

Влияние неоднородностей слоев дорожных одежд на результаты обратного расчета послойных модулей упругости

А.И. Землянухин¹, А.В. Бочкарев¹, М.Ю. Горский², Е.Н. Симчук²

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Саратов

²Автономная некоммерческая организация «Научно-исследовательский институт
транспортно-строительного комплекса», Москва

Аннотация: Статья посвящена оценке влияния возможных неоднородностей в слоях дорожных одежд на результаты обратного расчета модулей упругости по данным испытаний установок динамического нагружения падающим грузом (УДН). В статье рассмотрены варианты влияния различного расположения теоретически заданных неоднородностей конструктивных слоев в пределах проезжей части. Дополнительно рассмотрено влияние расположения края дорожной одежды на результаты вычисления модулей упругости обратным расчетом. Проведенный численный эксперимент подтверждает, что возможные неоднородности дорожной одежды могут существенным образом влиять на результаты обратных расчетов, и как следствие, на принятие решений по назначению ремонтных мероприятий. Также определены границы при которых наличие обочины с конструкцией дорожной одежды, отличающейся от проезжей части, в значительной степени искажает получаемые результаты. В конце работы предложены пути по практическому учету неоднородностей и дальнейшему совершенствованию метода обратного расчета модулей упругости нежестких дорожных одежд.

Ключевые слова: установка динамического нагружения, дорожная одежда, конструктивные слои, чаша прогибов, асфальтобетон, модуль упругости, обратный расчет, неоднородность слоев, проезжая часть, обочина

Введение

Развитие методов неразрушающего контроля является крайне важным направлением в дорожной отрасли. Оперативная и точная диагностика состояния автомобильных дорог позволяет оценить их состояние и при необходимости своевременно принять меры по назначению ремонтных мероприятий [1,2].

Установки динамического нагружения падающим грузом (УДН) являются передовым средством неразрушающего контроля состояния нежестких дорожных одежд, широко применяемым в Российской Федерации и ведущих зарубежных странах [3-5]. Современные УДН состоят из ряда систем, к которым относятся:

- система создания нагрузки,

- система регистрации нагрузки,
- система регистрации вертикальных перемещений (прогибов) поверхности дороги,
- программное обеспечение для обработки данных.

УДН позволяет решить большое количество практических задач. Основные алгоритмы испытаний УДН и методики расчета представлены в актуальном национальном стандарте ГОСТ Р 59918-2021. Документ содержит описание процедуры обратного расчета модулей упругости материалов слоев в рамках линейно-упругой модели. В ходе решения задачи оптимизации при обратном расчете происходит поиск линейно-упругой многослойной конструкции, перемещения которой наиболее близки к измеренным УДН перемещениям реальной дорожной одежды, опираясь на известное решение объемной задачи теории упругости, использующее интегральные преобразования [6].

В рамках практической работы с методом обратного расчета и в научных статьях [4,7,8] неоднократно отмечалась его математическая сложность и высокая чувствительность результатов к малым изменениям чаши прогибов и другим исходным параметрам. Методика обратного расчета имеет ряд допущений, которым, в числе прочих, относятся постоянные толщины слоев дорожной одежды, и неограниченность слоев в горизонтальной плоскости.

Несмотря на применение современных технологий укладки, полностью избавиться от пространственных вариаций толщин слоев и степени их уплотнения невозможно. Необходимо отметить, что при строительстве регламентируются допустимые отклонения на стадии строительства. Для асфальтобетонов максимальные отклонения в единичных местах согласно ГОСТ Р 58406.2 составляют до 15% от толщины слоя, т.е. при толщине слоя 10 см отклонение может достигать до 1,5 см. Для слоев основания из несвязных материалов отклонение согласно ГОСТ Р 59120 составляет до 2

см. В то же время, в процессе эксплуатации материалы дорожных одежд ввиду воздействия природных факторов и нагрузки от автомобильного транспорта могут деградировать и снижать свои свойства. Например, в слое из асфальтобетона могут возникать усталостные трещины, разрушения, вызванные замерзанием-оттаиванием слоя в водонасыщенном состоянии и другие дефекты, понижающие первоначальные модули упругости материала. Таким образом, первая цель работы – оценить влияние локальных изменений толщины слоя асфальтобетона на результаты обратного расчета.

Согласно рекомендациям ГОСТ Р 59918-2021, измерения при помощи УДН проводят в правой полосе наката крайней правой полосы движения транспортных средств, наиболее близкой к обочине дороги. Второй целью работы является оценка влияния близости края асфальтобетонного покрытия.

Моделирование локального дефекта асфальтобетонного слоя

В данном исследовании в качестве объекта моделирования была выбрана дорожная одежда автомобильной дороги М-9 «Балтия» на участке капитального ремонта с устройством новой дорожной одежды. При проведении математического моделирования толщины слоев были назначены в соответствии с проектной документацией (таблица 1). В соответствии с рекомендациями ГОСТ Р 59918-2021, все слои дорожной одежды были сведены в 4 слоя: объединенный слой асфальтобетона, слой щебеночно-песчаного основания, слой дополнительного песчаного основания и объединенный слой рабочего слоя и грунта земляного полотна. Лабораторные исследования проб асфальтобетонных смесей, взятых во время строительства автодороги, выявили, что объемная плотность всех асфальтобетонных смесей равна 2600 ± 50 кг/м³.

Для задания модуля упругости слоя асфальтобетона был использован график сезонного изменения температуры асфальтобетона на глубине 6 см, построенный по информации от станции температурного мониторинга, установленной на автомобильной дороге М-11 «Нева», близкой по

конструкции к рассматриваемой, и находящейся с ней в одной климатической зоне ([9], рис. 1).

Таблица № 1

Свойства материалов слоев дорожной одежды

Слой дорожной одежды	Материал слоя	Толщина, см	Плотность, кг/м ³	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости, МПа
Объединенный слой асфальтобетона	ЩМА-16 (5 см) + А22Нт (9 см) + А32От (10 см)	24	2600	0.22	6000
Основание	Щебеночно-песчаная смесь С-4	46	2000	0.3	350
Дополнительное основание	Средний песок	48	1900	0.3	120
Рабочий слой земляного полотна + грунт земляного полотна	Средний песок + суглинок легкий пылеватый	-	1900	0.3	50

В температурном диапазоне, разрешенном ГОСТ Р 59918-2021 для применения УДН, согласно графику, средняя температура оказывается равной 17° С. Измерения динамического модуля релаксации по методике ГОСТ Р 58401.21-2019 показали, что при 17° С на эффективной частоте импульса УДН, принятой равной 9 Гц, модули упругости асфальтобетонов ЩМА-16, А22Нт и А32От, использованных в рассматриваемой конструкции, равны, соответственно, 4760 МПа, 8880 МПа и 5820 МПа. По формуле расчета модуля упругости объединенного слоя асфальтобетона, учитывающей модули упругости и толщины отдельных слоев [10], получаем 6346 МПа – для расчета принимаем 6000 МПа. Модули упругости и коэффициенты Пуассона остальных слоев назначаем в соответствии со справочными данными.

Расчет перемещений поверхности конструкции в точках расположения датчиков прогиба УДН производился методом конечных элементов в трехмерной линейно-упругой постановке. Начало прямоугольных осей координат $Oxyz$ размещалось в центре круга приложения нагрузки; верхняя поверхность конструкции располагалась в плоскости xOy ; общие размеры расчетной области вдоль осей Ox и Oy принимались равными, соответственно, 10 м и 5 м, причем симметрия граничных условий относительно плоскости xOz позволила ограничиться расчетом половины конструкции при $y > 0$ (рис. 1)

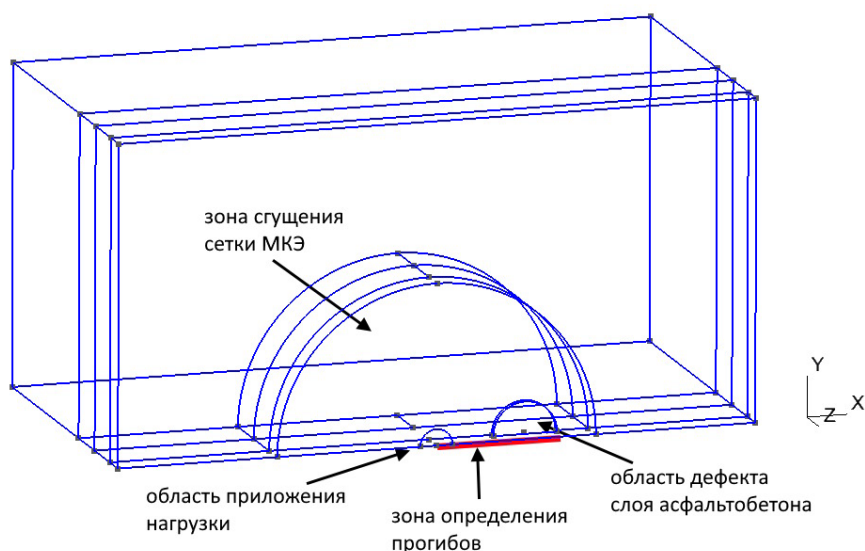


Рис. 1. - Геометрия расчетной области

Толщины слоев с 1 по 3 назначались в соответствии с табл. 1; толщина 4-го слоя, соответствующего грунтовому основанию, принималась равной 10 м. Для круга приложения нагрузки задавался импульс нормального давления в форме верхнего полупериода синуса длительностью 30 мс, стандартно используемый при моделировании нагрузок УДН; нормальные перемещения u_y в плоскости xOz , а также все перемещения u_x, u_y, u_z на нижней поверхности 4-го слоя задавались нулевыми. Результатом расчета являлась чаша прогиба – совокупность максимальных модулей перемещений u_z для 10 точек, в недеформированном состоянии конструкции располагавшимися вдоль оси Ox на расстояниях 0, 0.2, 0.3, 0.45, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8 и 2.1 м от начала

координат. Для случая бездефектного слоя асфальтобетона чаша прогиба $\{u\}_{МКЭ}$, рассчитанная по методу конечных элементов, отличалась от чаши $\{u\}_{ИНТ}$, полученной методом интегральных преобразований Ханкеля в осесимметричной постановке [6], не более, чем на 1,4 мкм (табл. 2).

Таблица № 2

Чашы прогибов при различных вариантах расчета

Вариант расчета чаши прогибов	Прогибы на различном расстоянии от центра приложения нагрузки, мм
$\{u\}_{МКЭ}$	0.2764; 0.2458; 0.2300; 0.2090; 0.1905; 0.1599; 0.1362; 0.1173; 0.1021; 0.0895
$\{u\}_{ИНТ}$	0.2751; 0.2460; 0.2301; 0.2095; 0.1910; 0.1599; 0.1358; 0.1169; 0.1022; 0.0909

Дефект асфальтобетонного слоя моделировался цилиндрической выемкой диаметром 0,6 м и глубиной 0,05 м со стороны нижней поверхности слоя. Объем выемки считался заполненным материалом второго слоя, т.е. ЩПС. Таким образом, в области дефекта имелось локальное увеличение толщины второго слоя за счет аналогичного уменьшения толщины первого слоя. Принятый для расчета модуль упругости ЩПС в 17 раз меньше модуля упругости асфальтобетона, поэтому такой дефект должен приводить к локальному ослаблению конструкции и некоторому увеличению компонент чаши прогиба. На рис. 2 показаны графики разностей Δu чаш прогиба дефектного и бездефектного случаев, в зависимости от расстояния x_d между центром выемки и центром приложения нагрузки.

Как и ожидалось, перемещения конструкции с дефектом всегда больше, чем бездефектной; максимальное отличие перемещений достигает почти 16 мкм и наблюдается в центре круга нагрузки, когда дефект находится непосредственно под кругом ($x_d = 0$).

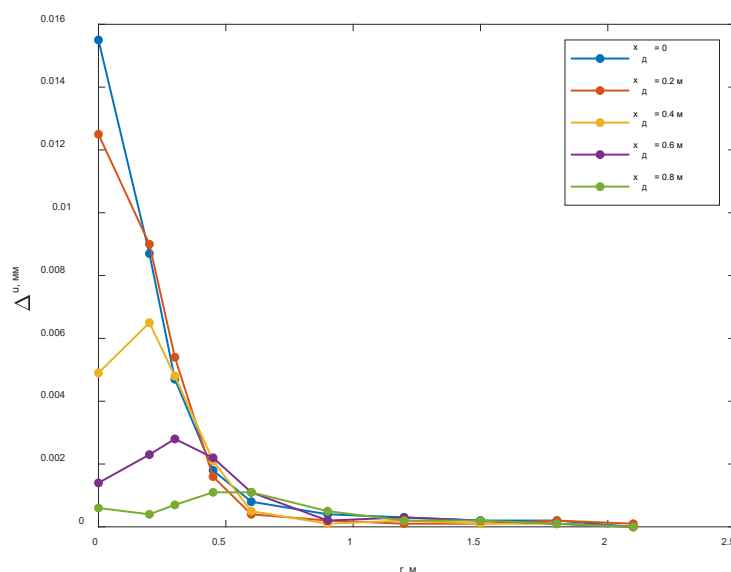


Рис. 2. - Разности чаш прогиба

Этот эффект объясняется тем, что максимальные перемещения первых трех датчиков отвечают за слой асфальтобетона. Влияние дефекта при любом его расположении на перемещения точек, удаленных от центра более чем на 1 м, пренебрежимо мало. По мере увеличения расстояния от дефекта до центра нагрузочного круга, чаша прогиба все менее отличается от бездефектной чаши – при $x_D = 0.8$ м отличия чаш не превышают 1 мкм, что находится, по всей видимости, за пределами чувствительности распространенных УДН.

На рис. 3 показаны диаграммы результатов обратного расчета модулей упругости слоев по чашам прогиба, искаженным наличием дефекта. Обратный расчет проводился стандартным алгоритмом, полностью соответствующим ГОСТ Р 59918-2021 и [6] и построенным в рамках модели постоянной толщины слоев конструкции. Координаты (x, y) на диаграммах соответствуют положению центра дефекта; пунктирная линия – контур круга приложения нагрузки; красным цветом показаны первые 6 из 10 точек, перемещения которых определяют расчетную чашу прогиба.

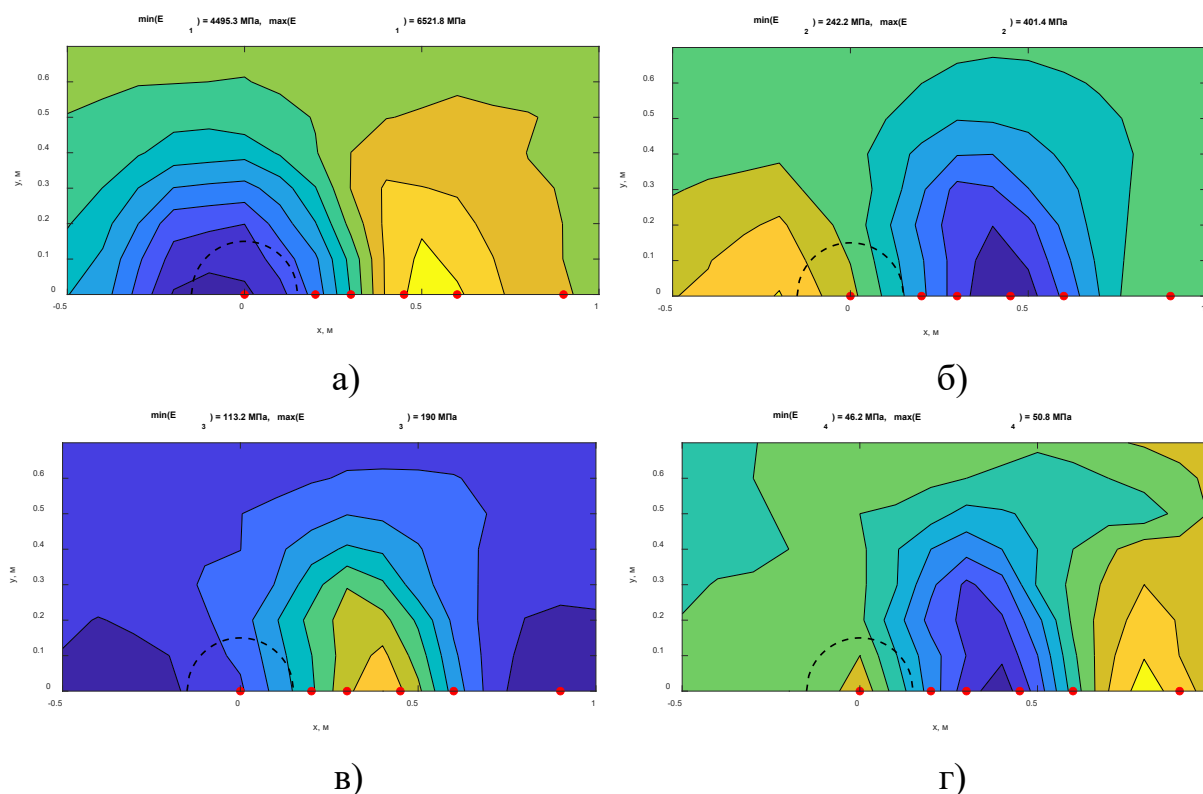


Рис. 3. - Расчетные модули упругости а) 1-го слоя, б) 2-го слоя, в) 3-го слоя, г) 4-го слоя

Против ожидания, обратный расчет не дает монотонного уменьшения модулей слоев по мере приближения дефекта к центру нагрузки. В частности, при нахождении центра дефекта в точке $x = 0.5, y = 0$, расчетное значение модуля упругости для ослабленного дефектом 1-го слоя оказывается равным примерно 6500 МПа (на 9% выше модуля бездефектного слоя), а для второго слоя – всего около 250 МПа (на 28% ниже базового значения). Только при расположении центра дефекта не далее 0,2 м от центра нагрузки результаты обратного расчета близки к ожидаемым – модуль дефектного 1-го слоя снижен на 20-25%, остальные модули отличаются от базовых в пределах 5%. Зона аномальных значений модулей имеет эллипсовидную форму с центром в окрестности $x = 0.4, y = 0$ и представлена оттенками желтого цвета на рис. 3а, 3в и оттенками синего на рис. 3б, 3г.

Расположение дефекта слоя асфальтобетона в аномальной зоне искажает представление о локальных жесткостях слоев, завышая модули E_1, E_3 и

занижая модули E_2, E_4 . При обработке результатов обратного расчета желательно иметь критерий, позволяющий отбрасывать чаши прогиба, не соответствующие модели однородных упругих слоев постоянной толщины. В ГОСТ Р 59918-2021 имеется единственная рекомендация – не использовать для анализа чаши прогиба, в которых нарушается монотонное убывание перемещений с увеличением расстояния до центра нагрузки. По нашему опыту такие немонотонные чаши в полевых испытаниях чрезвычайно редки и связаны с грубыми ошибками в проведении испытаний. Для дорожных одежд с песчаным основанием в качестве 3-го слоя можно предложить второй критерий – чрезмерно высокий расчетный модуль упругости песчаного слоя, более чем на 15 % превосходящий максимальный проектный модуль песка крупного, равный 130 МПа, т.е. превышающий 150 МПа. Из рис. 3в видно, что при расположении дефекта асфальтобетонного слоя в окрестности центра аномальной зоны, расчетный модуль упругости достигает 190 МПа.

С другой стороны, завышение E_1, E_3 с занижением E_2, E_4 , наблюдаемое по обратному расчету для единственной чаши прогиба не может однозначно свидетельствовать о наличии локального ослабления асфальтобетона в ближайшей окрестности круга приложения нагрузки. Результаты обратного расчета очень чувствительны к вариациям чаши прогиба и к подобному эффекту может привести, в частности, неравномерное распределение давления в зоне нагружения. Однако, противофазное изменение модулей соседних слоев (рис. 4), найденных обратным расчетом для серии чаш прогиба, измеренным при смещении УДН вдоль оси дороги, может указывать на присутствие дефекта и, более того, локализовать его.

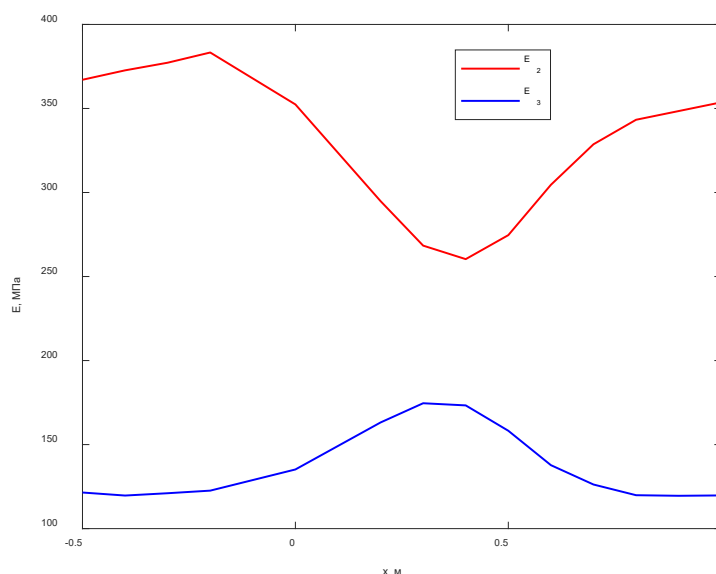


Рис. 4. - Противофазное изменение модулей E_2, E_3 при смещении центра дефекта параллельно линии датчиков УДН на расстоянии 0.2 м от линии

Моделирование ограниченности асфальтобетонного слоя

Для оценки краевого эффекта была выделена область дорожной одежды вблизи края проезжей части (рис. 5). Размеры области и толщины слоев такие же, как в предыдущем параграфе. Обочина шириной 0,5 м и толщиной 0,24 м, расположенная между внешним краем асфальтового слоя и внешним краем всей конструкции, была объединена со 2 слоем. Необходимо отметить, что согласно ГОСТ Р 59918-2021, измерения проводятся в правой полосе наката крайней правой полосы движения, как наиболее уязвимом месте дорожной одежды проезжей части. В то же время согласно ГОСТ Р 52399-2022 и ГОСТ Р 71404 на дорогах помимо проезжей части устраивают:

- на дорогах I технической категории - остановочную полосу шириной 2,5 м и конструкцией как у проезжей части,
- на дорогах II-IV - краевую полосу у обочины (той же конструкции что и дорожная одежда) шириной 0,5 м и укрепленную часть обочины шириной от 1,0 до 2,0 м с менее капитальной конструкцией, на дорогах низких категорий и вовсе без слоев асфальтобетона.

Таким образом, на большинстве дорог, особенно низких категорий расстояние от места измерения в правой полосе наката до края однотипной дорожной одежды на краевой полосе может составлять порядка 1,0-1,5 м.

Как и ранее, в круге нагрузки прикладывался импульс давления длительностью 30 мс, нижняя поверхность последнего слоя имела нулевые перемещения, на остальных поверхностях граничные условия не задавались. Расстояние между линией датчиков УДН (красная линия на рис. 5) и внешним краем асфальтобетона варьировалось от 0.5 м до 3 м.

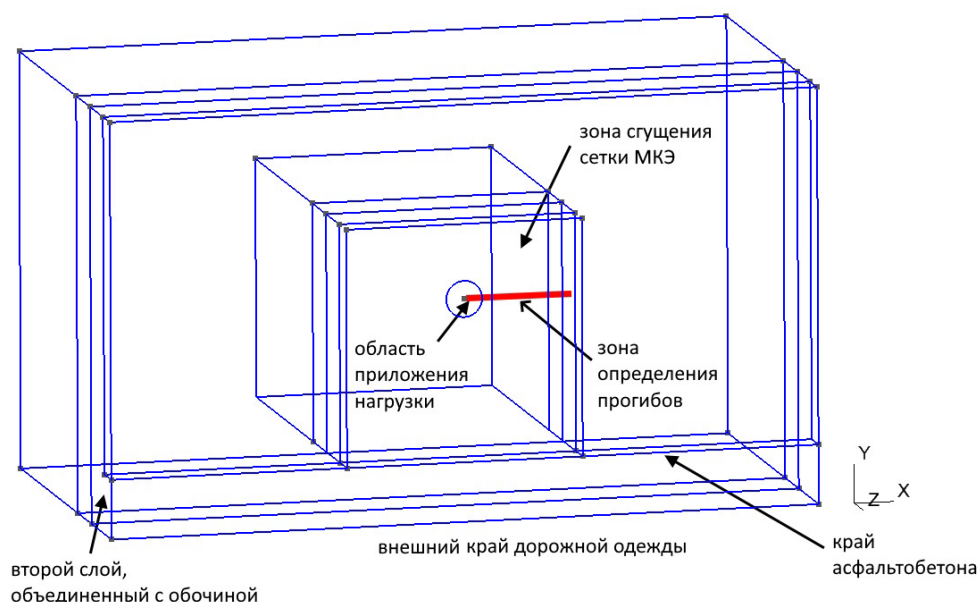


Рис. 5. - Геометрия расчетной области

Результаты обратного расчета по чашам прогиба показаны на рис. 6.

Величины E_{10} , E_{20} , E_{30} , E_{40} совпадают с базовыми модулями, соответственно, 6000, 350, 120, 50 МПа. Результаты показывают, что модуль упругости асфальтобетона E_1 надежно определяется при всех расстояниях, с погрешностью не большей 10%. Модуль упругости песчаного слоя E_3 существенно завышается на расстояниях, меньших 1.5 м – такое завышение, как и в случае, рассмотренном в предыдущем параграфе, может служить индикатором некорректности результатов обратного расчета для данной постановки задачи.

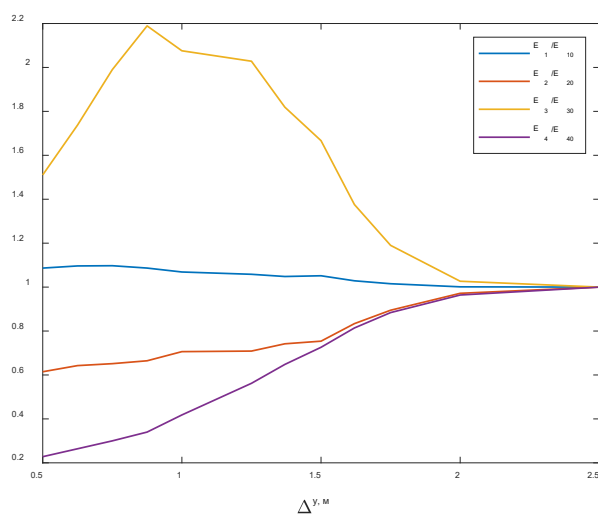


Рис. 6. - Зависимости расчетных нормированных модулей упругости слоев от расстояния до внешнего края асфальтобетона

Наконец, модули E_2 и E_4 значительно занижаются – вплоть до 5 раз для последнего, 4 слоя. Таким образом, к результатам обратного расчета для чаш прогиба, измеренных ближе 1.5 – 1.7 м от края асфальтобетонного слоя, следует относиться осторожно.

Обсуждение и выводы

Проведенный анализ нормативных документов показал, что на стадии строительства автомобильной дороги имеются определенные допуски по толщинам конструктивных слоев, что в совокупности с возможным накоплением дефектов и изменением свойств материалов в процессе эксплуатации может приводить к существенному отклонению от проектных решений. Моделирование зоны дефекта слоя асфальтобетона и расчеты чаш прогибов при различном расположении нагрузочной плиты показали искажения чаш и полученных модулей упругости материалов при выполнении обратного расчета. По результатам исследований предложен критерий оценки попадания в локальные зоны дефектов верхнего слоя - чрезмерное завышение модуля упругости песчаного слоя (значительно превышающее расчетные модули нового слоя). Вторым параметром определения места изменения толщин или локального дефекта (снижения

модуля асфальтобетона или толщины слоя) может служить противофазное изменение вычисленных модулей соседних слоев (явное завышение E_1, E_3 с занижением E_2, E_4), наблюдаемое по результатам обратного расчета для серии чаш прогиба, измеренным при смещении УДН вдоль оси дороги.

Дополнительно в рамках работы определено, что на большинстве дорог низких категорий с невысокой капитальностью дорожных одежд расстояние от рекомендуемого места измерения по ГОСТ Р 59918-2021 до края дорожной одежды может составлять от 1 до 1,5 м. В то же время расчеты показывают, что такое расстояние в ряде случаев может приводить к получению некорректных результатов. При этом существенное завышение модуля упругости песчаного слоя также может служить индикатором некорректности результатов обратного расчета для данной постановки задачи. Для дальнейшего выхода из сложившейся ситуации при расчетах могут потребоваться корректирующие действия, например, введение соответствующих коэффициентов, позволяющих получать корректные результаты обратного расчета.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-29-00231)

Литература

1. Углова Е. В., Тиратурян А. Н., Ляпин А. А. Комплексный подход к исследованию характеристик динамического деформирования на поверхности нежестких дорожных одежд с использованием методов неразрушающего контроля // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика, 2016. № 2. С. 111-130.

2. Тиратурян А. Н., Ольховой С. А. Оценка деградации прочности нежестких дорожных конструкций на основе натурных измерений на участке

автомобильной дороги М4 "Дон" п.Тарасовский // Инженерный вестник Дона, 2017, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4160.

3. Smith K.D., Bruinsma J.E., Wade M.J., et al. Using falling weight deflectometer data with mechanistic-empirical design and analysis. Applied Pavement Technology Inc., 2017. vol.1. pp. 8–11.

4. Fu G. Xue C., Zhao Y., Cao D., Alae M. Accuracy evaluation of statically backcalculated layer properties of asphalt pavements from falling weight deflectometer data // Canadian Journal of Civil Engineering. 2020. V. 47. No. 3. pp. 317-325.

5. 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.

6. Бочкарев А.В., Землянухин А.И. Обратное вычисление послойных модулей упругости дорожных одежд // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2022. № 3 (94). С. 5-18.

7. Khan Z.H., Tarefder R.A., Hasan M.A. Field Characterization of Pavement Materials using Falling Weight Deflectometer and Sensor Data from an Instrumented Pavement Section. Transportation Research Record. 2020;2674(4):036119812091192.

8. Wang Y., Zhao Y., Zhang M., Fu G. Influence of bedrock on the dynamic deflection response and dynamic back-calculation results of asphalt pavement: Insights from the numerical simulation of falling weight deflectometer tests // Construction and Building Materials. 2022. V. 330. P. 127252.

9. Медведев Д.В., Симчук Е.Н., Бочкарев А.В. Анализ свойств геосинтетических материалов, пригодных для борьбы с отраженными трещинами в асфальтобетонных покрытиях // Транспортные сооружения. 2023. Т. 10. № 4. URL: t-s.today/08sats423.html

10. Бочкарев А.В., Горский М.Ю., Симчук Е.Н. Определение эффективной частоты импульса установки динамического нагружения для

сопоставления результатов полевых и лабораторных испытаний // Инженерный вестник Дона, 2025, №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2025/10457

References

1. Uglova E. V., Tiraturyan A. N., Lyapin A. A. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika, 2016. № 2. pp. 111-130.
2. Tiraturyan A. N., Ol'xovoj S. A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4160.
3. Smith K.D., Bruinsma J.E., Wade M.J., et al. Applied Pavement Technology Inc., 2017. vol.1. pp. 8–11.
4. Fu G. Xue C., Zhao Y., Cao D., Alae M. Canadian Journal of Civil Engineering. 2020. V. 47. No. 3. pp. 317-325.
5. Tiraturyan A.N., Lyapin A.A., Uglova E.V. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika, 2023. № 1. pp. 56-65.
6. Bochkarev A.V., Zemlyanuxin A.I. Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta, 2022. № 3. pp. 5–18.
7. Khan Z.H., Tarefder R.A., Hasan M.A. Transportation Research Record. 2020; 2674(4):036119812091192.
8. Wang Y., Zhao Y., Zhang M., Fu G. Construction and Building Materials. 2022. V. 330. P. 127252.
9. Medvedev D.V., Simchuk E.N., Bochkarev A.V. Transportnyye sooruzheniya. 2023. T. 10. № 4. URL: t-s.today/08sats423.html
10. Bochkarev A.V., Gorskiy M.YU., Simchuk E.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2025, №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2025/10457

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 11.10.2025

Дата публикации: 26.11.2025