепция исследования; сбор материала; обработка материала; написание исходного текста; итоговые выводы.

Симчук Е.Н. – идея; научное руководство; концепция исследования; научное редактирование текста; итоговые выводы.

Кадыров Г.Ф. – сбор материала; обработка материала; доработка текста.

Симчук А.Е. – сбор материала; обработка материала, редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

Gorskii M.Y. wrote the manuscript, provided material collection and processing and drew conclusions.

Simchuk E.N. edited the manuscript and drew conclusions.

Kadyrov G.F. provided material collection and processing and revised the manuscript.

Simchuk A.E. provided material collection and processing and edited the manuscript.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 28.06.2023
Одобрена после рецензирования 05.07.2023
Принята к публикации 06.07.2023

Submitted for publication 28.06.2023
Approved after review 05.07.2023
Accepted for publication 06.07.2023