

ЭФФЕКТИВНАЯ МОДЕЛЬ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОНА**EFFECTIVE MODEL FOR MODULUS OF ASPHALT CONCRETE ELASTICITY**

Ферминин логистикалык функциясына таянып, асфальт бетондун салмак көтөрүү жагдайына жарааша серпилгичтик модулуунун термофлуктуациялык көз карандылыгы негизделген.

Ачкыч сөздөр: асфальтбетон, серпилгичтик модулу, термофлуктуациялык модель, температуралык- убакыттык аналогия.

В статье обоснована термофлуктуационная зависимость модуля упругости асфальтобетона от условий нагружения на основе логистической функции Ферми.

Ключевые слова: асфальтобетон, модуль упругости, термофлуктуационная модель, температурно-временная аналогия.

In the article thermo-fluctuation dependence of the modulus of asphalt concrete elasticity on loading conditions based on the logistic function Fermi is proved.

Keywords: asphalt concrete, elasticity modulus, thermo-fluctuation model, temperature and time analogy.

Модуль упругости асфальтобетона является основной расчетной характеристикой при оценке прочности нежестких дорожных конструкций. Однако он изменяется в пределах до четырех десятичных порядков в зависимости от температурно-временных режимов нагружения покрытия. При низких температурах и высоких скоростях деформирования асфальтобетон ведет себя как абсолютно упругое тело, сопоставимое по жесткости с цементобетоном. При высоких температурах и длительном статическом действии нагрузки асфальтобетон является вязкопластичным материалом, модуль упругости которого может понизиться до жесткости несвязанного зернистого материала [i].

В исследованиях реологических свойств вязкоупругих материалов наибольшее распространение получили механические испытания синусоидальной нагрузкой [ii,iii]. Система проектирования асфальтобетона «Суперпейв» также ориентирована на динамико-механический анализ битумов и асфальтобетонов [iv,v]. В США для определения динамического модуля упругости асфальтобетонных образцов-цилиндров в широком диапазоне температурно-частотного нагружения действует стандарт ASTM D 3497 [vi]. В европейских нормах предусмотрены стандартные методы испытаний асфальтобетона на циклическое сжатие [vii] и изгиб [viii].

В основе методов оценки вязкоупругих характеристик материалов при циклическом деформировании лежит теория механических колебаний, в соответствии с которой комплексный модуль упругости E^* определяется по формуле:

$$E^* = |E^*| \cos \Phi + j |E^*| \sin \Phi, \quad (1)$$

где $|E^*|$ - абсолютная величина комплексного модуля, получившая название динамический модуль упругости, МПа; Φ - угол сдвига фаз между напряжениями и деформациями, град.

Зависимость модуля упругости асфальтобетона от температуры и режима нагружения обусловлена релаксационной природой битумных пленок, связывающих зерна минеральных материалов в монолит. При снижении температуры, как и при

увеличении частоты приложения нагрузки, жесткость асфальтобетона повышается. Для построения обобщенной (полной) кривой зависимости модуля упругости от времени действия нагрузки применяется методом температурно-временной суперпозиции или аналогии. Метод суперпозиции был впервые предложен А.П. Александровым и Ю.С. Лазуркиным в 1939 году для обработки экспериментальных данных по частотным зависимостям динамического модуля, измеренным при разных температурах [ix]. Исходя из физической взаимосвязи между временной (частотной) и температурной зависимостями вязкоупругих свойств материала обобщенная кривая комплексного модуля упругости представляется в зависимости от логарифма произведения частоты и температурного коэффициента приведения.

Температурный коэффициент приведения определяется по формуле Вильямса-Ландела-Ферри [ii], а также и по следующей зависимости:

$$\text{Log } \alpha_T = \frac{U}{2,3R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right), \quad (2)$$

где α_T – коэффициент приведения;

U - экспериментальная величина энергии активации асфальтобетона, Дж/моль;

R - газовая постоянная, 8,314 Дж/К моль;

T - температура испытания асфальтобетона, К;

T_0 - температура приведения, К.

В австралийском стандарте AGPT/T274 [x] коэффициент приведения представлен полиномом второго порядка:

$$\text{Log } \alpha_T = aT^2 + bT + c, \quad (3)$$

где a, b, c – подгоночные коэффициенты регрессии.

В указанном документе регламентирован порядок построения кривой температурно-частотной зависимости модуля упругости на конкретном примере обработки результатов испытаний асфальтобетонных образцов-балок по EN 12697-26 [viii]. В качестве модели модуля упругости используется уравнение Витчека [xi]:

$$\text{Log} |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\text{Log } t_r)}}, \quad (4)$$

где $|E^*|$ - динамический модуль упругости асфальтобетона при начальной температуре приведения, МПа\$

t_r – время нагружения асфальтобетона, приведенное к начальной температуре, с;
 δ, α - коэффициенты, характеризующие соответственно минимальные и максимальные значения модуля упругости, зависящие от зернового состава, содержания битума и пористости асфальтобетона;

β, γ - эмпирические коэффициенты, характеризующие форму S-образной кривой.

Информацию о параметрах уравнения (4) можно найти в технической документации по механико-эмпирическому методу проектирования дорожных покрытий MEPDG (США) и в сборнике Информавтодора [i]. Значения подгоночных параметров из австралийского стандарта продублированы в табл. 1.

Таблица 1 – Выписка из стандарта AGPT/T274 [x].

δ	α	β	γ	a	b	c	R^2	Ti(°C)
1.66944	2.68335	-	-	1.32050E-03	-	3.75742	0.997	20

Следует отметить, что уравнение Витчека по форме аналогично моделям модуля упругости, которые предлагались ранее Руденским, Франкеном и др. Так в европейских методиках расчета асфальтобетонных покрытий принята модель следующего вида:

$$|E^*| = R_s \cdot E_{\max}, \quad (5)$$

где R_s – фактор приведения, изменяющийся в зависимости от температуры и времени приложения нагрузки в интервале от 0 до 1; $E_{\max}$ – максимальный модуль упругости, соответствующий стеклообразному состоянию асфальтобетона, МПа.

Графики зависимости модуля упругости битумных материалов от температуры и времени нагружения, построенные по результатам испытаний образцов-балочек на ползучесть при изгибе, представлены в [xii]. Исходя из подобия кривых ползучести, приведенных к времени до разрушения, и степенного закона деформирования [xiii] установлена следующая термофлуктуационная зависимость модуля упругости $E(t, T)$:

$$E(t, T) = \frac{3^{1-p} p C^p}{[\varepsilon_{nl}] (1-p)} t^{-p} \exp \frac{pU}{RT}, \quad (6)$$

где t – время действия нагрузки, с;

T – температура испытания, К;

p – коэффициент пластичности;

$[\varepsilon_{nl}]$ – предельная пластическая деформация при растяжении образцов;

C, U – предэкспоненциальный член и энергия активации согласно уравнению долговременной прочности Г.М. Бартенева;

R – газовая постоянная, равная 8,314 Дж/К·моль.

В диапазоне вязкопластичности зависимость (6) даже при постоянном коэффициенте пластичности оказалась адекватной экспериментальным данным, что очевидно является характерным для случая статического нагружения образцов битумоминерального материала.

При переменном коэффициенте пластичности, свойственном циклическим испытаниям, модуль упругости асфальтобетона в зависимости от температуры и частоты нагружения $E(T, \omega)$ предлагается определять по аналогичной зависимости:

$$E(T, \omega) = E_0 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{m(T, \omega)} \exp \left[\frac{m(T, \omega) U}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (7)$$

где E_0 – расчетный модуль упругости для начальных условий деформирования, МПа;

ω – переменная частота приложения нагрузки, Гц;

ω_0 – расчетная частота нагружения, Гц;

$m(T, \omega)$ – коэффициент пластичности, зависящий от температуры и частоты нагружения;

U – энергия активации деформирования и разрушения асфальтобетонных образцов при растяжении, Дж/моль;

T – переменная температура испытания, К;

T_0 – расчетная температура приведения, К.

При рассмотрении термофлуктуационной модели (7) в качестве альтернативы уравнению Витчека (4) возможны различные варианты представления коэффициента пластичности $m(T, \omega)$. В общем виде показатель степени является сигмоидальной функцией от температуры испытания и частоты деформирования или времени приложения нагрузки. Раскрытию физической природы коэффициента пластичности асфальтобетона посвящено большое число публикаций. Развивая сложившиеся представления было предложено интерпретировать показатель степени как произведение вероятностей вязкопластичного и упругого деформирования аналогично коэффициенту вязкоупругой податливости [i]. Поэтому при вычислении модуля упругости методом конечных разностей коэффициент пластичности асфальтобетона определялся в каждом шаге итерации по следующей феноменологической зависимости:

$$m(T, t) = \frac{\log E_{\max} - \log E(T, t)}{\log E_{\max} - \log E_{\min}} \cdot \frac{\log E(T, t) - \log E_{\min}}{\log E_{\max} - \log E_{\min}}, \quad (8)$$

где $E_{\max}$ и $E_{\min}$ – соответственно максимальный и минимальный модуль упругости, МПа.

В этом случае точность вычислений зависела от шага итераций, так как прямая подстановка (8) в (7) невозможна из-за циклической ссылки. Ниже зависимость (8) принята в качестве 1-го варианта при сравнении различных термофлуктуационных моделей прогнозирования модуля упругости асфальтобетона.

Во 2-м варианте переменный коэффициент пластичности $m(T, \omega)$ представляется через угол механических потерь:

$$m(T, \omega) = p \sin 2\Phi, \quad (9)$$

где p – максимальный коэффициент пластичности в середине диапазона вязкоупругости;

Φ – угол сдвига фаз между напряжениями и деформациями, град.

В первом приближении угол сдвига фаз определялся по формуле:

$$\Phi = \frac{\log E(T, t) - \log E_{\min}}{\log E_{\max} - \log E_{\min}} 90 \text{ град.}, \quad (10)$$

В данном случае в качестве сигмоидальной функции выступает тангенс угла механических потерь, что согласуется с экспериментально установленным подобием температурных кривых угла сдвига фаз и коэффициента пластичности [xiv].

В 3-м варианте представления коэффициента пластичности $m(T, \omega)$ за основу предлагается принять адекватную модель модуля упругости (5) и подобрать сигмоидальную логистическую функцию Ферми следующего вида:

$$R_s = \frac{1}{1 + e^{-pX}}, \quad (11)$$

где p – максимальный коэффициент пластичности, соответствующий динамическому модулю упругости в середине диапазона вязкоупругости $E = E_{\max} / 2$ при $R_s = 0,5$.

X – обобщенный температурно-временной фактор условий испытания асфальтобетона при циклическом нагружении образцов:

$$X = Ln \frac{\omega}{\omega_0} + \frac{U}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{cp}} \right), \quad (12)$$

где T_{cp} – температура, соответствующая середине диапазона вязкоупругости при условии деформирования образцов асфальтобетона с расчетной частотой ω_0 , К.

Условную температуру T_{cp} легко определить по величине расчетного модуля упругости. Подстановка E_0 в формулу (7) приводит к следующей зависимости:

$$T_{cp} = \frac{T_0 \frac{pU}{R}}{\frac{pU}{R} + T_0 Ln \left(\frac{E_{\max}}{E_0} - 1 \right)}, \quad (13)$$

Влияние максимального коэффициента пластичности асфальтобетона на фактор приведения R_s следует из кривых на рис. 1.

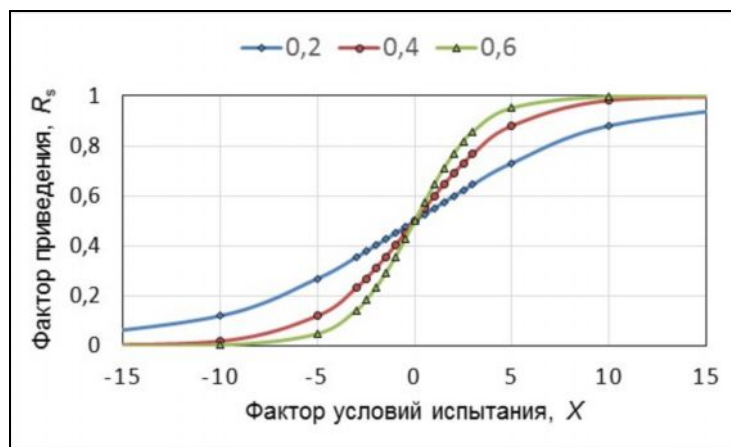


Рис. 1. Зависимости фактора приведения R_s от обобщенного фактора условий испытания X при максимальном коэффициенте пластичности асфальтобетона p равным 0,2, 0,4 и 0,6.

Чем больше значение максимального коэффициента пластичности, тем выше чувствительность модуля упругости асфальтобетона к температурно-временному фактору нагружения [xii], что согласуется с производной от сигмоидальной функции. Поэтому коэффициент пластичности асфальтобетона представим в следующем виде:

$$m(T, \omega) = pR_s(1 - R_s),$$

(14)

По экспериментальным данным [x] были подобраны термофлуктуационные зависимости модуля упругости асфальтобетона с помощью трех вариантов вычислений коэффициента пластичности, которые впоследствии сравнивались с моделью Витчека. В первом варианте термофлуктуационной модели коэффициент детерминации корреляционной зависимости оказался ниже, чем показанный в австралийском стандарте, однако во втором и третьем варианте он превысил значение 0,997. Наиболее тесная связь между экспериментальными и расчетными значениями модуля упругости была установлена в третьем варианте (рис. 2).

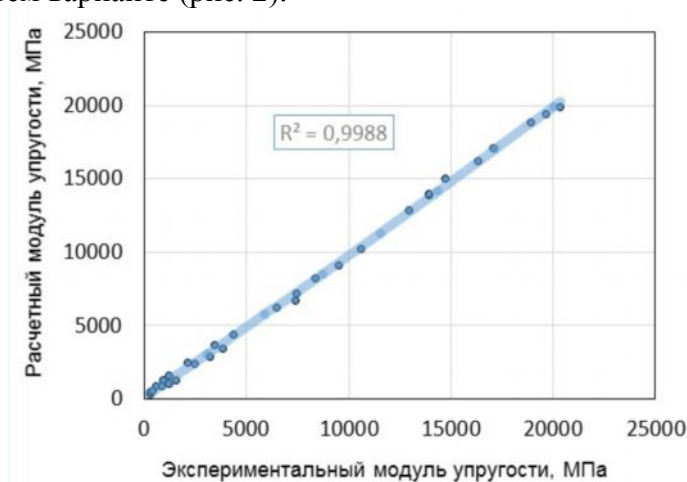


Рис. 2. Корреляция средних экспериментальных и расчетных значений модуля упругости асфальтобетона по термофлуктуационной модели в варианте 3

Корреляционная зависимость на рис.2. практически линейная, что дает дополнительное преимущество термофлуктуационной модели модуля упругости, в которой коэффициент пластичности представлен логистической функцией Ферми.

Характеристики моделей модуля упругости асфальтобетона, установленные по одним и тем же результатам испытаний образцов-балок при 4-х точечном изгибе, сведены в табл. 2:

Таблица 2 – Характеристика температурно-частотных моделей модуля упругости асфальтобетона

Показатели	Стандартная, [x]	Термофлуктуационная		
		1	2	3
Число подгоночных параметров	7	4	5	4
Коэффициент детерминации R^2	0,997	0,9966	0,9985	0,9988
Начальный модуль упругости E_0 , МПа	4357	4357	4357	4357
Максимальный модуль упругости $E_{\max}$, МПа	22531	63023	79680	22606
Минимальный модуль упругости $E_{\min}$, МПа	47	112	9	-
Энергия активации U , кДж/моль	-	268	314	294
Максимальный коэффициент пластичности p	-	0,25	0,280	0,291

С учетом данных табл. 2 для оценки модуля упругости асфальтобетона рекомендуется наиболее точная термофлуктуационная модель под номером 3. По сравнению с моделью Витчека, принятой в стандартах США и Австралии, в рекомендуемой модели удалось снизить число подгоночных параметров с 7 до 4-х. Структурные параметры термофлуктуационной модели модуля упругости соответствуют параметрам температурно-фрактальной модели усталостной прочности асфальтобетона[xv] и имеют определенный физический смысл.

Выводы

1. На основании экспериментальных данных подобраны различные сигмоидальные функции, характеризующие зависимость модуля упругости асфальтобетона от температуры и частоты нагружения. Наиболее точной является термофлуктуационная модель модуля упругости, в которой коэффициент пластичности представлен логистической функцией Ферми.

2. По сравнению с моделью Витчека, принятой в стандартах США и Австралии, точность аппроксимации модуля упругости асфальтобетона повысилась примерно в 2 раза, а число подгоночных параметров уменьшилось с 7 до 4-х.

3. Модуль упругости при любой температуре и частоте нагружения рекомендуется определять исходя из следующих свойств асфальтобетона: начальный модуль при расчетной температуре и частоте; максимальный модуль в условиях стеклообразного состояния; энергия активации деформирования и разрушения; максимальный коэффициент пластичности, соответствующий середине диапазона вязкопластичности.

4. Структурные параметры термофлуктуационной модели модуля упругости соответствуют параметрам модели усталостной прочности асфальтобетона и имеют вполне определенный физический смысл. Можно надеяться, что предлагаемая модель модуля упругости найдет применение в расчетах асфальтобетонных покрытий по различным критериям прочности и будет способствовать продлению их жизненного цикла.

Список литературы

1. Кирюхин, Г.Н. Исследование зависимостей модуля упругости асфальтобетона [Текст] / Г.Н. Кирюхин // Научно-технический информационный сборник. – Москва: №3 Инфотрансдор, 2009.- С. 41-57.

2. Ферри, Дж. Вязкоупругие свойства полимеров [Текст] / Дж. Ферри - Москва: Иностранная литература, 1963. - 536 с.
 3. Виноградов, Г.В. Реология полимеров / Г.В. Виноградов, А.Я. Малкин - Москва: Химия, - 1977. - 438 с.
 4. Superpave Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing. / Asphalt Institute Superpave.– Series № 1 (SP-1). USA, – 1997. – 67.
 5. Superpave Mix Design. / Asphalt Institute Superpave Series № 2 (SP-2). USA, -1996. Printing, - 117.
 6. ASTM D 3497 Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Concrete Mixtures. / Note: Reapproved 2003*Approved 2003-00-00, 1995-00-00.
 7. EN 12697-25:2005 Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 25: Cyclic compression test.
 8. EN 12697-26:2012 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Stiffness.
 9. Александров, А.П. Изучение полимеров. Высокоэластическая деформация полимеров [Текст] / А.П. Александров, Ю.С. Лазуркин // Журнал Технической Физики. -1939. -№14. Т. 9. - С. 1249-1252.
 10. AUSTROADS TEST METHOD AGPT/T274 «Characterisation of Flexural Stiffness and Fatigue Performance of Bituminous Mixes», - May 2015.
 11. Development of a Revised Predictive Model for the Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures. APPENDIX CC-4. Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, 2002. USA.
 12. Кирюхин, Г.Н. Исследование влияния качества битумов на работоспособность асфальтобетонных покрытий [Текст]: автореф. дисс... канд. техн. наук / Г.Н. Кирюхин – Москва: 1982. – 21 с.
 13. Руденский, А. В. Исследование влияния пластичности на деформативные и прочностные характеристики асфальтобетона [Текст] / А. В. Руденский.–Москва: 1965.- 34 с.
 14. Золотарев, В.А. Долговечность дорожных асфальтобетонов [Текст] / В.А. Золотарев. - Харьков: Высшая школа, 1977. -114 с.
 15. Кирюхин, Г.Н. Термофлуктуационная и фрактальная модель долговечности асфальтобетона. // Сб. Дороги и мосты. – Москва: Росдорнии, 2014. - Вып.31. - С. 247-268.
-