
Определение эффективной частоты импульса установки динамического нагружения для сопоставления результатов полевых и лабораторных испытаний

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 методу вычисления эффективной частоты импульса нагрузки установок динамического нагружения падающим грузом (УДН). Данный показатель позволяет установить соответствие между лабораторно определенными вязкоупругими характеристиками асфальтобетонных слоев, входящих в состав дорожной одежды, и модулем упругости, вычисленным путем обратного расчета по чаше прогиба, определенной в полевых испытаниях при использовании УДН. В статье предложен алгоритм поиска частоты, приведены результаты ее расчетов и выполнено сопоставление модулей упругости, полученных в лаборатории и по результатам обратного расчета. Проведенный численный эксперимент подтверждает, что для чаш прогиба, сгенерированных в рамках вязкоупругой расчетной модели, отличие модулей не превосходит 8%. В конце работы предложены пути по практическому применению вычисленного параметра и дальнейшему совершенствованию метода на реальных чашах прогиба, полученных на действующих дорожных одеждах.

Ключевые слова: установка динамического нагружения, дорожная одежда, чаша прогибов, асфальтобетон, модуль упругости, модуль релаксации, тестирование характеристик асфальтобетонных смесей, мастер-кривая, обратный расчет, эффективная частота импульса.

Введение

Установки динамического нагружения падающим грузом (УДН) являются современным средством неразрушающего контроля состояния дорожных одежд. Конструкция УДН включает в себя систему создания нагрузки на дорожную одежду через нагрузочную плиту и регистрации вертикальных перемещений (прогибов) поверхности дороги. Первое поколение УДН фиксировало только нагрузку и перемещение центра нагрузочной плиты – эти данные позволяли оценить общий модуль упругости дорожной одежды, при этом определить состояние отдельных конструктивных слоев на стадии эксплуатации не представлялось возможным. Современные УДН имеют, вместо одного датчика перемещения, систему из 9 или 10 датчиков, расположенных на определенном расстоянии

от центра приложения нагрузки, информация с которых теоретически позволяет вычислить жесткостные характеристики всех слоев дорожной одежды.

В рамках диагностики автомобильных дорог с помощью УДН решаются следующие основные задачи:

1. Проверка соответствия жесткостных характеристик дорожной одежды и отдельных слоев проектным значениям после окончания строительства.

2. Оценка прочности и установление остаточного ресурса дорожной одежды в процессе эксплуатации – сравнением жесткостных характеристик с их проектными или начальными значениями, зафиксированными по окончании строительства [1-3]. Впоследствии, по результатам испытаний принимается решение о необходимости и характере ремонтных мероприятий.

В развиваемом на западе Механико-эмпирическом методе проектирования нежестких дорожных одежд (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide - MEPDG) при строительстве дорожной одежды отбираются пробы используемых асфальтобетонных смесей и по методике Тестирования характеристик асфальтобетонных смесей (Asphalt Mixture Performance Tester - AMPT) оцениваются их эксплуатационные характеристики. При испытании AMPT определяются зависимости абсолютного значения динамического модуля релаксации (далее в тексте – динамического модуля) от частоты при разных температурах, на основании принципа температурно-временной аналогии строится мастер-кривая – зависимость динамического модуля от приведенной частоты [4]. Для аппроксимации мастер-кривой применяют сигмоидальную функцию с 4 параметрами, для функции температурно-временного смещения – формулу Аррениуса, включающую 1 параметр, формулу Вильямса-Лэндела-Ферри или обобщенную квадратичную функцию, содержащие 2 параметра [5]. Фиксируются значения всех параметров аппроксимации на момент строительства (далее – начальные

параметры). Далее, при контроле состояния дорожной одежды в процессе ее эксплуатации проводят испытания при помощи УДН при разных температурах покрытия и путем обратного расчета вычисляют текущие значения параметров аппроксимации и производят сравнение начальной и текущей форм мастер-кривой (рис. 1) [6].

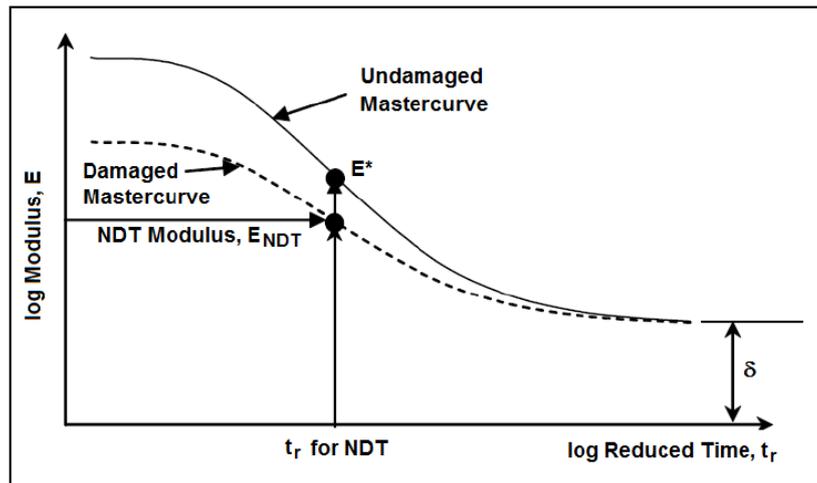


Рис. 1 - Начальная (исходная) и текущая (поврежденная) мастер-кривые

Считается, что в процессе эксплуатации асфальтобетон накапливает повреждения в виде микротрещин, расположенных в толще битумного вяжущего, в зонах контакта вяжущего с минеральным наполнителем и в самих зернах минерального наполнителя, которые приводят к снижению регистрируемого динамического модуля. По относительной величине этого снижения можно, с использованием эмпирических формул теории повреждения, оценить остаточный ресурс и запланировать сроки ремонтных мероприятий.

Несмотря на большие перспективы, МЕРPDG имеет ряд недостатков:

1. Сложность восстановления мастер-кривой по результатам испытания УДН. Обратный расчет, в ходе которого жесткостные параметры конструкции восстанавливаются по информации о ее перемещениях под приложенной нагрузкой, относится к математически некорректно поставленным задачам [7]. Малые изменения исходных величин в таких задачах приводят к большим изменениям в результатах расчета. В таких

условиях надежное вычисление в ходе обратного расчета 5 или 6 параметров, характеризующих вязкоупругий материал, становится чрезвычайно трудной задачей. Помимо некорректности, имеется еще одна сложность, упомянутая в отчете [8]: “... испытания УДН включают низкочастотное возбуждение, где нагрузка обычно значительно ниже 50–100 Гц, аналогично, отклик также значителен ниже этой частоты. Учитывая, что время измерения ограничено 0,06 секунды, нижний предел частоты обычно составляет 5–10 Гц. Следовательно, для заданной конструкции дорожного покрытия и известного возбуждения отклик можно надежно предсказать только в этом узком диапазоне частот. Естественным следствием является то, что даже при отсутствии проблем с неоднозначностью модуль дорожного покрытия можно надежно рассчитать только для этого диапазона частот. Поскольку этот диапазон составляет лишь узкую часть всей мастер-кривой, исследовательская группа пришла к выводу, что мастер-кривая не может быть получена обратным расчетом исключительно на основе данных УДН.”

2. На практике вязкоупругие характеристики, определенные в лабораторных условиях по методике АМРТ и при помощи обратного расчета по результатам испытания УДН, существенно различаются.

В Российской Федерации с принятием ГОСТ Р 59918-2021 определение жесткостных (по терминологии ГОСТ Р – прочностных) характеристик при помощи УДН становится основным методом испытаний по оценке прочности дорожных одежд. Стандарт содержит полное 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. Расчетный алгоритм опирается на известное решение объемной задачи теории упругости, использующее интегральные преобразования [7]. При расчете для слоя асфальтобетона вместо 5-6

вязкоупругих параметров вычисляется единственный параметр – модуль упругости – присутствующий во всех действующих нормативных документах. Вместе с тем ГОСТ Р 59918-2021 не содержит:

1. Направлений по повышению надежности результатов обратного расчета в условиях их большой вариабельности [9].
2. Рекомендаций по прогнозированию остаточного ресурса дорожной одежды по вычисленным модулям упругости слоев.
3. Методики соотнесения лабораторно определенных вязкоупругих характеристик асфальтобетонной смеси с модулем упругости соответствующего слоя в составе дорожной одежды, который вычисляется в ходе обратного расчета.

Данная работа имеет целью устранение проблемы №3.

Анализ проблемы

Асфальтобетон – композитный материал, свойства которого при низких температурах близки к свойствам линейно-упругого тела, а при высоких – к свойствам вязкой жидкости. Жесткостные свойства битумных вяжущих и асфальтобетонов на их основе в широком температурном диапазоне описываются моделью линейной вязкоупругости. Эквивалентом модуля упругости линейно-упругого тела является модуль релаксации вязкоупругого тела, зависящий от температуры и длительности приложения постоянной нагрузки или от частоты переменной гармонической нагрузки. С одной стороны, в ходе АМРТ-теста определяется зависимость модуля релаксации от гармонической нагрузки на различных частотах. С другой стороны, УДН генерирует одиночный импульс нагрузки длительностью 25-35 мс, форма которого подвержена вариациям и в любом случае далека от формы прямоугольного импульса. Как показывает анализ литературы, задача перехода от длительности к частоте не имеет устоявшегося решения.

В частности, руководство по использованию комплекса обратного расчета, используемого Американской ассоциацией государственных

служащих автомагистралей и транспорта (American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO), рекомендует использовать частоту 30 Гц, как соответствующую длительности импульса УДН, равной 30 мс [10]. В таблице 1 [6] приводится соответствие между длительностью t и частотой f , рекомендуемое разными источниками.

Таблица № 1

Соответствия между длительностью импульса УДН t и частотой испытаний
АМРТ f

Источник	Формула соответствия
Руководство по механистико-эмпирическому проектированию новых и восстановленных конструкций дорожных покрытий (MEPDG) [11]	$t = \frac{1}{f}$
Вязкоупругие свойства полимеров [12]	$t = \frac{1}{2\pi f}$
Прогнозирование прогиба гибких дорожных покрытий под действием динамических нагрузок [13]	$t = \frac{1}{2f}$
Длительность импульса нагрузки УДН и ее влияние на прогнозируемую реакцию дорожного покрытия [14]	$t = \frac{1}{f}$

В работе [8] отмечено, что в рамках сравнения значений модуля упругости, полученных методом обратного расчёта, с значениями модуля, измеренными в лаборатории, использование допущения, что модуль упругости равен динамическому модулю при частоте 30 Гц, приводит к значительному превышению лабораторно определенного модуля в сравнении с модулем, полученным обратным расчётом. Авторы [8] приходят, на наш взгляд, к неверному выводу: “Исследовательская группа полагает, что эта тенденция обусловлена тем, что на результаты измерений методом прямого расчёта могли повлиять отслоения или трещины, наблюдаемые в полевых образцах, которые не были отражены в значениях динамического модуля, измеренных в лаборатории”.

В работе Аль-Кади и др. [15] установлено, что импульс нагрузки, создаваемый в точке дорожного покрытия движущимся грузовым

автомобилем и для моделирования которого как раз и используется УДН, не состоит из какой-либо одной частоты, а содержит набор частот от 1.5 Гц до 15 Гц. Поэтому, по мнению авторов [15], формулы преобразования, приведенные в табл. 1, не могут дать надежную оценку частоты, соответствующей одиночному импульсу. Чтобы разработать методологию оценки частоты нагружающего импульса произвольной формы и переменной длительности, Аль-Кади и др. предложили концепцию доминантной частоты. Согласно этой концепции, частота нагрузки определяется путём первоначального преобразования нагружающего импульса из временной области в частотную посредством быстрого преобразования Фурье с последующим вычислением центра весов частотного спектра. Аль-Кади и др. также пришли к выводу, что упрощённые методики, представленные в табл. 1, могут занижать или завышать доминантную частоту нагружающего импульса, при этом погрешность оценки частоты при использовании метода MEPRDG составляет от 40 до 140 процентов.

Рассмотрим выбор доминантной частоты, предлагаемый в [15]. На рис. 2б показан Фурье-спектр верхней половины косинусоиды – импульса длительностью 30 мс, который часто используется при моделировании реального импульса нагрузки УДН (рис. 2а).

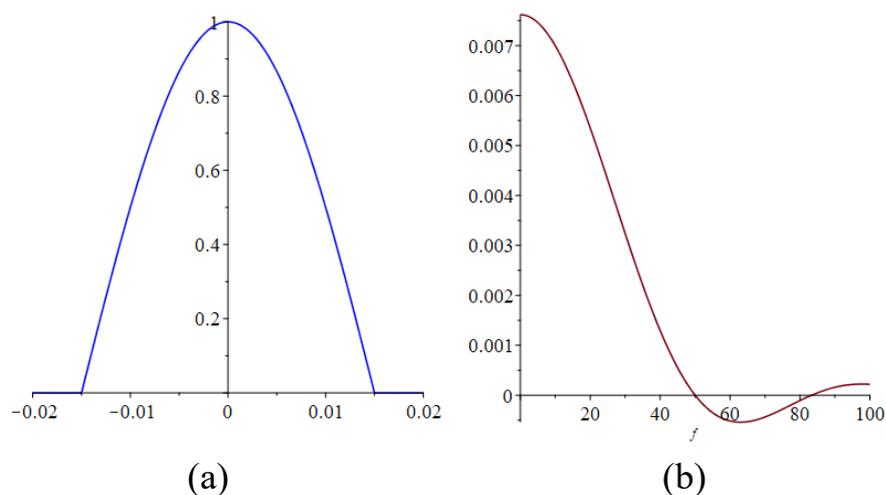


Рис. 2 - Импульс и его частотный спектр

Как видно, центральная область спектра включает непрерывный набор частот от 0 до 50 Гц. Зависимость модуля релаксации от частоты, определяемая мастер-кривой (рис. 1), существенно нелинейна и зависит от конкретного состава асфальтобетонной смеси, поэтому центр веса частотного спектра, предлагаемый в работе [15] в качестве кандидата для доминантной частоты импульса УДН, вряд ли может считаться универсальным выбором.

Как отмечается в [6], “эти результаты свидетельствуют об отсутствии единого мнения о том, какую частоту нагрузки УДН следует использовать и какой метод следует применять для преобразования времени в частоту при проектировании восстановительных работ. Хотя предлагаемые в литературе значения частоты нагрузки УДН обычно варьируются от 15 до 35 Гц, нет четкого понимания того, как частота нагрузки (и ее продолжительность) изменяется в зависимости от толщины асфальтобетонного слоя и температуры дорожного покрытия (т.е. как индикатора вязкоупругого отклика), а также чувствительности частоты нагрузки УДН к отклику дорожного покрытия, усталостным повреждениям и толщине верхнего слоя”.

Таким образом, проблема выбора доминантной (или эффективной) частоты импульса УДН является крайне актуальной.

Модели и методы

В данном исследовании в качестве объекта для моделирования была выбрана дорожная одежда в месте выполнения капитального ремонта автомобильной дороги М-9 «Балтия» (Таблица 2). Небольшой срок с момента постройки минимизирует вероятность того, что возникшие трещины или отслоения смогут исказить результаты испытания.

Толщины слоев были назначены в соответствии с проектом. Последние два слоя были объединены, так как используемая расчетная программа поддерживает максимум 6 слоев. Плотности асфальтобетонных смесей были взяты непосредственно из протоколов лабораторных исследований образцов смесей, взятых в процессе строительства дорожной одежды.

Таблица № 2

Свойства материалов слоев модельной дорожной одежды

Слой дорожной конструкции	Материал	Толщина, см	Плотность, кг/м ³	Коэфф. Пуассона	Модуль упруг., МПа
Верхний слой покрытия	щебеночно-мастичный асфальтобетон ЩМА-16	5	2600	0.22	-
Нижний слой покрытия	асфальтобетон А22Нт	9	2600	0.22	-
Верхний слой основания	асфальтобетон А32От	10	2600	0.22	-
Основание	щебеночно-песчаная смесь С-4-80 мм	46	2000	0.3	300
Дополнительное основание	Средний песок	48	1900	0.3	100
Рабочий слой земляного полотна + грунт земляного полотна	Средний песок + суглинок легкий пылеватый	-	1900	0.3	60

Коэффициент Пуассона асфальтобетонных смесей оценивался по эмпирической зависимости [16]:

$$\mu = 0.15 + \frac{0.35}{1 + \exp(-12.452 + 2.291 \cdot \log |E^*|)}, \quad (1)$$

где $|E^*|$ – абсолютное значение динамического модуля релаксации асфальтобетона, psi (1 МПа = 145.05 psi). Остальные значения в табл. 2 принимались по известным справочным данным.

Упомянутые протоколы лабораторных исследований содержали также сведения о мастер-кривых – зависимостях абсолютного значения

динамического модуля релаксации от частоты приложенной гармонической нагрузки. Для каждой из смесей согласно методике АМРТ [4, 6] изготавливалось по 3 образца для измерения динамического модуля E^* на частотах от 0.1 Гц до 25 Гц при температурах 0°C, 20°C и 40°C. Графики мастер-кривых показаны на рисунке 3.

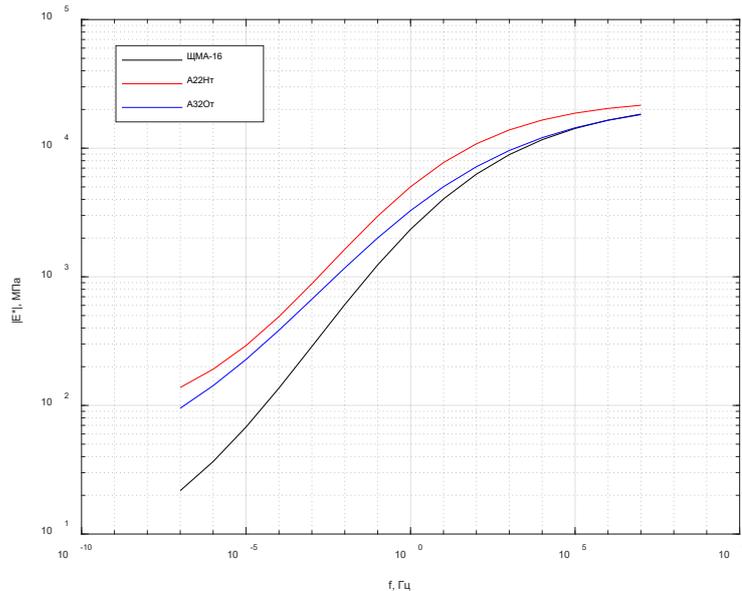


Рис. 3. - Мастер кривые асфальтобетонных смесей

Результаты исследований позволили назначить для аппроксимирующей функции мастер-кривой коэффициенты, приведенные в табл. 3:

$$\log|E^*| = d_1 + \frac{d_2}{1 + \exp(d_3 + d_4 \log f)} \quad (2)$$

Таблица №3

Коэффициенты мастер-кривых для асфальтобетонных смесей

Асфальтобетон	d_1	d_2	d_3	d_4	C_1	C_2
ЩМА-16	0.6051	3.7781	-1.0032	-0.3470	-0.1635	8.533e-04
А22Нт	1.8023	2.5809	-1.0225	-0.4168	-0.1705	7.880e-04
А32От	1.3527	3.0306	-0.9127	-0.3227	-0.1627	4.673e-04

Коэффициенты C_1 и C_2 в табл. 3 относятся к квадратичной функции температурно-временного смещения:

$$\log a_T = C_1(T - T_r) + C_2(T^2 - T_r^2), \quad (3)$$

Данная функция требуется для вычисления приведенной частоты f по реальной частоте нагрузки ν :

$$f = \frac{\nu}{a_T}. \quad (4)$$

где T_r – референсная частота, принятая равной 20°C.

Для проведения расчетов использовались свободно распространяемый программный комплекс ViscoWave и собственный расчетный комплекс, написанный на языке системы Matlab.

Программный комплекс ViscoWave [17] пригоден для расчетов перемещений во времени до 9 произвольно назначаемых точек поверхности многослойной конструкции в результате приложения к ней импульса нагрузки. Конструкция может содержать до 6 слоев, причем верхние три из них могут рассматриваться как в линейно-упругом, так и в вязкоупругом вариантах. В качестве входной информации комплекс ViscoWave требует задания модулей упругости для линейно-упругих слоев и коэффициентов мастер-кривой для вязкоупругих слоев, коэффициентов Пуассона, плотностей и коэффициентов демпфирования материалов всех слоев, толщин слоев, а также зависимости давления от времени в импульсе нагрузки с шагом 0.2 мс. В качестве результатов прямого расчета комплекс ViscoWave возвращает табличные зависимости перемещений от времени для всех назначенных точек поверхности в диапазоне времени от 0 до 60 мс.

Собственный программный комплекс на языке Matlab производит прямой и обратный расчет линейно-упругой конструкции и реализует метод, основанный на интегральных преобразованиях Ханкеля. Для ускорения вычисления несобственных интегралов от осциллирующих функций применяется метод Шенкса [7]. Для обратного расчета используется метод оптимизации Левенберга-Марквардта. Программный комплекс соответствует методике расчета многослойных дорожных одежд, изложенной в ГОСТ Р 59918-2021.

Результаты расчетов

На первом этапе расчетов с помощью ViscoWave вычисляется чаша прогибов (совокупность максимальных перемещений 9 точек поверхности, расположенных на стандартных для УДН расстояниях 0 м, 0.2 м, 0.3 м, 0.45 м, 0.6 м, 0.9 м, 1.2 м, 1.5 м и 1.8 м от центра приложения нагрузки) для вязкоупругой модели асфальтобетона. Вязкоупругие свойства задавались лабораторно определенной зависимостью абсолютного значения динамического модуля релаксации $|E^*(\nu, T)|$ от частоты и температуры. Вычисления выполнялись для двух форм импульса нагрузки – стандартной половины косинуса (нагрузка *Standard*) и двухвершинной кривой (нагрузка *Real*). Последняя кривая была получена на испытаниях, проведенных с использованием отечественной УДН «Дина-4М» производства группы компаний «СДТ» г. Саратов, на похожей по конструктиву автодороге М-5 (рис. 4).

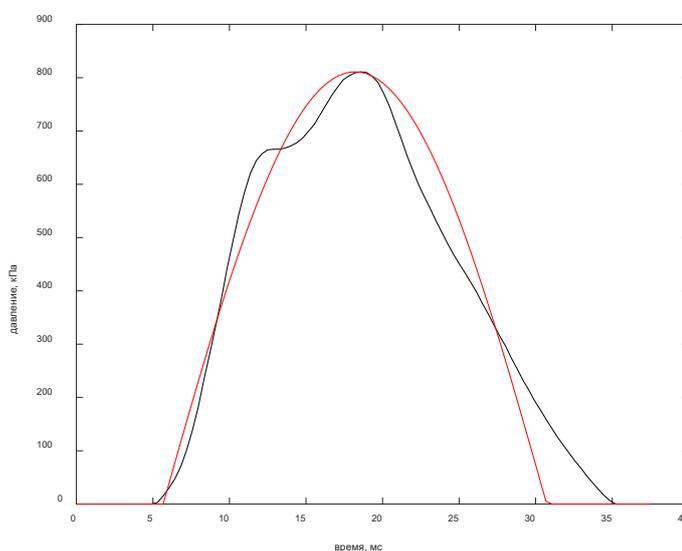


Рис. 4. - Профили импульсов нагрузки (*Standard* – красный, *Real* - черный)

Для возможности сравнения, формы импульсов были отмасштабированы так, чтобы максимальные давления (811 кПа, соответствующие нагрузке 57.5 кН) и площади под кривыми совпадали; при этом длительность половины косинуса принята равной 30 мс, наиболее типичному значению для УДН.

Температуры слоев асфальтобетона варьировались от 7°C до 37°C, оставаясь при этом внутри лабораторного диапазона 0°C – 40°C, принятого в АМРТ-тестах.

На втором этапе программа оптимизации в Matlab-комплексе, в котором асфальтобетон считается линейно-упругим, подбирает модуль упругости E асфальтобетона таким образом, чтобы линейно-упругая чаша прогибов (2 этап), была наиболее близка к вязкоупругой чаше (1 этап) по методу наименьших квадратов; при этом варьируется только модуль упругости асфальтобетона при неизменных прочих параметрах конструкции.

На третьем этапе определяется эффективная (доминантная) частота ν_{eff} из условия равенства абсолютного значения динамического модуля релаксации модулю упругости:

$$|E^*(\nu_{eff}, T)| = E. \quad (5)$$

В первом, упрощенном варианте конструкции, три слоя асфальтобетона объединялись в единственный однородный слой той же суммарной толщины. Результаты расчетов сведены в табл. 4 (для смеси ЩМА-16) и табл. 5 (для смеси А22Нт).

Таблица № 4

Результаты определения эффективной частоты для слоя асфальтобетона
ЩМА-16, толщиной 24 см

Нагрузка	T, °C	Линейно-упругая чаша прогибов D1-D9, мм						E, МПа	ν_{eff} , Гц
1	2	3						4	5
<i>Real</i>	37	0.435	0.324	0.279	0.234	0.202	0.158	1310	10.9
		0.128	0.106	0.090					
	27	0.347	0.284	0.254	0.219	0.191	0.151	2523	9.80
		0.123	0.102	0.087					
	17	0.283	0.247	0.228	0.202	0.180	0.144	4771	9.07
		0.119	0.099	0.084					
	7	0.238	0.216	0.203	0.184	0.167	0.137	8273	8.66
		0.114	0.095	0.081					

<i>I</i>	2	3						4	5
<i>Standard</i>	37	0.451	0.338	0.292	0.246	0.213	0.167	1255	9.42
		0.136	0.113	0.096					
	27	0.360	0.297	0.266	0.230	0.202	0.161	2440	8.60
		0.131	0.109	0.093					
	17	0.296	0.260	0.239	0.213	0.190	0.153	4640	7.90
		0.126	0.105	0.090					
	7	0.249	0.228	0.214	0.195	0.176	0.145	8135	7.69
		0.121	0.101	0.086					

Таблица № 5

Результаты определения эффективной частоты для слоя асфальтобетона
А22Нт, толщиной 24 см

Нагрузка	T, °C	Линейно-упругая чаша прогибов D1-D9, мм						E, МПа	ν_{eff} , Гц
<i>Real</i>	37	0.336	0.279	0.250	0.216	0.190	0.151	2785	10.5
		0.123	0.102	0.086					
	27	0.276	0.243	0.224	0.199	0.178	0.144	5157	9.80
		0.118	0.099	0.084					
	17	0.232	0.212	0.199	0.181	0.165	0.136	8962	9.55
		0.113	0.095	0.081					
	7	0.203	0.189	0.180	0.166	0.153	0.128	13513	8.67
		0.108	0.092	0.078					
<i>Standard</i>	37	0.350	0.291	0.263	0.228	0.201	0.159	2682	9.08
		0.130	0.108	0.092					
	27	0.288	0.255	0.236	0.211	0.188	0.152	5033	8.72
		0.125	0.105	0.089					
	17	0.244	0.223	0.211	0.192	0.174	0.144	8756	8.18
		0.120	0.101	0.086					
	7	0.213	0.199	0.190	0.176	0.162	0.136	13444	8.21
		0.115	0.097	0.083					

Из табл. 4 и 5 видно, что, несмотря на существенное, более чем двукратное, различие вычисленных модулей упругости для смесей ЩМА-16 и А22Нт при одной и той же температуре, значения эффективных частот оказываются близкими. Средние значения эффективной частоты для диапазона температур асфальтобетона 7°C – 27°C, в котором чаще всего производятся испытания с использованием УДН, для профиля нагрузки *Real* равны 9.18 Гц (ЩМА-16) и 9.34 Гц (А22Нт). Для профиля нагрузки *Standard*

эффективные частоты также оказываются близкими, но немного меньшими: 8.06 Гц (ЩМА-16) и 8.37 Гц (А22Нт). Уменьшение эффективной частоты при переходе от гладкого профиля *Real* к кусочно-гладкому *Standard* можно объяснить, по-видимому, некоторым увеличением в спектре доли низких частот, которым соответствуют меньшие значения модуля релаксации. Заметим, что по мере увеличения температуры асфальтобетона скорость роста эффективной частоты несколько увеличивается для всех видов нагрузки и смесей. Расчеты также показывают, что уменьшение толщины асфальтобетонного слоя с 24 см до 16 см приводит к увеличению эффективной частоты примерно на 8%.

Во втором варианте рассматривается более сложная модель, содержащая 3 слоя асфальтобетона в соответствии с табл. 2. Каждый слой имеет собственную зависимость модуля релаксации от частоты; более того, под воздействием суточных колебаний температуры воздуха, солнечной радиации и осадков в асфальтобетонных слоях может присутствовать значительная неоднородность распределения температуры по глубине [18]. Поэтому возникает потребность в выражении для вычисления усредненного модуля релаксации E_{mean}^* для всего пакета из 3 асфальтобетонных слоев, для сравнения его с найденным в ходе расчетов модулем упругости E .

Если предположить, что сложное напряженно-деформированное состояние в наиболее нагруженной при испытаниях УДН зоне асфальтобетона – непосредственно под нагрузочной плитой – при максимальном огрублении сводится к состоянию осевого сжатия, тогда многослойная конструкция становится эквивалентной системе нескольких последовательно соединенных пружин. Как известно, жесткость системы параллельно соединенных пружин получается непосредственным сложением жесткостей отдельных пружин, в то время как при последовательном соединении обратная жесткость системы есть сумма обратных жесткостей

отдельных пружин. Весовые коэффициенты модулей релаксации в первом приближении естественно принять пропорциональными толщинам слоев – в результате приходим к выражению:

$$E_{mean}^* = \left(\frac{\sum_k h_k / E_k^*}{\sum_k h_k} \right)^{-1}, \quad (6)$$

где h_k – толщина k -го слоя; E_k^* –модуль релаксации k -го слоя, вычисленный по лабораторно определенной мастер-кривой для выбранной эффективной частоты ν_{eff} и известной средней температуре k -го слоя.

Выбирая $\nu_{eff} = 9.18$ для нагрузки *Real*, $\nu_{eff} = 8.06$ для нагрузки *Standard* и считая, для первого приближения, распределение температуры по толщине однородным, вычислим усредненный модуль релаксации согласно (6), сведя результаты расчетов в табл. 6.

Таблица № 6

Результаты определения эффективной частоты для слоев
 асфальтобетона ЦМА16 (5 см) + А22Нт (9 см) + А32От (10 см)

Нагрузка	T, °C	Линейно-упругая чаша прогибов D1-D9, мм					E, МПа	E_{mean}^* , МПа
<i>Real</i>	37	0.387	0.304	0.267	0.227	0.197	1827	1799
		0.155	0.126	0.104	0.088			
	27	0.316	0.267	0.242	0.212	0.186	3371	3495
		0.149	0.121	0.101	0.086			
<i>Standard</i>	17	0.264	0.235	0.218	0.195	0.175	5957	6370
		0.142	0.117	0.097	0.083			
	7	0.227	0.208	0.196	0.179	0.163	9583	10320
		0.135	0.112	0.094	0.080			
<i>Standard</i>	37	0.400	0.316	0.279	0.238	0.207	1772	1741
		0.164	0.133	0.111	0.094			
	27	0.329	0.280	0.254	0.223	0.197	3268	3399
		0.157	0.129	0.107	0.091			
<i>Standard</i>	17	0.276	0.246	0.229	0.206	0.185	5839	6235
		0.150	0.124	0.104	0.088			
	7	0.238	0.219	0.207	0.189	0.172	9445	10160
		0.143	0.119	0.100	0.085			

Отличие расчетного модуля упругости E от определенного по лабораторным данным усредненного модуля релаксации E_{mean}^* для температур от 7°C до 37°C не превосходит 8% (табл. 6, рис. 5). Это можно считать хорошим результатом с учетом того, что лабораторно определенные модули релаксации между образцами одной и той же асфальтобетонной смеси могли отличаться до 30%. Заметим, что модуль упругости E вычисляется для конструкции, в которой все слои асфальтобетона объединены в единственный однородный слой.

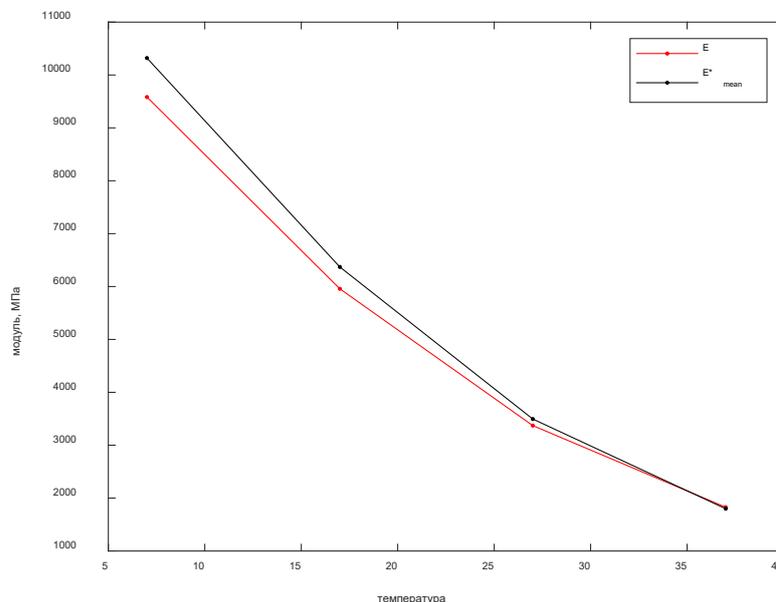


Рис. 5 - Зависимости E и E_{mean}^* от температуры для профиля нагрузки *Real*

Чтобы убедиться, что обнаруженная близость значений E и E_{mean}^* не есть исключительное свойство рассматриваемой многослойной конструкции, были проведены соответствующие вычисления при значительных (от 20% до 50%) вариациях толщин h_k и модулей упругости E_k каждого из несвязных слоев и грунта. Установлено, что изменение модуля упругости E во всех случаях не превышало 3%. В частности, в табл. 7 приведены модули упругости E , соответствующие конструкции с нагрузкой *Real*; нижние индексы соответствуют номерам слоев из табл. 2. Отметим, что

предложенный метод работает и в особом случае конечной толщины последнего слоя ($h_6=99$ см). Стандартная методика обратного расчета, изложенная в ГОСТ Р 59918-2021 безальтернативно предполагает, что толщина последнего, грунтового слоя, является неограниченной. Однако практика расчетов, имеющих дело с чашами прогибов реальных дорожных конструкций, свидетельствует о необходимости усовершенствования стандартного расчетного алгоритма для учета конечной толщины последнего слоя.

Таблица № 7

Расчетные модули упругости асфальтобетона для различных вариантов конструкции

Вариация	-	$h_4=30.5$ см	$h_5=30.5$ см	$h_6=99$ см	$E_4=450$ МПа	$E_5=120$ МПа	$E_6=40$ МПа
E , МПа	3371	3372	3371	3426	3440	3385	3330

Таким образом, можно предположить, что и при проведении реальных испытаний вычисленный в ходе обратного расчета модуль упругости E объединенного асфальтобетонного слоя будет близок к усредненному модулю релаксации E_{mean}^* , определенному для эффективной частоты ν_{eff} импульса нагрузки УДН на основе результатов лабораторных АМРТ-тестов асфальтобетонных смесей, выполненных при строительстве дорожной одежды.

Обсуждение и выводы

Предложенный метод вычисления эффективной частоты импульса нагрузки УДН позволяет установить соответствие между лабораторно определенными вязкоупругими характеристиками множественных асфальтобетонных слоев, входящих в состав дорожной одежды, и модулем упругости, вычисленным путем обратного расчета по чаше прогиба, определенной в полевых испытаниях при помощи УДН. Проведенный численный эксперимент подтверждает, что для синтетических чаш прогиба,

сгенерированных в рамках вязкоупругой расчетной модели, отличие модуля упругости от усредненного модуля релаксации, вычисляемого согласно (6), не превосходит 8%. Отметим, что использование частоты 30 Гц в качестве эффективной, как рекомендуется западными стандартами [14], ведет к завышению вычисляемого модуля как минимум на 30%-40%, что подтверждается исследованием [15]. Метод работоспособен при широких вариациях мастер-кривых модуля релаксации отдельных слоев, при произвольном распределении температуры по глубине и при конечной толщине грунтового слоя.

В качестве начального значения модуля упругости на момент строительства следует принять усредненный модуль релаксации E_{mean}^* , определенный по формуле (6) для эффективной частоты ν_{eff} , выбранной в диапазоне от 8 Гц до 10 Гц. Для расчета по формуле (6) требуется знание толщин слоев асфальтобетона h_k и зависимостей от температуры и частоты динамического модуля релаксации $|E_k^*(\nu, T)|$ асфальтобетонной смеси каждого k -го слоя, определенных, например, по стандартной методике АМРТ. Для большой суммарной толщины асфальтобетонных слоев (> 22 см) и кусочно-гладкого профиля импульса нагрузки УДН следует выбирать $\nu_{eff} = 8$ Гц. Для малой суммарной толщины асфальтобетонных слоев (< 18 см) и полностью гладкого профиля импульса нагрузки УДН рекомендуется $\nu_{eff} = 10$ Гц. В остальных случаях можно использовать универсальное значение $\nu_{eff} = 9$ Гц. Уменьшение расчетного модуля упругости в процессе эксплуатации более чем на 20% в сравнении с его начальным значением может свидетельствовать о накоплении поврежденности в асфальтобетонных слоях, однако оценка остаточного ресурса дорожной одежды выходит за рамки данного исследования.

Как видно из рис. 5, расчетный модуль упругости при низких температурах дает несколько заниженную оценку усредненного модуля релаксации, что может быть исправлено введением корректировочных коэффициентов в формулу (6) по результатам сопоставительных расчетов. В рамках продолжения исследований планируется проверка предложенного метода на реальных чашах прогиба, полученных на действующих дорожных одеждах.

Финансирование

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

Литература

1. Тиратуриян А. Н., Ольховой С. А. Оценка деградации прочности нежестких дорожных конструкций на основе натуральных измерений на участке автомобильной дороги М4 "Дон" п.Тарасовский // Инженерный вестник Дона, 2017, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4160.
2. Тиратуриян А. Н., Симакова А. А., Бодров И. В., Фарниева М. В. Оценка надежности дорожной одежды на стадии эксплуатации // Инженерный вестник Дона, 2017, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4509.
3. Тиратуриян А. Н., Углова Е. В., Ляпин А. А. Энергетический метод определения остаточного ресурса нежестких дорожных одежд на стадии эксплуатации // Дефектоскопия, 2020. № 10. С. 71-80.
4. Симчук Е. Н., Кадыров Г. Ф., Симчук А. Е. Совершенствование методов испытаний асфальтобетонных смесей и асфальтобетона в дорожной отрасли РФ // Путьевой навигатор, 2023. № 56(82). С. 52-59.
5. Радовский Б.С., Телтаев Б.Б. Вязкоупругие характеристики битума и их оценка по стандартным показателям // Алматы: "Білім" баспасы, 2013. 152 с.
6. Ayuaya, D., H. S. Lee, and H. L. Von Quintus. 2018. Characterizing Existing Asphalt Concrete Layer Damage for Mechanistic Pavement Rehabilitation Design. Publication FHWA-HRT-17-059. FHWA, U.S. Department of Transportation.

7. Бочкарев А.В., Землянухин А.И. Обратное вычисление послойных модулей упругости дорожных одежд // Вестник Саратовского государственного технического университета, 2022. № 3(94). С. 5–18.
8. Kim Y. Richard, Zhe Zeng, Kangjin Lee. Backcalculation of Dynamic Modulus from Falling Weight Deflectometer Data. NCDOT Project 2017-03, Dept. of Civil, Construction, & Environmental Engineering North Carolina State University, 2021.
9. Горский М. Ю., Симчук Е. Н., Кадыров Г.Ф., Бочкарев А. В. Совершенствование методики расчета упругих параметров многослойных дорожных одежд // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2025. № 4. С. 56-64.
10. AASHTOWare Backcalculation Tool, ВcТ. User manual for pavement M-E deflection data analysis and backcalculation tool. Version 1.1.5. September 16, 2021.
11. ARA, Inc. (2004). Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP Project 1-37A, National Cooperative Highway Research Program, Washington, DC.
12. Lasdon, L.S., Waren, A.D., Jain, A., and Ratner, M. (1976). Design and Testing of a Generalized Reduced Gradient Code for Nonlinear Programming, Technical Report SOL 76-3, Systems Optimization Laboratory, Stanford University, Stanford, CA.
13. Von Quintus, H.L. and Killingsworth, B. (1998). Analyses Relating to Pavement Material Characterizations and Their Effects on Pavement Performance, Report No. FHWA-RD-97-085, Federal Highway Administration, Washington, DC.
14. Applied Research Associates, University of Minnesota, and Arizona State University. (2006). Changes to the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Software through Version 0.900, NCHRP Research Results Digest 308, National Cooperative Highway Research Center, Washington, DC.

15. Al-Qadi, I.L., Xie, W., and Elseifi, M.A. (2008). “Frequency Determination from Vehicular Loading Time Pulse to Predict Appropriate Complex Modulus in MEPDG,” Journal of the Asphalt Paving Technologists Association, 77, pp. 739–772, Association of Asphalt Paving Technologists, Lino Lakes, MN.
16. Guide for Mechanical-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Part 2. Design Inputs, Chapter 2. Material Characterization. USA, 2004.
17. Hyung Suk Lee. Dynamic Backcalculation of Flexible Pavement Layer Parameters and Moving Load Simulation —White Paper: An Initial Study. 2016. URL: researchgate.net/publication/311982513.
18. Горский М.Ю., Симчук Е.Н., Бочкарев А.В. Моделирование температурных полей в многослойных дорожных одеждах на основе данных мониторинга // Вестник Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ", 2024. Т. 13. № 3. С. 142-153.

References

1. Tiraturyan A. N., Ol`xovoj S. A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4160.
2. Tiraturyan A. N., Simakova A. A., Bodrov I. V., Farnieva M. V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4509.
3. Tiraturyan A. N., Uglova E. V., Lyapin A. A. Defektoskopiya, 2020. № 10. pp. 71-80.
4. Simchuk E. N., Kady`rov G. F., Simchuk A. E. Putevoj navigator, 2023. № 56. pp. 52-59.
5. Radovskij B.S., Teltaev B.B. Vyazkouprugie karakteristiki bituma i ix ocenka po standartny`m pokazatelyam [Viscoelastic characteristics of bitumen and

their assessment using standard indicators], Almaty`. “Bilim” baspasy`, 2013. 152 p.

6. Ayyala, D., H. S. Lee, and H. L. Von Quintus. 2018. Characterizing Existing Asphalt Concrete Layer Damage for Mechanistic Pavement Rehabilitation Design. Publication FHWA-HRT-17-059. FHWA, U.S. Department of Transportation.

7. Bochkarev A.V., Zemlyanuxin A.I. Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta, 2022. № 3. pp. 5–18.

8. Kim Y. Richard, Zhe Zeng, Kangjin Lee. Backcalculation of Dynamic Modulus from Falling Weight Deflectometer Data. NCDOT Project 2017-03, Dept. of Civil, Construction, & Environmental Engineering North Carolina State University, 2021.

9. Gorskiy M. Yu., Simchuk E. N., Kady`rov G.F., Bochkarev A. V. Pribory` i sistemy`. Upravlenie, kontrol`, diagnostika. 2025. № 4. pp. 56-64.

10. AASHTOWare Backcalculation Tool, BcT. User manual for pavement m-e deflection data analysis and backcalculation tool. Version 1.1.5. September 16, 2021.

11. ARA, Inc. (2004). Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP Project 1-37A, National Cooperative Highway Research Program, Washington, DC.

12. Lasdon, L.S., Waren, A.D., Jain, A., and Ratner, M. (1976). Design and Testing of a Generalized Reduced Gradient Code for Nonlinear Programming, Technical Report SOL 76-3, Systems Optimization Laboratory, Stanford University, Stanford, CA.

13. Von Quintus, H.L. and Killingsworth, B. (1998). Analyzes Relating to Pavement Material Characterizations and Their Effects on Pavement Performance, Report No. FHWA-RD-97-085, Federal Highway Administration, Washington, DC.

14. Applied Research Associates, University of Minnesota, and Arizona State University. (2006). Changes to the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Software through Version 0.900, NCHRP Research Results Digest 308, National Cooperative Highway Research Center, Washington, DC.

15. Al-Qadi, I.L., Xie, W., and Elseifi, M.A. (2008). “Frequency Determination from Vehicular Loading Time Pulse to Predict Appropriate Complex Modulus in MEPDG,” Journal of the Asphalt Paving Technologists Association, 77, pp. 739–772, Association of Asphalt Paving Technologists, Lino Lakes, MN.

16. Guide for Mechanical-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Part 2. Design Inputs, Chapter 2. Material Characterization. USA, 2004.

17. Hyung Suk Lee. Dynamic Backcalculation of Flexible Pavement Layer Parameters and Moving Load Simulation —White Paper: An Initial Study. 2016. URL: researchgate.net/publication/311982513.

18. Gorskiy M.Yu., Simchuk E.N., Bochkarev A.V. Vestnik Nacional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta MIFI, 2024. T. 13. № 3. pp. 142-153.

Дата поступления: 2.08.2025

Дата публикации: 25.09.2025