

Маляр В.В., канд. техн. наук

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВИТЧАКА

Анотація. В статті розглянута можливість прогнозування модуля пружності асфальтобетонів різних складів при різних температурах та частотах деформування з використанням сигмоїдальної моделі. Показана хороша збіжність розрахункових і експериментальних значень за умови використання запропонованих коефіцієнтів.

Ключові слова: асфальтобетон, модуль пружності, бітум, в'язкість, деформування, в'язкопружність, модель.

Аннотация. В статье рассмотрена возможность прогнозирования модуля упругости асфальтобетонов разных составов, при разных температурах и частотах деформирования с использованием сигмоидальной модели. Показана хорошая сходимость расчетных и экспериментальных значений при условии использования предложенных коэффициентов.

Ключевые слова: асфальтобетон, модуль упругости, битум, вязкость, деформирование, вязкоупругость, модель.

Annotation. The article considers the predicting possibility of the elastic modulus of various asphalt compositions at different temperatures and deformation frequencies using the sigmoidal model. A good convergence of calculated and experimental values with the using of proposed coefficients is shown here.

Key words: asphalt concrete, modulus of elasticity, bitumen, viscosity, deformation, viscoelasticity, model.

Целью данной работы было изучение преимуществ и недостатков реологической модели Витчака, используемой в США более 40 лет для асфальтобетона при циклическом деформировании, а также ее применимость для описания свойств асфальтобетонов разных стандартных составов. Подобное моделирование в основном используется для описания деформационных свойств асфальтобетона в области линейной вязкоупругости. Известно, что комплексный динамический модуль упругости асфальтобетона зависит от частоты деформирования и температуры. Данные могут смещаться относительно частоты и, таким образом, соответствовать другой температуре

так, что различные температурно-частотные кривые могут быть приведены к обобщенной зависимости [1].

Эта зависимость представляет поведение асфальтобетона при данной температуре в широком диапазоне частот (до 5...10 десятичных порядков). Такая обобщенная кривая при разных температурах имеет два перехода. При высокой частоте (или низкой температуре) модуль упругости максимальный и он соответствует застеклованному состоянию асфальтобетона. При низкой частоте (или высокой температуре) материал приобретает свойства вязкопластичного тела и характеризуется минимальным значением модуля упругости.

Эквивалентность между частотой и температурой сформулирована в методе температурно-временной аналогии ТВА (метод Вильямса-Ландела-Ферри ВЛФ). Этот метод базируется на результатах испытаний материалов, которые работают только в области линейной вязкоупругости.

В общем, существуют два способа представления линейных вязкоупругих моделей (LVE) деформационных свойств материалов, это математические и механические модели. В математической (феноменологической) модели корректируют математическое уравнение на основе экспериментальных данных. В механической (аналоговой) модели линейное вязко-упругое поведение материала представляют комбинацией пружин и амортизаторов. Коэффициенты уравнения модели определяют приближением (регрессией) методом наименьших квадратов. В итоге, хорошая реологическая модель должна как можно более полно описывать реологические функции изучаемых материалов в области линейной вязкоупругости.

Исторически сложилось, что развитие реологических моделей относится к 1954 году, когда Ван-Дер-Поль представил нелинейную многомерную модель в виде диаграмм [2]. В настоящее время предлагаются несколько моделей, которые можно отнести к сигмоидальным. Например, модель Роу [3] – видоизмененная модель Кристенсена [4] и Томпсона [5]:

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{(1 + \lambda e^{\beta + \gamma \log \omega})^{1/\lambda}}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости; δ – значение нижней асимптоты функций (E_{\min}); $\delta + \alpha$ – значение верхней асимптоты функций ($E_{\min} + E_{\max}$); β, γ – коэффициенты, которые определяют форму зависимости между асимптотами; λ – параметр, который влияет на асимметричность зависимости.

Модель М. Витчака, которая развивается с 1972 г., описывается эмпирическим уравнением [6]:

$$E^* = -0,349 + 0,754 \left(|G_b^*|^{-0,0052} \right) \times (6,65 - 0,032 p_{200} + 0,0027 p_{200}^2 + 0,011 p_4 - 0,0001 p_4^2 + 0,006 p_{38} - 0,00014 p_{38}^2 - 0,08 V_a - 1,06 \left(\frac{V_{beff}}{V_a + V_{beff}} \right) + \frac{2,56 + 0,03 V_a + 0,71 \left(\frac{V_{beff}}{V_a + V_{beff}} \right) + 0,012 p_{38} - 0,0001 p_{38}^2 - 0,01 p_{34}}{1 + e^{(-0,7814 - 0,5783 \log |G_b^*| + 0,8834 \log \delta_b)}} \quad (2)$$

Помимо коэффициентов, учитывающих состав заполнителей, здесь использован динамический модуль сдвига вяжущего $|G_b^*|$. Это связано с тем, что Стратегической программой дорожных исследований США (SHRP, 1993) предусмотрено проводить оценку консистенции битума динамическими характеристиками на виброреометре.

В модели М. Витчака 1999 года использовался показатель эффективной вязкости η , а коэффициенты модели были рассчитаны на основе испытаний 205 асфальтобетонов различных составов при температурах 14, 40, 70, 100, 130 °F (-10...54 °C) и частотах деформирования 25; 10; 5; 1; 0,5; 0;01 Гц [6]:

$$E^* = -1,25 + 0,029 p_{200} - 0,0018 p_{200}^2 - 0,0028 p_4 - 0,058 V_a - 0,822 \frac{V_{beff}}{V_a + V_{beff}} + \frac{3,872 - 0,0021 p_4 + 0,004 p_{38} - 0,000017 p_{38}^2 + 0,0055 p_{34}}{1 + e^{(-0,603313 - 0,31335 \log(f) - 0,393532 \log(\eta))}} \quad (3)$$

где E^* – динамический модуль упругости, 10^5psi (1 pound-force per square inch = 6894,8 Pa); η – вязкость вяжущего, 10^6Poise (1 пз = 0,1 Па·с); f – частота деформирования, Гц; p_{200} – полный проход через сито 0,075 мм, %; p_4 – полный остаток на сите 4,76 мм, %; p_{38} – полный остаток на сите 9,5 мм, %; p_{34} – полный остаток на сите 19 мм, %; V_a – остаточная пористость, %; V_{beff} – содержание битума, %.

Данных по значениям вязкости битумов в литературе много. Для определения вязкости битумов применяют самые разнообразные методы. Вязкость битума зависит не только от состава битума и его температуры, но и от длительности и характера действия нагрузки.

Значение вязкости от температуры в [6] предлагается определять по зависимости:

$$\log \log \eta = A + VTS \log T_R \quad (4)$$

где A, VTS – параметры регрессии; T_R – температура, ° Ренкина.

В представленной работе кинематическая (постоянная) вязкость используемого для асфальтобетона битума при разных температурах определялась по формуле [7]:

$$\log \eta = 10,5 - 2,26 \log P + 0,00389 (\log P)^2 \quad (5)$$

и для сравнения значений (таблица 1) по уравнению Вальтера:

$$\eta = \frac{1,58 \cdot 10^{10}}{P^{2,16}} \quad (6)$$

где P – пенетрация при разных температурах, значения которых определялись по методике, используемой в [8].

Таблица 1 – Значения вязкости битумов рассчитанных по разным формулам

| Пенетрация, 0,1 мм | 46 | 70 | 114 | 176 |
|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Вязкость, пз (5) | $5,6 \cdot 10^5$ | $2,2 \cdot 10^5$ | $7,3 \cdot 10^4$ | $2,7 \cdot 10^4$ |
| Вязкость, пз (6) | $4,1 \cdot 10^5$ | $1,6 \cdot 10^5$ | $5,7 \cdot 10^4$ | $2,2 \cdot 10^4$ |

Согласно этой методике предполагается, что при температуре размягчения глубина проникания иглы пенетromетра равна 800 1/10 мм, а при температуре хрупкости – 1 1/10 мм. Между этими значениями температур логарифмическая зависимость вязкости прямолинейная. Таким образом, зная температуру размягчения и значение глубины проникания иглы при 25 °С битума, можно определить его пенетрацию при температуре T по формуле:

$$\lg P_T = \frac{\lg 800 - \lg P_{25}}{T_p - 25} (T - 25) + \lg P_{25} \quad (7)$$

Расчет модуля упругости асфальтобетона по модели Витчака с использованием предлагаемых формул легко реализуется в среде Maple. Этот программный пакет ориентирован на сложные математические вычисления, визуализацию данных и моделирование, а также обладает развитыми графическими средствами и имеет свой язык программирования.

Рассчитанные значения модуля упругости асфальтобетона по модели Витчака в широком температурном и частотном диапазоне (рис. 1) не совпали с экспериментальными данными, полученными как на вибростенде ХНАДУ [9],

так и с данными французского стандарта [10]. Несовпадение выражалось в отличие максимального и минимального модуля упругости. Так, расчетные значения максимального модуля упругости составляли около 40000 МПа, а экспериментальные - 10000 МПа, и минимального соответственно – 10 МПа и 100 МПа. Кроме того, для расчетных значений коэффициент пластичности, определенный по частотной зависимости [9] при температуре 20 °С, составлял 0,3, а для экспериментальных данных – 0,2. Т.е. существует разница в учете интенсивностей развития релаксационных процессов при деформировании.

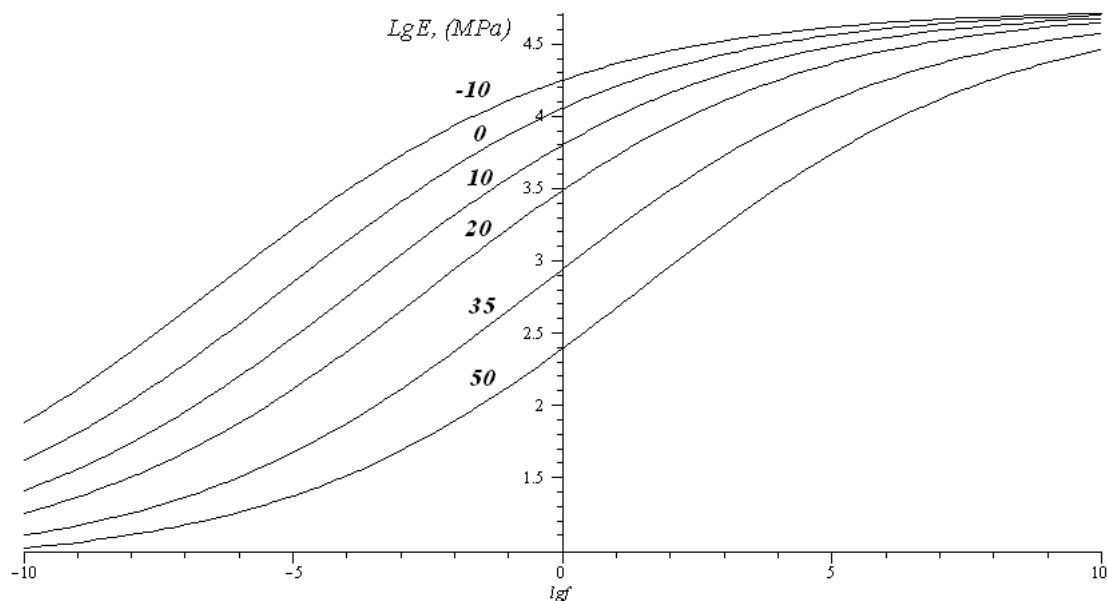


Рисунок 1 – Частотная зависимость расчетного модуля упругости (цифры на кривых – температура, °С)

Подобный анализ был сделан в [11], где сопоставлялись экспериментальные данные американских и казахских исследователей. Полученные расхождения модулей упругости асфальтобетонов примерно одинаковых составов находились в пределах от 12 до 95 %. Исходя из этого предлагалось, что модули упругости должны быть определены индивидуально для каждой смеси (образца) отдельно с учетом марки, содержания битума, фракций заполнителя и минерального порошка.

Для рассматриваемой сигмоидальной модели такое несоответствие корректируется путем изменения коэффициентов, последовательно приближая расчетные значения модуля упругости к экспериментальным значениям. Так для мелкозернистого асфальтобетона на битуме БНД 90/130 уравнение (3) принимает вид:

$$\log E^* = 2 + \frac{2}{1 + e^{(-0,30 - 0,45 \log(f) - 0,60 \log(\eta))}} \quad (8)$$

На рис. 2 приведены экспериментальные (точки на графике) и расчетные (сплошные линии) значения модуля упругости.

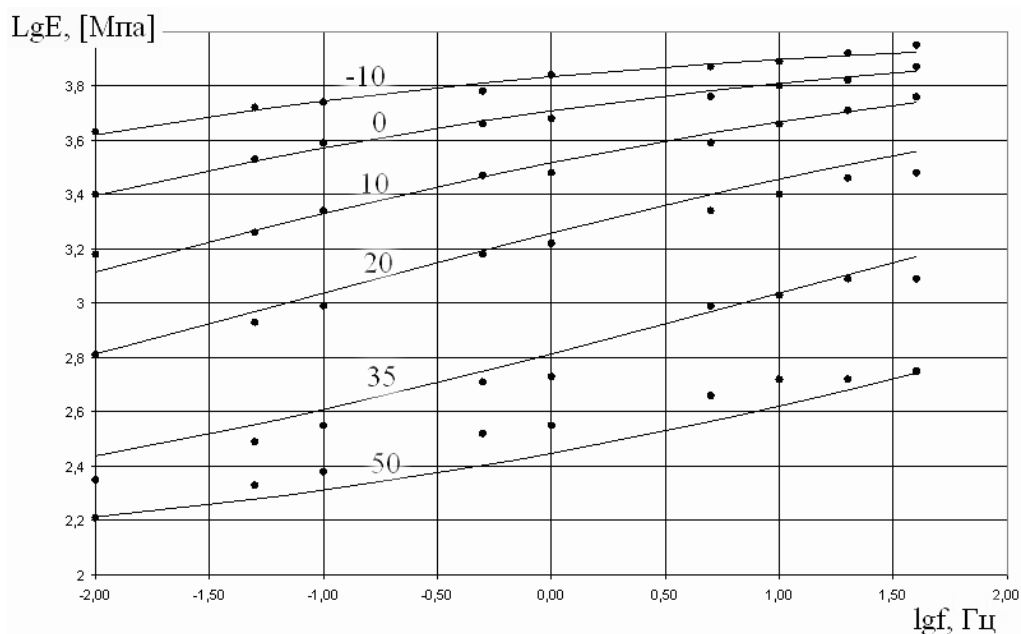


Рисунок 2 – Частотная зависимость модуля упругости асфальтобетона при разных температурах (цифры на кривых-температуры испытания, °С).

В табл. 2 приведены экспериментальные и расчетные значения модулей упругости мелкозернистого асфальтобетона «Тип Б» на битумах разных марок. Небольшое расхождение вязкости битумов, рассчитанных по формулам (5) и (6), незначительно влияет на значения модуля упругости асфальтобетона.

Таблица 2 – Значения модулей упругости асфальтобетонов на битумах разных марок

| Показатель | Значение | БНД | БНД | БНД90/130 | БНД130/200 |
|-----------------------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | 40/60 | 60/90 | | |
| /E*/, Мпа T=20 °С, f=0,5 Гц | экспериментальное | 2400 | 1860 | 1320 | 1000 |
| | расчетное | <u>2630</u> | <u>2100</u> | <u>1550</u> | <u>1180</u> |
| | | 2390 | 1930 | 1420 | 1090 |

Примечание. В числителе приведены значения, где использовалась формула (5), в знаменателе – формула (6).

Анализ этих сравнений показывает, что экспериментальные и расчетные значения модулей упругости асфальтобетонов отличаются не более чем на 10 % (за исключением значений при температуре 50 °С), притом, что модуль упругости в зависимости от условий может меняться на два десятичных порядка. По критерию Фишера предлагаемая модель адекватна экспериментальным значениям.

Расчитанные данные модуля упругости асфальтобетона разных гранулометрических типов (различное содержание щебня) при разных температурах приведены на рис. 3. При снижении температуры расчетный модуль упругости увеличивается более чем на один порядок. Увеличение количества щебня в меньшей степени сказывается на значении модуля упругости.

При снижении температуры модуль упругости определяется жесткостью асфальтовяжущего. Здесь повышение количества щебня сопровождается уменьшением содержания асфальтовяжущего и ростом толщины битумных пленок, что приводит к снижению жесткости асфальтобетона.

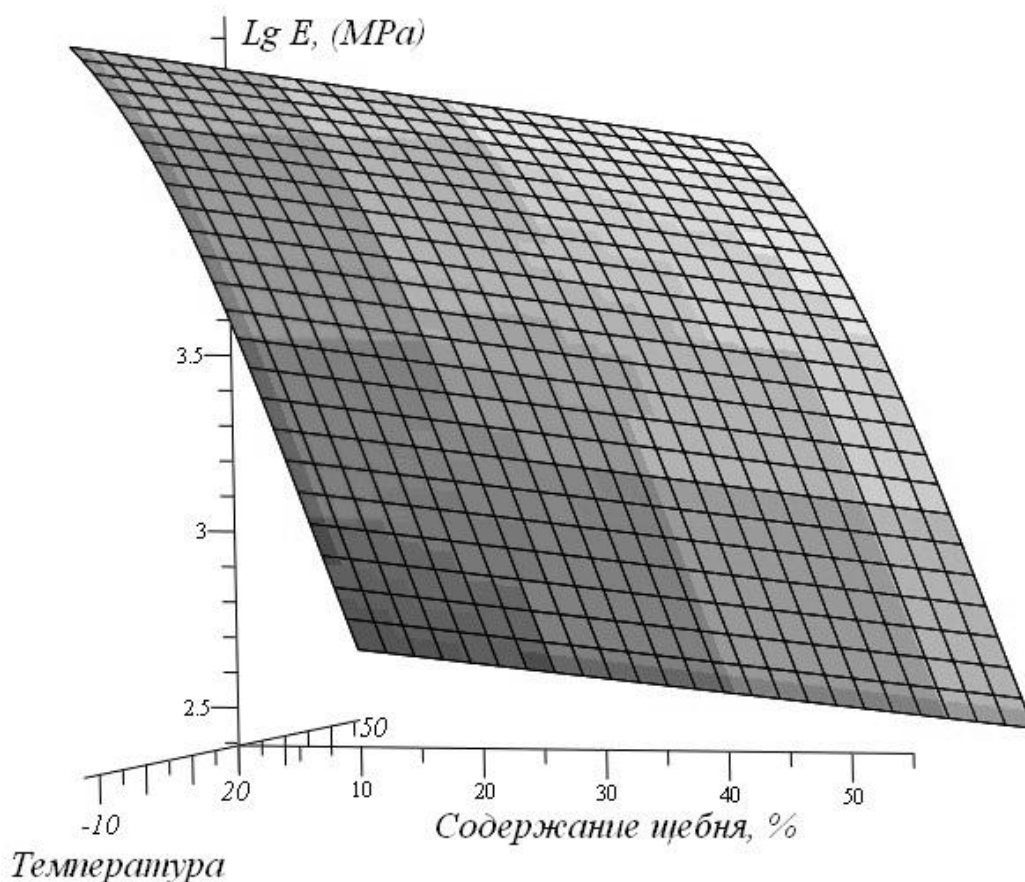


Рисунок 3 – Зависимость расчетного модуля упругости асфальтобетона от температуры и содержания щебня при частоте деформирования 1,56 Гц

При повышении температуры асфальтовяжущее размягчается и модуль упругости в значительной степени должен зависеть от жесткости щебеночного каркаса. Это присуще мелкозернистому асфальтобетону типа «Б» с содержанием щебня 35-45 %, где наиболее сочетаются свойства щебеночного каркаса и оптимальной толщины битумной пленки [9]. Однако модель Витчака не учитывает эту особенность. При положительных, как и при отрицательных температурах, рассчитанный по модели Витчака модуль упругости уменьшается с увеличением содержания щебня.

Выводы

1. Сигмоидальная модель Витчака описывает частотные зависимости модуля упругости при разных температурах асфальтобетонов разного минерального состава, содержания битума и объема пор. Однако, основанная на экспериментальных данных американских исследователей модель не соответствует данным, получаемым на вибростенде по методике ХНАДУ. Несоответствие выражается в занижении значения длительного и завышении значения мгновенного расчетного модуля упругости, а также более высокого значения коэффициента пластичности.

2. Учитывая это несоответствие (изменив коэффициенты) можно адекватно использовать эту модель для описания деформационных свойств асфальтобетонов стандартных составов. Показана хорошая сходимость результатов измененной модели Витчака и экспериментальных данных модуля упругости для мелкозернистого асфальтобетона типа «Б» на битумах разной вязкости.

3. Для прогнозирования деформационных свойств асфальтобетонов разных гранулометрических составов в измененную модель Витчака необходимо ввести соответствующие коэффициенты. Для этого необходима большая база данных экспериментальных исследований динамического модуля упругости асфальтобетона стандартных составов. Такую измененную модель можно будет использовать при проектировании конструкций дорожных одежд нежесткого типа.

Литература

1. Дж. Ферри Вязкоупругие свойства полимеров / Дж. Ферри; пер. с англ. – М.: ИЛ, 1963. – 536 с.
2. Van-der-Poel C. A general system describing the visco-elastic properties of bitumens and its relation to routine test data / Van-der-Poel C. // J. Applied Chem. – 1954. - № 4. – P. 221-236.
3. Rowe. G.M. A generalized logistic function to describe the master curve stiffness properties of binder mastics and mixtures / Rowe. G.M., G. Baumgardner and M.J. Sharrock // 45th Petersen Asphalt Research Conference. Laramie, Wyoming. – 2008. July 14-16.
4. Bonaquist, R. Christensen. Practical procedure for developing dynamic modulus master curves for pavement structural design / Bonaquist, R. and D.W. Christensen // Transport Res. Rec. – 2005. - № 1929. – P. 208-217.
5. Garcia, G. HMA dynamic modulus predictive models: A review / Garcia, G. and M. Thompson // Research Report FHWA-ICT-07-2005. Illinois Centre for Transportation. – 2007.
6. Bari J. Development of New Revised Version of the Witczak E* Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures / Bari J. and Witczak M.W. // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. – 2006. - № 75. – P. 381-424.
7. M. W. Witczak Development of a master curve (E*) database for lime modified asphaltic mixtures / M. W. Witczak, Javed Bari // Arizona State University Research Project, Fulton School of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering. – 2004. July. – 29 p.
8. Золотарев В.А. Эквивалентная температура как альтернатива температуре размягчения битума / Золотарев В.А., Пыриг Я.И., Галкин А.В. // Наука и техника в дорожной отрасли. М.: МАДИ. – 2007. - №2. – С. 36-39.
9. Золотарев В.А. Долговечность дорожных асфальтобетонов / Золотарев В.А. – Харьков: «Вища школа», 1977. – 116 с.
10. NF P 98-260-2 Determination du module dynamique en flexion sinusoidale.
11. Телтаев Б.Б. Анализ расчетных значений модуля упругости асфальтобетонов / Б.Б. Телтаев // Дорожная техника. – 2010. – С. 130-137.