

doi: 10.5862/MCE.54.8

## Моделирование изменения модуля упругости асфальтобетона при нагружении

*К.ф.-м.н., доцент А.М. Кириллов;  
д.т.н., профессор М.А. Завьялов,  
Сочинский государственный университет*

**Аннотация.** Начиная с тридцатых годов прошлого века деформационные и силовые критерии были определяющими в методах расчета нежестких дорожных одежд (модуль деформации, калифорнийское число, модуль упругости). За почти столетнюю историю были накоплены значительные статистические данные изменений указанных показателей в слоях дорожных конструкций. Однако физическая сущность этих изменений и их закономерности до сих пор остаются нераскрытыми. Последнее десятилетие показало, что использование в отрасли автомобильных дорог энергетических критериев по сравнению с силовыми и деформационными более универсально, несет в себе прогностическую функцию, позволяет не только интегрально и комплексно оценить функциональное состояние дорожного покрытия, но и управлять этим состоянием в процессе эксплуатации. Несмотря на это, в современных нормативных документах до сих пор одной из главных характеристик асфальтобетона является деформационный показатель – модуль упругости.

Однако и сейчас нет надежного подхода, позволяющего определить изменение модуля упругости асфальтобетона при эксплуатации. До сих пор отсутствуют четкие зависимости изменения соотношений между статическими и динамическими модулями упругости асфальтобетона в процессе эксплуатации дорожного покрытия. Изменение модуля упругости как частного показателя может быть использовано при расчете вариации энергетических функций; модуль упругости является эквивалентом величине давления и таким образом использован в методике назначения научно обоснованных сроков ремонтных работ.

В данной публикации авторы попытались смоделировать изменения модуля упругости асфальтобетона при нагружении, анализируя предложенную вязкоупругую модель. Получены результаты, в частности аналитические зависимости, которые могут лечь в основу новых нормативных документов по проектированию дорожных асфальтобетонных покрытий.

**Ключевые слова:** асфальтобетон; модуль упругости; дорожное покрытие; эксплуатационное состояние; динамическое воздействие

### *Введение*

Современный подход к конструированию нежестких дорожных одежд предусматривает их расчет на прочность по трем критериям: допусжаемому упругому прогибу, сдвигоустойчивости грунта и конструктивных слоев, сопротивлению монолитных слоев усталостному разрушению от растяжения при изгибе. На начальном этапе толщины конструктивных слоев назначают по первому критерию. Эмпиризм такого подхода связан с известными зависимостями требуемого общего модуля упругости конструкции от суммарного расчетного числа приложений нагрузки за срок службы дорожной одежды. Эти зависимости были получены на основе статистической обработки результатов многократных испытаний на дорогах. Недостаточная прочность асфальтобетона на растяжение при изгибе является одной из причин образования трещин в покрытии. Поэтому при расчетах на прочность важной характеристикой асфальтобетона является его модуль упругости.

### *Обзор литературы*

На стадии проектирования модуль упругости асфальтобетона назначают по таблице [1, табл. П. 3.2], но в дальнейшем при строительстве соответствие выбранных значений фактическим модулям упругости асфальтобетона, укладываемого в дорожное покрытие, не контролируется. Возможный диапазон колебаний модуля упругости асфальтобетона в зависимости от свойств битума, природных условий и гранулометрического состава минеральной части смеси может быть весьма значителен даже в смеси одного типа [2]. Кроме того, упругие вертикальные деформации от кратковременных динамических нагрузок всегда меньше, чем упругие деформации от тех же нагрузок, действующих статически, соответственно, динамические модули упругости всегда выше статических. Согласно нормативным документам теория расчета Кириллов А.М., Завьялов М.А. Моделирование изменения модуля упругости асфальтобетона при нагружении

предусматривает, что требуемый общий модуль упругости покрытия увеличивается с ростом интенсивности движения в соответствии с известной логарифмической зависимостью [3]. Это означает, что упругий прогиб покрытия по мере увеличения числа приложения нагрузки увеличивается также по логарифмическому закону. Указанный процесс в существующей методике расчета рассматривается как результат развития усталостных явлений при многократном нагружении. Однако физическая сущность этого процесса применительно к дорожным асфальтобетонным покрытиям до конца не раскрыта, в связи с чем трудно оценить степень развития усталостных процессов в реальных условиях эксплуатации, относительно которых предполагается принимать решения о ремонте и назначении его сроков.

За рубежом уже более сорока лет упругие свойства асфальтобетонов характеризуют комплексным динамическим модулем, который изначально был предложен в виде корреляционной зависимости модуля упругости асфальтобетона от гранулометрического состава заполнителя, содержания вяжущего, пор и времени нагружения [4]. Затем эта корреляционная зависимость, которую в последнее время в дорожной литературе называют моделью М. Витчака (M.W. Witczak), была несколько раз скорректирована [5, 6], но ее эмпирическая природа, а также громоздкость аналитического выражения в стремлении суммировать как можно больше параметров и коэффициентов различной природы оставались неизменными.

Многочисленные зарубежные исследования динамического модуля асфальтобетонов в основном сводились к определению экспериментальным путем значений модулей упругости и их сравнению со значениями, вычисленными по эмпирической модели М. Витчака [7–9]. Одной из основных целей таких работ являлась возможность предсказания степени колееобразования [10]. К сожалению, анализ результатов проведенных исследований давал большой разброс полученных значений для асфальтобетонов одного вида из соответствующих слоев покрытия [11, 12]. Например, недавние репрезентативные данные, опубликованные в статьях [13, 14], посвященных определению и оценке динамического модуля асфальтобетонов, показывают, что для всех рассмотренных асфальтобетонов из смесей различных составов отношение измеренного динамического модуля к вычисленному (предсказанному) находится в пределах от 0,49 до 1,9.

Все это вызывает затруднения при интерпретации результатов оценки несущей способности дорожных одежд по величине их общего модуля упругости, определяемого при диагностике состояния дорог, – задачи в настоящее время актуальной [15]. Сложность заключается в том, что по зафиксированной величине общего модуля упругости эксплуатируемой дорожной одежды трудно судить о реальной степени ее деградации и об интенсивности разрушения. Решением данной проблемы может стать построение и анализ модели, описывающей поведение модуля упругости асфальтобетона в течение жизненного цикла дорожного покрытия. Таким образом, из вышесказанного следует, что задача установления изменения соотношений между статическими и динамическими модулями упругости в процессе эксплуатации дорожного покрытия является актуальной. Анализ полученных зависимостей будет ключом к пониманию закономерностей изменения модуля упругости асфальтобетона во времени и позволит осуществить научно обоснованное прогнозирование долговечности покрытия. Одной из важных задач при решении поставленной проблемы является необходимость определения изменений модуля упругости асфальтобетона при циклических динамических воздействиях.

### *Постановка задачи*

Поведение модуля упругости асфальтобетона, т. е. его уменьшение с увеличением времени воздействия [16], можно на элементарном уровне объяснить следующим образом. При кратковременном воздействии модуль упругости близок к модулю упругости минерального заполнителя (т. к. его доля более 90 %), проявляющего себя в этом случае в большей степени (например, для мрамора или гранита это 35000–50000 МПа). При долговременном же воздействии начинают сказываться вязкостные свойства битума (~ 100 МПа).

Если исследования проводить в области линейной вязкоупругости, то модуль упругости  $E$ , определяемый в этой области, не зависит от уровня силового воздействия, но зависит от времени воздействия нагрузки или скорости (частоты) деформирования.

В работе [17] предложена реологическая модель асфальтобетона для описания его деформационного поведения под действием постоянного напряжения. Было получено уравнение для функции податливости в виде:

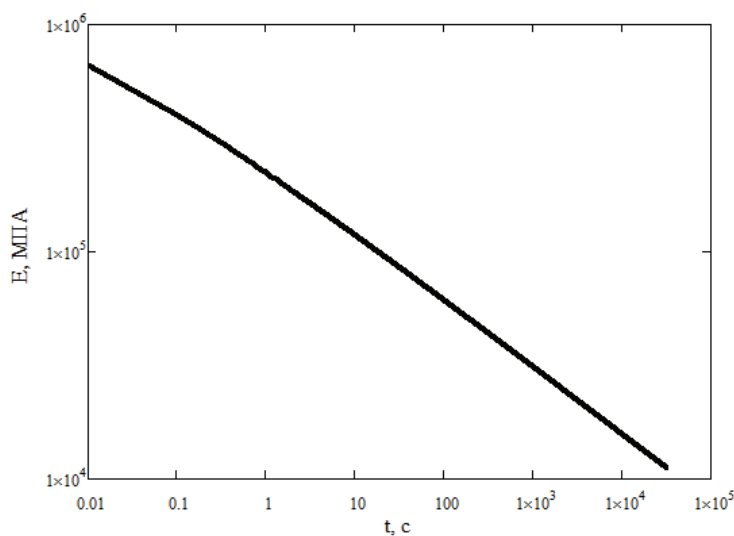
$$I(t) = \frac{I_0 + At^p}{1 + E_\infty I_0 + E_\infty At^p}, \quad (1)$$

где  $I_0$  – мгновенная податливость;  $E_\infty$  – статический (длительный или равновесный) модуль упругости;  $A$  – параметр, учитывающий свойства упругости и вязкости;  $p$  – коэффициент пластичности;  $t$  – время развития деформации  $\varepsilon$  под действием напряжения  $\sigma$ .

Так как  $E = 1/I$ , то из выражения (1) можно получить выражение для зависимости модуля упругости от времени воздействия:

$$E(t) = E_\infty + \frac{1}{I_0 + At^p}. \quad (2)$$

График, построенный по данным [17, 18], представлен на рисунке 1.



**Рисунок 1. Модуль упругости асфальтобетона в зависимости от времени воздействия: битум I структурного типа,  $t = 10^\circ\text{C}$ ,  $E_\infty = 50$  МПа,  $I_0 = 5 \cdot 10^{-7}$  МПа $^{-1}$ ,  $p = 0.31$ ,  $A = 10^{-5.4}$  МПа $^{-1}$**

График модуля упругости (рис. 1) качественно совпадает с графиками, представленными в работе [16]. Однако количественно значения модуля упругости, рассчитанные по формуле (2), превышают представленные в работе [16] приблизительно на один-два порядка (для одинакового времени воздействия).

С учетом этого построим альтернативную модель, описывающую поведение модуля упругости асфальтобетона в зависимости от времени воздействия на него.

### Описание исследования

Асфальтобетон можно представить как набор тел (гранул минерального заполнителя), находящихся в вязкой среде битумного вяжущего. В этом случае уравнение движения гранулы массой  $m$  под действием нагрузки  $F$  от движущегося транспорта с учетом вязкого сопротивления можно записать в виде:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -b \frac{dx}{dt} - kx + F(t), \quad (3)$$

где  $x$  – смещение гранулы;  $b$  – коэффициент, учитывающий вязкие свойства среды (модуль вязкости, Н·с/м);  $k$  – коэффициент, характеризующий упругие свойства среды (модуль жесткости, Н/м).

Если в спектре  $F(t)$  учесть только первую гармонику с амплитудой  $F_0$  и частотой  $\Omega$ , а также считать коэффициенты  $b$  и  $k$  постоянными, то решение уравнения (3) будет представлять собой гармоническую функцию времени с амплитудой

Кириллов А.М., Завьялов М.А. Моделирование изменения модуля упругости асфальтобетона при нагружении

$$A = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\Omega^2)^2 + b^2\Omega^2}}. \quad (4)$$

Закон Гука в дифференциальной форме позволяет определить модуль упругости:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad (5)$$

Т. к.  $\varepsilon \sim A$ , а продолжительность действия нагрузки можно оценить в четверть периода  $t \sim \pi/(2\Omega)$ , то с учетом соотношений (4) и (5) для модуля упругости можно получить выражение вида (с точностью до коэффициента  $c$ , зависящего от геометрии взаимодействующих объектов и имеющего размерность  $\text{м}^{-1}$ ):

$$E(t) = c \cdot \sqrt{\left(k - \frac{\pi^2 m}{4t^2}\right)^2 + b^2 \frac{\pi^2}{4t^2}}. \quad (6)$$

При статическом воздействии ( $t \rightarrow \infty$ ) модуль упругости  $E(t) \rightarrow E_\infty$ . Таким образом, из выражения (6) следует, что произведение  $c \cdot k = E_\infty$ . Учитывая последнее обстоятельство, соотношение (6) можно привести к виду:

$$E(t) = E_\infty \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{\pi^2 m}{4kt^2}\right)^2 + \left(\frac{\pi b}{2kt}\right)^2}. \quad (7)$$

С помощью выражения (7) можно объяснить уменьшение модуля упругости с повышением температуры. Как известно, вязкость  $\eta \sim e^{1/T}$ . В свою очередь, коэффициент сопротивления среды  $b \sim \eta$ . Таким образом, при повышении температуры вязкость битума уменьшается, что приводит к уменьшению коэффициента сопротивления среды  $b$ . А это, согласно выражению (7), приведет к уменьшению модуля упругости.

Известно, что модуль упругости для крупнозернистого асфальтобетона меньше, чем для мелкозернистого. Такое поведение модуля упругости также можно объяснить с помощью выражения (7), из которого видно, что с увеличением массы  $m$  зерна асфальтобетона модуль упругости должен уменьшаться.

Основные недостатки представленной модели: во-первых, отсутствие учета взаимосвязи между телами (гранулами) при их движении под действием внешней нагрузки (считается, что их движения независимы друг от друга); во-вторых, учет в спектре силы  $F(t)$  только первой гармоники. Однако асфальтобетон представляет собой систему связанных тел и необходим учет их взаимодействия, а частотный спектр силового воздействия непрерывный. В этом усматривается перспектива для дальнейшего развития предложенной модели. Кроме того, замеряемый при синусоидальном нагружении [19] модуль упругости можно представить комплексной величиной  $E^*$ , состоящей из действительной  $E'$  и мнимой  $E''$  частей:

$$E^* = E' + i \cdot E'', \quad (8)$$

где  $E^*$  – комплексный модуль упругости асфальтобетона;  $E'$  – упругий модуль или модуль эластичности;  $E''$  – модуль потерь или вязкий модуль.

Кривая комплексного модуля упругости позволяет установить расчетный модуль упругости асфальтобетона в зависимости от температурно-временных условий деформирования, имеющих место при эксплуатации дорожного покрытия. Вязкоупругие свойства битума являются определяющими для реологических свойств асфальтобетона. Так как модуль  $|E^*| = \sqrt{(E')^2 + (E'')^2}$ , то, сравнив его с (7), можно предположить, что выражение (7) определяет абсолютную величину комплексного модуля упругости, а первое и второе слагаемые в (7) – упругий и вязкий модули соответственно.

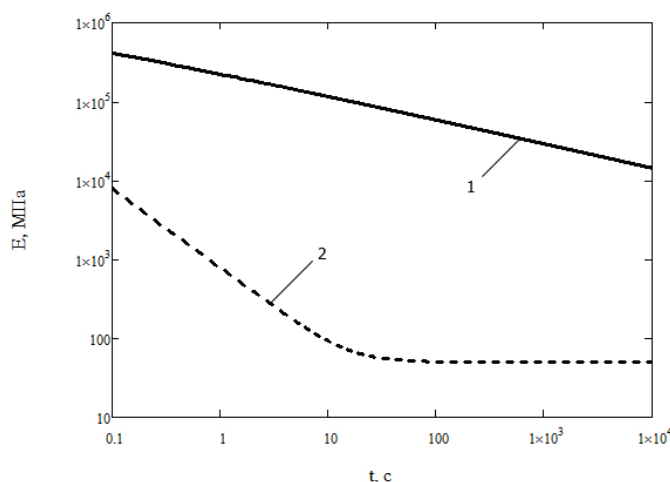
Численные расчеты, выполненные по выражению (7), показали, что при временах воздействия  $t > 10^{-5}$  с, что имеет место в реальном режиме эксплуатации, модуль упругости можно выразить как

$$E(t) = E_{\infty} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\pi b}{2kt}\right)^2} \quad (9)$$

Анализ выражения (9) и дальнейшие расчеты позволяют сделать вывод о том, что динамический модуль упругости  $E(t)$  зависит не отдельно от значений модуля жесткости  $k$  и модуля вязкости  $b$ , а от их отношения  $b/k$ . Таким образом, при одинаковом отношении  $b/k$  и других прочих равных условиях модуль упругости будет принимать идентичное значение.

На рисунке 2 представлен график зависимости мгновенного модуля упругости от времени силового воздействия. Кривая 1 построена по реологической модели (2), кривая 2 – по вязкоупругой модели, представленной выражением (7). Отметим, что рассмотренная в [17] реологическая модель является эвристической (феноменологической), а предложенная в данной работе модель – теоретическая.

Выше было сказано о превышении значений модуля упругости, рассчитанных по реологической модели, над значениями, представленными в работе [16]. Из рисунка 2 можно видеть, что значения  $E(0,1) \sim 10000$  Па и  $E(1) \sim 1000$  Па и они по порядку величины совпадают с представленными в [16, рис. 2]. Кроме того, реологическая модель предсказывает выход модуля упругости на стационар ( $E(t) = E_{\infty}$ ) при значениях времени силового воздействия, значительно превышающих время эксплуатации дорожного покрытия. Предложенная вязкоупругая модель, напротив, предсказывает достижение стационарного значения модулем упругости при значениях времени воздействия порядка  $10 \div 100$  с, что является более адекватным в условиях реального режима эксплуатации дорожного покрытия.



**Рисунок 2. Зависимость мгновенного (динамического) модуля упругости от времени воздействия нагрузки: 1 – реологическая модель ( $E_{\infty}=50$  МПа,  $I_0=5 \cdot 10^{-7}$  МПа $^{-1}$ ,  $p=0.31$ ,  $A=10^{-5.4}$  МПа $^{-1}$ ); 2 – вязкоупругая модель ( $E_{\infty}=50$  МПа,  $m=0.1$  кг,  $k=10^{11}$  Н/м,  $b=10^{12}$  Н·с/м)**

В процессе эксплуатации из-за изменения значений модулей жесткости  $k$  и вязкости  $b$ , а точнее из-за изменения их соотношения, будет изменяться время выхода модуля упругости на стационар (обозначим как  $t_{\infty}$ ) при динамическом нагружении асфальтобетона. Например, при соотношении  $b/k = 10$  с время выхода на стационар порядка 10 с (рис. 2), а при  $b/k = 100$  с – порядка 100 с. То есть можно видеть, что время выхода на стационар  $t_{\infty} \approx b/k$ . Это следует непосредственно из формулы (9), т. к. если принять  $t = b/k$ , то  $E \approx 1.86 \cdot E_{\infty}$ . Таким образом, параметр  $t_{\infty}$  можно использовать для оценки текущего состояния покрытия и прогнозирования его остаточной долговечности.

В работе [20] рассмотрен процесс релаксации напряжений после снятия внешней нагрузки с использованием реологической модели Максвелла (твердое тело рассматривается как последовательное соединение двух элементов: упругого и вязкого). Время релаксации в этой работе определено как  $\theta = \eta/E$ , где  $\eta$  – коэффициент вязкости,  $E$  – модуль упругости. В качестве примера рассмотрен песчаный асфальтобетон, имеющий при температуре +20 °С коэффициент Кириллов А.М., Завьялов М.А. Моделирование изменения модуля упругости асфальтобетона при нагружении

вязкости  $\eta = 10^6$  Н·с/мм<sup>2</sup>, модуль упругости  $E = 1500$  Н/мм<sup>2</sup> и, следовательно, время релаксации  $\theta = 10^6/1500 \approx 667$  с.

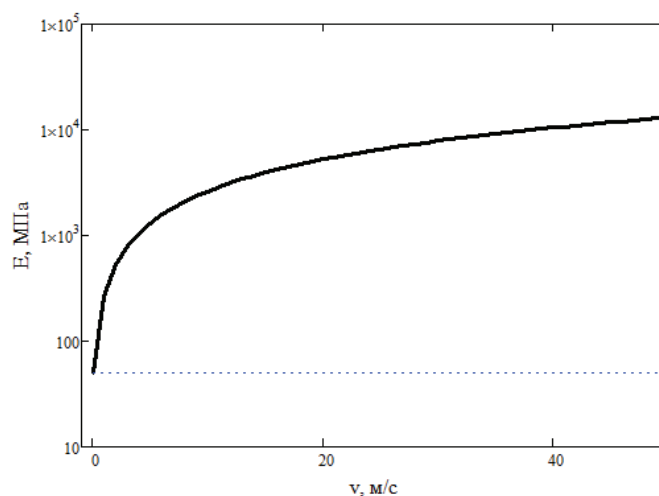
При заданных значениях  $\eta = 10^6$  Н·с/мм<sup>2</sup> и  $E=1500$  Н/мм<sup>2</sup> модуль вязкости  $b$  и модуль жесткости  $k$  можно оценить значениями  $10^{12}$  Н·с/м и  $1.5 \cdot 10^9$  Н/м, соответственно. Тогда время выхода на стационар  $t_\infty \approx b/k = 10^{12}/(1.5 \cdot 10^9) \approx 667$  с.

Подобное совпадение времен релаксации  $\theta$  и выхода на стационар  $t_\infty$  не может быть случайным и является аргументом в пользу предложенной в данной статье вязкоупругой модели. Однако не стоит преувеличивать значение подобного совпадения, т. к. время релаксации и время выхода на стационар – величины в известной степени условные. Поэтому здесь речь идет не о полном совпадении (цифра в цифру), а о совпадении порядков этих величин.

Время силового воздействия на асфальтобетон в процессе его эксплуатации зависит от скорости транспортного средства  $v$  и величины его колесной базы  $B$ . Тогда время воздействия можно приближенно оценить как  $t = B/v$ . В этом случае выражение (9) можно записать в виде:

$$E(v) = E_\infty \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{\pi b}{2 k B} \right)^2 \cdot v^2} . \quad (10)$$

Из графической интерпретации формулы (10) следует, что значение модуля упругости быстро растет от своего статического значения ( $E_\infty = 50$  МПа) в интервале скоростей от 0 до порядка 10 м/с (рис. 3). При дальнейшем же увеличении скорости относительный рост модуля упругости невелик, и модуль упругости имеет значение порядка  $10^4$  МПа. Данное поведение модуля упругости необходимо учитывать при проектировании дорог, т. к. для перегонных участков с высокой скоростью транспорта и на перекрестках, примыканиях и других участках с низкой скоростью движения условия с точки зрения модуля упругости существенно различаются.



**Рисунок 3. Зависимость динамического модуля упругости от скорости движения транспортного средства с колесной базой 3 м ( $E_\infty = 50$  МПа,  $m = 0.1$  кг,  $k = 10^{11}$  Н/м,  $b = 10^{12}$  Н·с/м)**

### Заключение

1. Построены графики зависимости динамического модуля упругости от времени силового воздействия и от скорости движения транспортного средства.
2. Получены аналитические выражения (9) и (10) для вычисления значения модуля упругости асфальтобетона в реальном времени процесса эксплуатации.
3. Выявлено, что время воздействия, при котором модуль упругости выходит на стационар, зависит от соотношения модулей вязкости и жесткости.
4. Высказано предположение о возможности использования значения времени выхода модуля упругости на стационар в качестве параметра для оценки текущего состояния покрытия и прогнозирования его остаточной прочности.
5. Полученные результаты, в частности зависимости (9), (10), могут лечь в основу новых нормативных документов по проектированию дорожных асфальтобетонных покрытий.

Кириллов А.М., Завьялов М.А. Моделирование изменения модуля упругости асфальтобетона при нагружении

## Литература

1. ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд (взамен ВСН 46-83). М.: Информавтодор, 2001. 145 с.
2. Руденский А.В. Дорожные асфальтобетонные покрытия. М.: Транспорт, 1992. 253 с.
3. ОДН 218.1.052-02. Оценка прочности нежестких дорожных одежд (взамен ВСН 52-89). М.: Информавтодор, 2002. 65 с.
4. Shook J.F., Kallas B.F. Factors Influencing Dynamic Modulus of Asphalt Concrete // Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists. 1969. Vol. 38. Pp. 140–178.
5. El-Basyouny M.M., Witczak M.W., Zapata C.E. Development of Asphalt Concrete Rutting Model Using Permanent Strain Database // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. 2005. Vol. 74. Pp. 381–442.
6. Bari J., Witczak M.W. Development of a New Revised Version of the Witczak E\* Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures // Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists. 2006. Vol. 75. Pp. 381–423.
7. Dongre R., Myers L., D'Angelo J., Paugh C., Cudimetta J. Field Evaluation of Witczak and Hirsch Models for Predicting Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. 2005. Vol. 74. Pp. 381–442.
8. Azari H., Al-Khateeb G., Shenoy A., Gibson N. Comparison Simple Performance Test IE\*I of Accelerated Loading Facility Mixtures and Prediction IE\*I Use of NCHRP 1-37A Model and Witczak's New Equations // Journal of Transportation Research Board. 1998. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC. 2007. Pp. 1–9.
9. Carvalho R., Schwartz C.W. Comparisons of Flexible Pavement Designs: AASHTO Empirical Versus NCHRP Project 1-37A Mechanistic-Empirical // Transportation Research Record 1947, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 2006. Pp. 167–174.
10. Le A.T., Lee H.J., Park H.M., Lee S.Y. Development of a Permanent Deformation Model of Asphalt Mixtures for South Korean Pavement Design Guide // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, № 2095, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, 2009. Pp. 45–52.
11. Garba R. Permanent Deformation Properties of Asphalt Concrete Mixtures. Department of Road and Railway Engineering Norwegian University of Science and Technology NTNU. 2002. 201 p.
12. Schram, S., Abdelrahman M. Improving Prediction Accuracy in Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide // Transportation Research Record 1947, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 2006. Pp. 59–68.
13. Flintsch G.W., Loulizi A., Diefenderfer S.D., Diefenderfer B.K., Galal K.A. Asphalt Material Characterization in Support of Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide Implementation in Virginia // Journal of the Transportation Research Board. 2008. No. 2057. Pp. 114–125.
14. Katicha S., Flintsch G.W., Loulizi A., Wang L. Conversion of Testing Frequency to Loading Time Applied to the Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide // Journal of the Transportation Research Board. 2008. No. 2087. Pp. 99–108.
15. Казарновский В.Д. Современные тенденции и проблемы в развитии конструкций и методов расчета дорожных одежд // Наука и техника в дорожной отрасли. 2001. №3. С. 7–8.
16. Телтаев Б.Б. Анализ расчетных значений модуля упругости асфальтобетонов // Дорожная техника. 2010. С. 130–137.
17. Золотарев В.А., Маляр В.В., Ткачук Ю.П. Реологическая модель асфальтобетона // Современное промышленное и гражданское строительство. 2006. №2. С. 103–107.
18. Золотарев В.А., Маляр В.В., Лапченко А.С. Реологические свойства асфальтополимербетонов при динамическом режиме деформирования // Наука и техника в дорожной отрасли. 2008. №1. С. 10–13.
19. Кондрашов Н.А., Шестопалов А.А. Использование модуля деформации в реологической модели уплотнения асфальтобетонной смеси при строительстве дорожных покрытий // Инженерно-строительный журнал. 2014. №7. С. 55–65.
20. Богуславский А.М., Богуславский Л.А. Основы реологии асфальтобетона. М.: Высшая школа, 1972. 200 с.

*Андрей Михайлович Кириллов, г. Сочи, Россия  
Тел. моб.: +7(918)1302257; эл. почта: kirill806@gmail.com*

*Михаил Александрович Завьялов, г. Сочи, Россия  
Тел. моб.: +7(967)6468875; эл. почта: zavyalov.m.a@gmail.com*

© Кириллов А.М., Завьялов М.А., 2015

doi: 10.5862/MCE.54.8

## Modeling of change in asphalt concrete dynamic modulus

**A.M. Kirillov**Sochi State University, Sochi, Russia  
+79181302257; e-mail: kirill806@gmail.com**M.A. Zavyalov**Sochi State University, Sochi, Russia  
+79676468875; e-mail: zavyalov.m.a@gmail.com

### Key words

asphalt concrete; dynamic module; pavement; exploitation state; dynamic influence

### Abstract

Historically, since the 1930s, deformation and power criteria were defined by methods of calculation of non-rigid road clothes (the deformation modulus, the California bearing ratio, the dynamic modulus). For almost a centenary history considerable statistical changes of the specified indicators in road layers were collected.

However, the physical essence of these changes and their regularity still remain unknown. Over the last decade in the field of auto roads the use of energy criteria has been more universal in comparison with the strength and deformation. These criteria bear in itself a predictive function, allow not only estimating integrally and complexly the pavement functional condition, but also managing this state during operation. Despite this fact, in today's regulatory documents one of the main characteristics of asphalt concrete is still the deformation indicator – dynamic modulus. At the same time, now there is no reliable approach that would make it possible to define change of dynamic modulus of asphalt concrete in operation, so this task is still urgent. Moreover, there are no accurate dependences of ratio change between static and dynamic modules of asphalt concrete during operation. Change of dynamic modulus as private indicator can be used at calculation of energy functions variation.

In this paper the authors made an attempt to simulate changes of dynamic modulus of asphalt concrete when loading and analyzed the suggested viscoelastic model. New results, in particular analytical dependences, can form the basis of new regulatory documents for asphalt concrete pavement construction.

### References

1. ODN 218.046-01. *Proektirovaniye nezhestkikh dorozhnikh odezhd (vzamen VSN 46-83)* [Design of nonrigid road clothes (instead of VSN 46-83)]. Moscow: Informavtodor, 2001. 145 p. (rus)
2. Rudensky A.V. *Dorozhnie asphaltobetonnaie pokrytiya* [Asphalt concrete pavement]. Moscow: Transport, 1992. 253 p. (rus)
3. ODN 218.1.052-02. *Otsenka prochnosti nezhestkikh dorozhnikh odezhd (vzamen VSN 52-89)* [An assessment of durability of nonrigid road clothes (instead of VSN 52-89)]. Moscow: Informavtodor, 2002. 65 p. (rus)
4. Shook J. F., Kallas B. F. Factors Influencing Dynamic Modulus of Asphalt Concrete. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 1969. Vol. 38. Pp. 140–178.
5. El-Basyouny M.M., Witczak M.W., Zapata C.E. Development of Asphalt Concrete Rutting Model Using Permanent Strain Database. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 2005. Vol. 74. Pp. 381–442.
6. Bari J., Witczak M.W. Development of a New Revised Version of the Witczak E\* Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 2006. Vol. 75. Pp. 381–423.
7. Dongre R., Myers L., D'Angelo J., Paugh C., Cudimetta J. Field Evaluation of Witczak and Hirsch Models for Predicting Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 2005. Vol. 74. Pp 381–442.
8. Azari H., Al-Khateeb G., Shenoy A., Gibson N. Comparison Simple Performance Test IE\*I of Accelerated Loading Facility Mixtures and Prediction IE\*I Use of NCHRP 1-37A Model and Witczak's New Equations. *Journal of Transportation Research Board*. 1998. *Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC*. 2007. Pp. 1–9.



9. Carvalho R., Schwartz C.W. Comparisons of Flexible Pavement Designs: AASHTO Empirical Versus NCHRP Project 1-37A Mechanistic-Empirical. *Transportation Research Record 1947, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC*, 2006. Pp. 167–174.
10. Le A.T., Lee H.J., Park H.M., Lee S.Y. Development of a Permanent Deformation Model of Asphalt Mixtures for South Korean Pavement Design Guide. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, № 2095, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC*, 2009. Pp. 45–52.
11. Garba R. *Permanent Deformation Properties of Asphalt Concrete Mixtures*. Department of Road and Railway Engineering Norwegian University of Science and Technology NTNU. 2002. 201 p.
12. Schram S., Abdelrahman M. Improving Prediction Accuracy in Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. *Transportation Research Record 1947, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC*, 2006. Pp. 59–68.
13. Flintsch G.W., Loulizi A., Diefenderfer S.D., Diefenderfer B.K., Galal K.A. Asphalt Material Characterization in Support of Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide Implementation in Virginia. *Journal of the Transportation Research Board*. 2008. No. 2057. Pp. 114–125.
14. Katicha S., Flintsch G.W., Loulizi A., Wang L. Conversion of Testing Frequency to Loading Time Applied to the Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide. *Journal of the Transportation Research Board*. 2008. No. 2087. Pp. 99–108.
15. Kazarnovsky V.D. Sovremenniy tendentsii i problemi v razviti konstruktivnykh i metodov rascheta dorozhnikh odezhd [Current trends and problems in development of designs and methods of calculation of road clothes]. *Science & Engineering for Roads*. 2001. No. 3. Pp 7–8. (rus)
16. Teltayev B.B. Analiz raschetnykh znacheniy modulya uprugosti asfal'tobetonov [Analysis of calculated values of elasticity module of asphalt concrete]. *Road equipment*. 2010. Pp. 130–137. (rus)
17. Zolotarev V.A., Malyar V.V., Tkachuk Yu.P. Reologicheskaya model asfal'tobetonov [Rheological model of asphalt concrete]. *Modern Industrial and Civil Construction journal*. 2006. No. 2. Pp. 103–107. (rus)
18. Zolotarev V.A., Malyar V.V., Tkachuk Yu.P. Reologicheskiye svoystva asfal'topolimerbetonov pri dinamicheskom rezhime deformirovaniya [Rheological properties of asphalt-polymer-concrete at the dynamic mode of deformation]. *Science & Engineering for Roads*. 2008. No.1. Pp. 10–13. (rus)
19. Kondrashov N.A., Shestopalov A.A. Ispol'zovaniye modulya deformatsii v reologicheskoy modeli uplotneniya asfal'tobetonnoy smesi pri stroitel'stve dorozhnykh pokrytiy [Use of the module of deformation in rheological model of consolidation of asphalt concrete mix at pavement construction]. *Magazine of Civil Engineering*. 2014. No. 7. Pp. 55–65. (rus)
20. Boguslavsky A.M., Boguslavsky L.A. *Osnovy reologii asfal'tobetonov* [Bases of asphalt concrete rheology]. Moscow: The higher school, 1972. 200 p. (rus)

**Full text of this article in Russian: pp. 70–76**