УДК 625.855.3

ИНДЕКС РЕЛАКСАЦИОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОНА

Д-р техн. наук **В.А. Золотарев**
(Харьковский национальный
автомобильно-дорожный университет (ХНАДУ))
Конт. информация: kafedradsm@gmail.com

В статье рассмотрены процессы деформирования асфальтобетона. Приведены обобщенные температурно-временные (частотные) зависимости. Предложен индекс релаксационной чувствительности, раскрывающий механизм деформирования в широком временном диапазоне. Показана его чувствительность к скорости деформирования и температуре. Установлена зависимость температуры механического стеклования асфальтобетона от частоты и времени деформирования.
Ключевые слова: *модуль упругости, частота, температура, время релаксации, изгиб, сдвиг, температура стеклования.*

Асфальтобетон является термопластичным телом, что обусловлено наличием в нем битума, обладающего типичными реологическими свойствами: температурно-временными зависимостями напряжений сдвига, вязкости, комплексных модулей упругости, а также релаксацией напряжений.

Из-за термопластичности в теплое время года асфальтобетон ведет себя как вязкоупругое тело, а при низких зимних температурах – как упругое и даже хрупкое. Многочисленные результаты исследований свидетельствуют о применимости к битумам и асфальтобетонам температурно-временной аналогии (ТВА). В соответствии с этим его механическое поведение зависит от режима деформирования (скорости или частоты деформирования). Области низких и высоких скоростей характеризуются слабым ростом модулей упругости, между этими областями существует участок интенсивного изменения модулей с ростом интенсивности деформирования.

Принципиальной особенностью асфальтобетонов также является их способность линейно деформироваться (сохраняя пропорциональность между напряжениями и деформациями) на ранней стадии нагружения, а затем, с ростом деформаций или напряжений, переходить к нелинейному деформированию (**рис. 1**). Это наследственная способность асфальтобетона, базирующаяся на основе такого поведения битумов (**рис. 2**). В связи с этим для сопоставления реологического поведения различных асфальтобетонов показатели их жесткости при деформиро-

вании должны определяться в пределах области линейности. Такого типа измерения стали возможны благодаря использованию динамических гармонических режимов деформирования асфальтобетонов в широких температурных и частотных диапазонах и применению к полученным зависимостям метода температурно-временного приведения – ВЛФ [**1**].

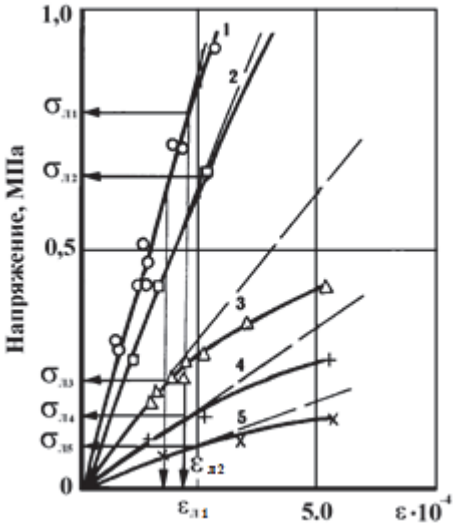

Рис. 1. Зависимость между напряжениями и деформациями при температуре 20 °С для асфальтобетона при частотах деформирования, Гц:
1 – 20; 2 – 5; 3 – 0,5; 4 – 0,05; 5 – 0,01;
$\sigma_л$ и $\varepsilon_л$ – границы линейности

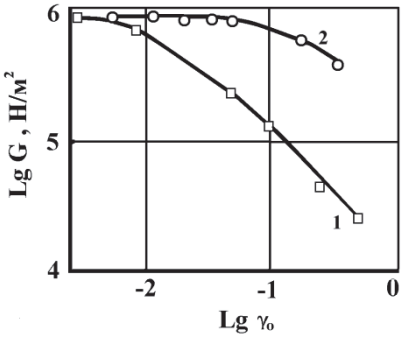

Рис. 2. Зависимость модулей упругости (G) от амплитуды деформации γ_0 при частоте 10 Гц и температуре 25 °С:
битумы: гель – □ (1); золь – ○(2)

Впервые по отношению к асфальтобетонам эти виды измерений и методы были разработаны во Франции и применены в работах [**2-4**]; аналогичные исследования в СССР были освоены и применяются в ХНАДУ, начиная с 1970 г. [**5**]. Отличительной методологической особенностью исследований, выполненных в СССР, являлось параллельное изучение реологических свойств битумов, предпринятое в ИНХС АН СССР [**6, 7**]. Полученные результаты свидетельствовали о тесной связи между комплексными модулями упругости битумов при сдвиге и асфальтобетонов при изгибе (**рис. 3**). Сопоставимость таких зависимостей основывалась на установленной ранее [**3**] взаимосвязи модулей упругости асфальтобетонов при этих схемах напряженного состояния, которая выражалась отношением 2,4-2,6.

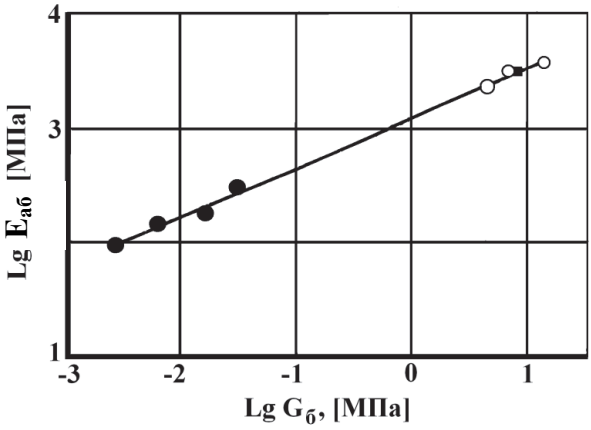

Рис. 3. Зависимость между модулями упругости асфальтобетонов при изгибе ($E_{аб}$) и модулями сдвиговой упругости битумов ($G_б$) разной консистенции при соответствующих температурах и частотах деформирования

Типичная приведенная частотная зависимость модуля упругости асфальтобетона (**рис. 4**), по данным [**3**], включает три области:

- область низких частот (больших времен деформирования);
- область высоких частот деформирования (малых времен деформирования);
- переходную область, протяженность которой по частотной шкале определяется структурным типом, технологическим видом и консистенцией используемого в асфальтобетоне битума.

Частотно-температурная зависимость традиционных битумов, как правило, не имеет плато в низкочастотной области **[6]**. Она харак-

терна только для высокоструктурированных асфальтенами битумов, являющихся типичными дисперсными системами, что было показано в **[7]**.

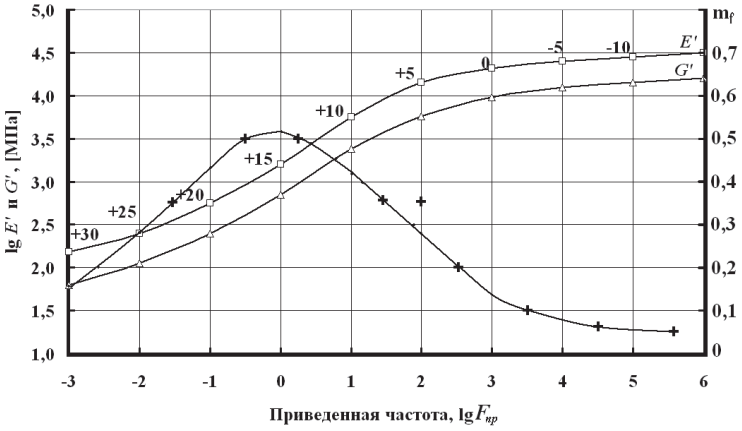

Рис. 4. Приведенные к температуре 15 °С модули накопления при изгибе (E') – □, сдвиге (G') – Δ, частотная зависимость (m_f) – +: *цифрами у кривой обозначены температурные диапазоны экспериментального определения модулей (обработка данных **[3]**)*

Каждая из трех областей отвечает определенному реологическому состоянию. Область низких частот может рассматриваться как область вязкопластичности, а высоких частот – как область, близкая к упругости. Переходная область отвечает состоянию вязкоупругости. Такой характер реологической частотной и временной (при ползучести [**4**]) зависимости при определенной температуре приведения может объясняться степенью интенсивности релаксационных процессов по отношению к скорости деформирования. Эта зависимость может быть названа полной реологической зависимостью асфальтобетона.

В области вязкопластичности скорость релаксационных процессов больше, чем скорость деформирования, что приводит к малым значениям модулей упругости. В области высокочастотного деформирования, близкой к упругости, релаксационные процессы протекают медленнее, чем деформационные, что обеспечивает высокие значения модулей упругости, характерные для твердых, даже хрупких тел (более 3×10^4 МПа). В переходной области соотношение скоростей деформирования и релаксации уравновешивается: в ее середине они максимально близки, после чего соотношение меняется на противоположное. Область между метастабильными состояниями вязкопластичности и упругости отвечает эксплуатационному состоянию асфальтобетонных покрытий как по частотам, временам и скоростям движения, так и по

температурному диапазону. Чем она шире, тем надежнее поведение асфальтобетона в покрытии в жаркое и холодное время года.

Для количественной характеристики «полной» реологической частотной или временной зависимости модулей может быть использовано неравенство **[8]**, в котором соотношение между скоростью релаксационных процессов (θ) и скоростью деформирования ($\dot{\varepsilon}$) представлено произведением характерного времени релаксации на скорость деформации $\dot{\varepsilon}\times\theta > 0{,}5$.

Близким по физическому толкованию к этому уравнению является коэффициент (m_f; m_t; m_γ), характеризующий степень изменения модуля упругости (E), напряжения (**σ**) или прочности при росте частоты (f), времени (t) или скорости ($\dot{\gamma}$) деформирования:

$$m_t = \frac{\Delta lgE}{\Delta lgf} \text{ или } \frac{\Delta lg\sigma}{\Delta lg\dot{\gamma}} \ .$$

Чем больше прирост этого показателя с ростом или понижением частоты (скорости) деформирования, а также уменьшением или ростом времени воздействия нагрузки, тем ближе значения временных показателей деформирования ($\dot{\varepsilon}$ *и* f) и времени релаксации (θ). Максимуму этого соотношения отвечает переходная зона (**рис. 4, 5**). Достижение максимального значения (m_t) соответствует границе, когда тенденция в изменении соотношения времени релаксации и скорости деформирования меняется на противоположную.

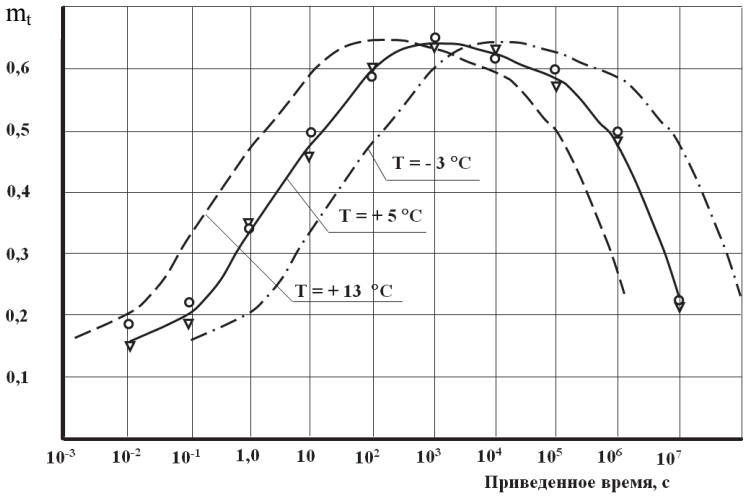

Рис. 5. Зависимость коэффициентов m_t от времени действия постоянной нагрузки

*(ползучесть при растяжении – ∇, кручении – ○) при температурах: +13 °С; +5 °С; -3 °С (обработка данных **[4]**)*

Коэффициент (m) по существу является коэффициентом чувствительности реологических показателей к частоте (m_f) или времени (m_t) деформирования. Он может быть назван индексом временной или релаксационной чувствительности асфальтобетона. По временной шкале он растет от малых значений (0,1-0,2), проходит максимум и достигает практически тех же начальных значений. Это является следствием того, что при фиксированной температуре в области малых частот период релаксации меньше периода частоты; с переходом через максимум m_f и с дальнейшем повышением частоты периоды релаксации становятся больше, чем периоды частоты деформирования. В 1949 г. этот коэффициент был предложен Н.Н. Ивановым и М.Я. Телегиным **[9]** в качестве коэффициента пластичности, характеризующего зависимость прочности асфальтобетона на сжатие при положительных температурах от скорости деформирования. В последующем он был применен А.В. Руденским **[10]** для характеристики временной зависимости модулей упругости асфальтобетонов. При этом речь шла главным образом о возрастающих ветвях этих зависимостей при положительных температурах и малых диапазонах скоростей (около 1,5 порядка).

Аналогичная тенденция свойственна и температурным зависимостям m_f (**рис. 6**). Значения максимумов m_f остаются близкими при различных температурах. Однако положение максимума m_f смещается в сторону низких температур при повышении скорости (частоты) деформирования и, наоборот, при их уменьшении. В то же время ветви падения и нарастания модулей практично симметричны и смещаются параллельно друг другу с изменением частоты. Температуры смещения максимумов изменяются на 6-8ºС при изменении частоты на 1 порядок. Особенностью температурно-частотных зависимостей m_f является их практическая независимость от режима деформирования и схемы напряженно-деформированного состояния: консольного изгиба или сдвига при кручении, что может свидетельствовать об идентичности механизма релаксации в асфальтобетоне при разных схемах напряженного состояния **[3, 4]** (**рис. 4-6**).

Исходя из этого, можно предположить, что аналогичным образом по шкале частот и температур перемещаются релаксационные спектры асфальтобетонов. Поскольку асфальтобетоны являются системами, в которых битум адсорбирован (структурирован) поверхностью минеральных материалов, то коэффициент их частотной зависимости никогда не приближается к 1. Подтверждением этому также служат данные [**4**], свидетельствующие о том, что коэффициенты приведения ВЛФ, определяемые при осевом растяжении и сдвиге при кручении с погрешностью не более 10 %, совпадают в диапазоне температур от минус 30 ºС до плюс 40 ºС. Аналогичная тенденция имеет место в слу-

чае температурно-частотных значений коэффициентов (m_t и m_f), которые во временном диапазоне (9 десятичных порядков) при тех же напряженных состояниях различаются не более чем на 10 % (**рис. 5, 6**).

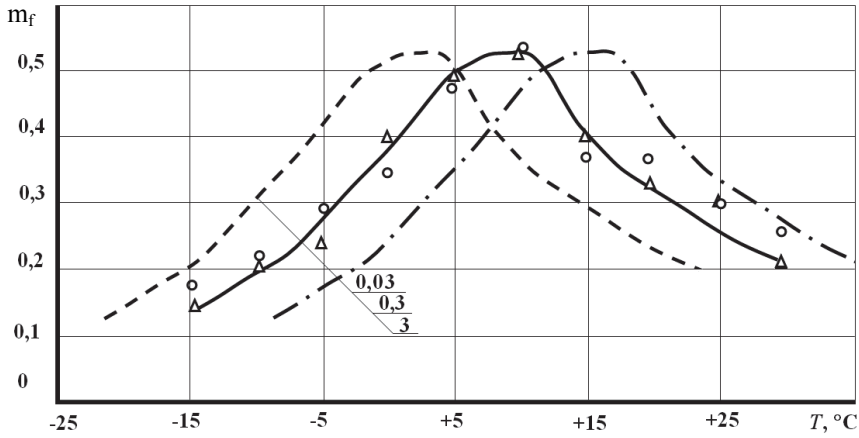

Рис. 6. Температурные зависимости коэффициентов (m_f) по модулям накопления: при изгибе (E´) – △; при кручении (G) – ○; при частоте 0,3 Гц

(обработка данных [3]);смещение зависимости при уменьшении частоты до 0,03 Гц (- - -) и увеличении частоты до 3 Гц (– · –)

Приведенные выше закономерности, установленные по данным [**3**] при динамическом деформировании, практически полностью воспроизводятся результатами обработки данных [**4**], полученными при статических нагружениях **(рис. 5**, **6)**. Также как в предыдущем случае максимумы коэффициентов m_t и m_f смещаются приблизительно на 6-8 ºС при изменении времени нагружения на 1 порядок.

Температурные зависимости модулей асфальтобетона (**рис. 7**), также как и частотные, позволяют обнаружить три области:

- выход на плато при низких температурах, т.е. область застеклованного состояния;
- область выполаживания при высоких температурах, которую можно идентифицировать как область вязкопластичности;
- переходную область, в некоторой (срединной) части которой имеется участок прямолинейной связи модуля с температурой. В этом случае область плато больших модулей ассоциируется с областью высоких частот или малых времен деформирования (при испытаниях на ползучесть).

При повышении скорости или частоты деформирования обобщенные температурные зависимости смешаются в область повышенных температур, а при уменьшении этих параметров испытаний в обратном направлении. Такие перемещения друг относительно друга свидетельствуют о вариации деформационного состояния асфальтобетона при одной и той же температуре. Следовательно, необходимо выбрать физически обоснованную температуру таких переходов. Общепринято, что таковой является температурное стеклование органических термопластов.

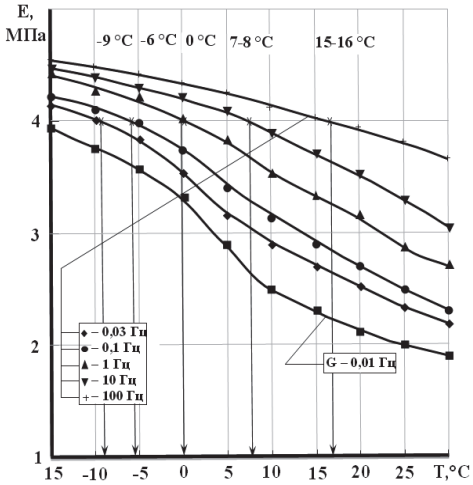

Рис. 7. Температурная зависимость модуля упругости E (♦– 0,03; ● – 0, 1; ▲ – 1; ▼ – 10 Гц) и модуля сдвига G (0,1 Гц) при разных частотах деформирования

Существует множество методов определения температуры стеклования. Одним из них является *термомеханический метод Каргина–Слонимского*, когда определяется точка прохождения области постоянства деформаций. Применительно к настоящему исследованию это может быть температура, при которой значение модулей стабилизируется. Ввиду плавного выхода на плато стеклования для практических целей целесообразно определять температуру, при которой касательная к зависимости модулей в переходной области пересекается с горизонталью, отвечающей определенному значению модулей, соответствующему твердому состоянию асфальтобетона. Для асфальтобетонов, согласно [**5**], это значение модулей при изгибе может быть принято равным 10^4 МПа. При таком подходе определяемая температура может рассматриваться как температура механического стеклования (ТМС). При

определении модуля сдвига эта граница, исходя из данных **[3]**, должна быть снижена в 2,5 раза. Эта температура достаточно чувствительна к качеству, количеству, типу битумов (золь, золь-гель, гель), качеству и количеству битумов, модифицированных полимерами, используемых в асфальтобетонах **[5]**. Подобный подход спустя много лет использован для определения хрупкости битумов в системе SHRP *Superpave* **[11]**.

Использование ТМС позволило получить результаты, приведенные на **рис. 8** и в **табл. 1.** Зависимости на **рис. 8** свидетельствуют о том, что ТМС в широком диапазоне частот деформирования практически пропорциональны частоте. Изменение частоты на 4 порядка при изгибе и сдвиге повышает ТМС на 30 ºС, т.е. в среднем на 7,5 ºС при изменении частоты на 1 порядок. Изменение ТМС, установленное по результатам испытаний на податливость **[4]** при растяжении и сдвиге при кручении, приводит к близким результатам: при расширении диапазона частот на 4 порядка (путем приведения времени нагружения по формуле Ван дер Поля) повышает температуру стеклования на 26 ºС, т.е на 6,5 ºС на 1 временной порядок. Близкие значения ТМС при разных схемах напряженного состояния подтверждают подчеркнутую выше идентичность релаксационных процессов, протекающих в асфальтобетоне при разных схемах деформирования (схема осевого сжатия требует отдельного рассмотрения).

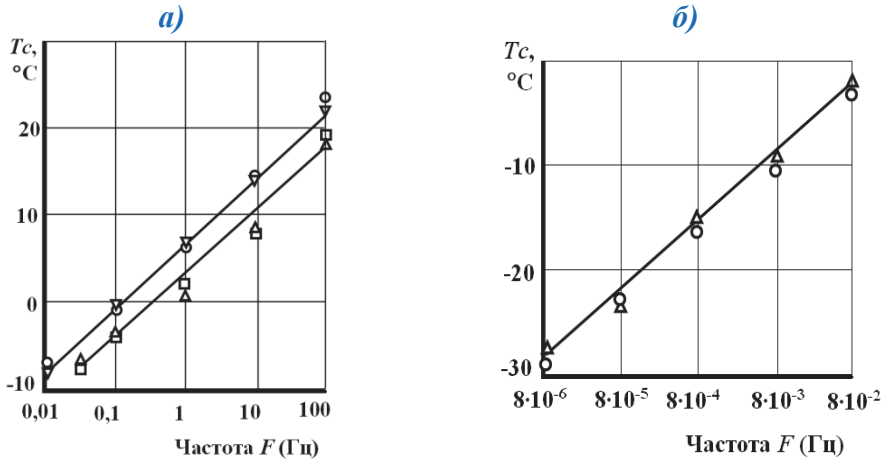

Рис. 8. Частотные зависимости температуры стеклования (Тс) асфальтобетона:
а) – при изгибе по E – ○, □; E – ∇, Δ (по данным **[3]**);*
*б) – при растяжении – ○; при кручении – Δ (по данным **[4]**)*

Приведенные в **табл. 1** данные позволяют оценить степень соответствия показателей ТМС, полученных разными авторами в разное время при разных схемах напряженного состояния. Такие данные также полезны в отношении возможности оценки ТМС и других деформационных характеристик методами динамического и стационарного деформирования. Первые более приемлемы для испытания при малых временах деформирования (высоких частотах), вторые, наоборот – при больших временах деформирования (недоступных при очень низких частотах).

Полученные предложенным методом при частоте 0,5 Гц для асфальтобетонов на различных вяжущих температуры стеклования [**5**] растут с переходом от битума типа гель к битуму типа золь марки 60/90 на 17 ºС (-35 ºС…-18 ºС). При последовательном понижении консистенции по пенетрации ряда битумов (40/60, 60/90, 90/130, 130/200) ТМС изменяется соответственно от -20 ºС до -34 ºС; с введением в исходный битум 3, 5, 7, 10 % термоэластопласта типа СБС ТМС снижается от 11 ºС до -25 ºС [**12**].

Таблица 1

Температуры механического стеклования асфальтобетона при статическом и динамическом деформировании

Источник	*Механический показатель*	*Температура стеклования (ºС), при частотах (Гц) или временах деформирования (с)*				
		$\frac{2 \cdot 10^5}{8 \cdot 10^6}$	$\frac{2 \cdot 10^4}{8 \cdot 10^{-5}}$	$\frac{2 \cdot 10^3}{8 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{20}{8 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{2}{8 \cdot 10^{-2}}$ **
[4]	*Податливость:* *–растяжение* *–кручение*	-29 -28	-23 -23	-16 -15,5	-10 -9	-3,5 -2
[3]*	*Модули*	0,01	0,1	1	10	100
	–E изгиб* *–E´изгиб* *–G´кручение*	-8 -7 – -8 -7	-5 -4 -5	0 0 2	7 6 8	19 18 15

Примечание: ** – В исследовании [3] начальная частота составляет 0,03 Гц.*
*** – В знаменателе приведены значения частот, отвечающие времени деформирования.*

В результате реакции асфальтобетона на время, скорость, частоту приложения нагрузки (скорость движения транспортных средств) ТМС может колебаться в пределах 6-8 ºС, что может способствовать переходу деформационноспособного асфальтобетона в хрупкое состояние, которое проявляется в трещинообразовании покрытий.

Заключение

Процессы деформирования асфальтобетонов носят релаксационный характер. Характеристикой релаксационных процессов может служить коэффициент временной зависимости (чувствительности), представляющий собой отношение приращения логарифма модулей упругости к разнице логарифмов соответствующих временных характеристик (частот, скоростей, времени деформирования). Такой коэффициент может быть назван индексом релаксационной чувствительности асфальтобетона. Обобщенные по методу ТВА частотные или временные зависимости модулей имеют S-образный вид с достаточно отчетливо выраженными областями выхода на плато высоких и низких значений модулей соответственно при больших частотах (малых временах) и низких частотах (больших временах) деформирования. Индекс релаксационной чувствительности (m_f и m_t) в переходной области имеет максимальное значение.

Переходная область соответствует равновесию факторов времени деформирования и времени релаксации, что может быть использовано для определения характерного времени релаксации. В соответствии с принципом ТВА температурные зависимости этого коэффициента могут смещаться друг относительно друга в сторону более низких температур при увеличении времени или уменьшении частоты деформирования и наоборот.

Температура механического стеклования, будучи релаксационно обусловленной характеристикой состояния асфальтобетона, зависит от скорости и частоты деформирования. Она смещается в направлении низких температур или высоких температур в зависимости от интенсивности деформирования. Количественно повышению временного фактора на 1 порядок соответствует смещение температуры в сторону ее положительных значений на 6-8 ºС. Такое же смещение характерно и для максимумов (m_f и m_t). Температурные или скоростные зависимости модулей упругости, а также скоростные зависимости ТМС инвариантны по отношению к схемам напряженно-деформационного состояния (изгиб, растяжение, сдвиг).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров / Дж. Ферри. – М.: Издательство иностранной литературы. – 1963. – 536 с.*
2. *Huet Ch. Étude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés // Thèse de Docteur-Ingénieur/ Faculté des Sciences de l'Université de Paris. – Paris. – 1963. – 69 p.*
3. *Sayegh G. Contribution à l'Étude des Properiétés viscoélastiques des bitumes purs et des bétons bitumineux // Thèse de Docteur-Ingénieur / Université de Paris. – Paris. – 1965. – 135 p.*
4. *Soleimani P. Étude sur le comportement viscoélastique des materiaux bitumineux par méthode de fluage // Thèse de Docteur-Ingénieur. – Université de Paris. – Paris. – 1965. – 138 p.*
5. *Золотарев В.А. Долговечность дорожных асфальтобетонов / В.А. Золотарев. – Харьков: Вища школа. – 1977. – 116 с.*
6. *Vinogradov G.V. Rheological Properties of Road Bitumen / G.V. Vinogradov, A.I. Isagev, V.A. Zolotarev, E.A. Verebskaya // Rheologica Acta 16. – 1977. – P. 266-281.*
7. *Малкин А.Я. Временные эффекты при переходе через предел текучести коагуляционных дисперсных систем / А.Я.Малкин, О.Ю. Сабсай, Е.А. Веребская, В.А. Золотарев, Г.В. Виноградов // Коллоидный журнал. – 1976. – № 1. – С. 181-183.*
8. *Малкин А.Я. Разрушение полимеров в вязкотекучем состоянии при растяжении / А.Я. Малкин, Г.В. Виноградов // Высокомолекулярные соединения. – 1985. – Т. 27А. – № 2. – С. 227-237.*
9. *Иванов Н.П. К обоснованию показателей механических свойств асфальтобетонных смесей / Н.П. Иванов, М.Я. Телегин // Исследование органических вяжущих материалов и физико-механических свойств асфальтовых смесей: сб. статей. – М.: Дориздат. – 1949. – С. 106-132.*
10. *Руденский А.В. Реологические свойства битумо-минеральных материалов / А.В. Руденский, И.М. Руденская. – М.: Высшая школа. – 1971. – 131 с.*
11. *Anderson D.A. Programmes SHRP. Études d'essai et spécification des liants / D.A. Anderson // Revue générale des routes et des aérodromes. – 1994. – № 714. – P. 48-52.*
12. *Золотарев В.А. Свойства асфальтобетонов на основе битумов с большим содержанием полимера / В.А. Золотарев, А.С. Лапченко // Битумы, модифицированные полимерами и добавками. – Избранные труды. Т. 2. – Спб: Славутич, 2013. – С. 103-110.*

L I T E R A T U R A

1. *Ferri Dzh. Vyazkouprugie svojstva polimerov / Dzh. Ferri. – M.: Izdatel'stvo inostrannoj literatury. – 1963. – 536 s.*
2. *Huet Ch. Étude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés // Thèse de Docteur-Ingénieur/ Faculté des Sciences de l'Université de Paris. – Paris. – 1963. – 69 p.*
3. *Sayegh G. Contribution à l'Étude des Properiétés viscoélastiques des bitumes purs et des bétons bitumineux // Thèse de Docteur-Ingénieur / Université de Paris. – Paris. – 1965. – 135 p.*
4. *Soleimani P. Étude sur le comportement viscoélastique des materiaux bitumineux par méthode de fluage // Thèse de Docteur-Ingénieur. – Université de Paris. – Paris. – 1965. – 138 p.*
5. *Zolotarev V.A. Dolgovechnost' dorozhnyh asfal'tobetonov / V.A. Zolotarev. – Har'kov: Vishcha shkola. – 1977. – 116 s.*
6. *Vinogradov G.V. Rheological Properties of Road Bitumen / G.V. Vinogradov, A.I. Isagev, V.A. Zolotarev, E.A. Verebskaya // Rheologica Acta 16. – 1977. – P. 266-281.*
7. *Malkin A.Ya. Vremennye effekty pri perekhode cherez predel tekuchesti koagulyacionnyh dispersnyh sistem / A.Ya. Malkin, O.Yu. Sabsaj, E.A. Verebskaya, V.A. Zolotarev, G.V. Vinogradov // Kolloidnyj zhurnal. – 1976. – № 1. – S. 181-183.*
8. *Malkin A.Ya. Razrushenie polimerov v vyazkotekuchem sostoyanii pri rastyazhenii / A.Ya. Malkin, G.V. Vinogradov // Vysokomolekulyarnye soedineniya. – 1985. – T. 27A. – № 2. – C. 227-237.*
9. *Ivanov N.P. K obosnovaniyu pokazatelej mekhanicheskih svojstv asfal'tobetonnyh smesej / N.P. Ivanov, M.Ya. Telegin // Issledovanie organicheskih vyazhushchih materialov i fiziko-mekhanicheskih svojstv asfal'tovyh smesej: sb. statej. – M.: Dorizdat. – 1949. – S. 106-132.*
10. *Rudenskij A.V. Reologicheskie svojstva bitumo-mineral'nyh materialov / A.V. Rudenskij, I.M. Rudenskaya. – M.: Vysshaya shkola. – 1971. – 131 s.*
11. *Anderson D.A. Programmes SHRP. Études d'essai et spécification des liants / D.A. Anderson // Revue générale des routes et des aérodromes. – 1994.– № 714. – P. 48-52.*
12. *Zolotarev V.A. Svojstva asfal'tobetonov na osnove bitumov s bol'shim soderzhaniem polimera / V.A. Zolotarev, A.S. Lapchenko // Bitumy, modificirovannye polimerami i dobavkami. – Izbrannye trudy. T. 2. – Spb: Slavutich, 2013. – S. 103-110.*

RELAXATION SENSITIVITY INDEX OF ASPHALT CONCRETE

Doctor of Engineering ***V.A. Zolotarev***
(Kharkov National Automobile
and Highway University (HNADU))
Contact information: kafedradsm@gmail.com

The article concerns the processes of asphalt concrete deformation. The generalized temperature-time (frequency) dependences are given. A relaxation sensitivity index revealing the deformation mechanism in a large time range is proposed. Its sensitivity to deformation rate and temperature is shown. The dependence of the mechanical glass-transition temperature of asphalt concrete on frequency and time deformation is determined.
Key words*: modulus of elasticity, frequency, temperature, relaxation time, bending, shear, glass-transition temperature.*

Рецензент: д-р техн. наук А.В. Руденский (ФАУ «РОСДОРНИИ»).
Статья поступила в редакцию: 06.11.2018 г.