Relationship between Asphalt Concrete Linear Stress Limit and Bitumen Shear Stress Limit

Victor Zolotaryov

Automobile and Highway University

ABSTRACT

The rheological behaviour of asphalt concrete is mostly stipulated by the time-temperature (frequency) peculiarities of the mechanical behaviour of bitumen binder. Bitumen is among the first item of research in rheological science.

One criteria of the objective evaluation of the rheological properties of bitumen is realised in the condition of its deformation in the linearity region.

In relation to asphalt concrete, this criterion allows the applicability of the method of time-temperature superposition according Williams- Landel-Ferry model for complex moduli and their dependence on the composition of asphalt concrete and type of bitumen (sol, gel, or sol-gel) to be proven. Also, it can show the direct relation between complex moduli of asphalt concrete and the complex shear modulus of bitumen binder, providing a method of calculation of the complex modulus of asphalt concrete with the complex shear modulus of bitumen. However, it is not clear on which parameters of bitumen and bituminous binder properties the asphalt concrete linear viscoelastic LVE behaviour depends directly.

Keywords: bitumen binder, asphalt concrete, penetration, linear viscoelastic behaviour, LVE stress limit, shear strength.

Classification: DDC Code: 665.4 LCC Code: TP690

Language: English

London Journals Press

LJP Copyright ID: 392953
Print ISSN: 2631-8474
Online ISSN: 2631-8482

London Journal of Engineering Research

Volume 22 | Issue 9 | Compilation 1.0

Relationship between Asphalt Concrete Linear Stress Limit and Bitumen Shear Stress Limit

Victor Zolotaryov

ABSTRACT

The rheological behaviour of asphalt concrete is mostly stipulated by the time-temperature (frequency) peculiarities of the mechanical behaviour of bitumen binder. Bitumen is among the first item of research in rheological science.

One criteria of the objective evaluation of the rheological properties of bitumen is realised in the condition of its deformation in the linearity region.

In relation to asphalt concrete, this criterion allows the applicability of the method of time-temperature superposition according Williams-Landel-Ferry model for complex moduli and their dependence on the composition of asphalt concrete and type of bitumen (sol, gel, or sol-gel) to be proven. Also, it can show the direct relation between complex moduli of asphalt concrete and the complex shear modulus of bitumen binder, providing a method of calculation of the complex modulus of asphalt concrete with the complex shear modulus of bitumen. However, it is not clear on which parameters of bitumen and bituminous binder properties the asphalt concrete linear viscoelastic LVE behaviour depends directly.

This paper aims to illustrate that this parameter is the maximal shear stress in bitumen binder, which is obtained with the same asphalt concrete temperatures and frequencies or equal deformation rates. Considering this, maximal shear stress can be obtained with monoplanar or rotational shear, as with the calculation method.

This research uses a monoplanar cohesion meter, a rotational viscometer, and test equipment to determine the complex moduli of asphalt concrete by means of harmonic oscillation, corresponding to EN 12697-26:2012.

Keywords: bitumen binder, asphalt concrete, penetration, linear viscoelastic behaviour, LVE stress limit, shear strength.

Author: Doctor of Technical Sciences, professor of Kharkiv National Automobile and Highway University. 61002, Ukraine, Kharkov, st. Yaroslava Mudrogo, 25 e-mail: kafedradsm@gmail.com

I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основным условием обеспечения надежности работы дорожных слоев является их способность к обратимому восстановлению деформаций, вызванных транспортными нагружениями. Эта способность сохраняется в тех случаях, когда связь между возникающими в слое напряжениями и деформациями при определенных скоростях или частотах деформирования является линейной, т.е. когда материалы слоев не выходят за пределы области линейного вязкоупругого (ЛВУ) поведения. Для объективного прогнозирования реологического поведения асфальтобетона целесообразно использовать характеристики его линейного состояния, которые можно установить по границам линейной зависимости между напряжением и деформацией.

Обнаружение области линейного поведения асфальтобетона открыло возможность изучения взаимосвязи между комплексными модулями асфальтобетонов и комплексными модулями сдвига битумных вяжущих.

Экспериментальные степенные зависимости между комплексными модулями и частотой деформирования были получены в работах [1, 2, 3, 4]. Позже были предложены модели расчета температурно- частотных зависимостей комплексных модулей

асфальтобетона по соответствующим показателям, вяжущих [5].

Несмотря на огромный поток информации по рассматриваемому научному направлению, одна из его сторон до сих пор осталась неизученной, а именно, взаимосвязь критического напряжения ($\sigma_{ЛВУ}$) или критической деформации ($\varepsilon_{ЛВУ}$) линейности асфальтобетона с реологическими или техническими показателями битумов.

Существуют работы, в которых приводятся зависимости модулей упругости от пенетрации [6, 7] но это не решает проблему.

После публикации исследований [8, 9] предварительное определение области линейной вязкоупругости стало обязательным при изучении температурно-частотных зависимостей любых асфальтобетонов.

Границей линейности в [2] было принято отклонение комплексного модуля асфальтобетона от начального его значения на 5 %. Это же требование принято и в [3, 4].

Развиваемые в этом направлении исследования раскрыли одну из особенностей изменения критериев линейности асфальтобетона с частотой и температурой.

Она состоит в том, что предельные напряжении линейности ($\sigma_{ЛВУ}$) более чувствительны к частоте деформирования, чем предельные деформации ($\varepsilon_{ЛВУ}$). Согласно данным [3, 4] с ростом частоты деформирования от 0,01 Гц до 20 Гц при температуре 20 °С $\varepsilon_{ЛВУ}$ возрастает в 1,2 раза, $\sigma_{ЛВУ}$ – 8-10 раз. Согласно [1] при изменении частоты на 2 порядка (от 0,1 Гц до 10 Гц) и той же температуре $\varepsilon_{ЛВУ}$ возрастает в 1,29 раза, а критическое напряжение ($\sigma_{ЛВУ}$) – в 7,8 раз.

Значение этих характеристик изменяется с температурой. При прочих равных условиях, по данным [3, 4] повышение температуры от 10 °С до 40 °С понижает σ_{LVE} почти в 16 раз, в то время как $\varepsilon_{ЛВУ}$ мало зависит от температуры и частоты деформирования [10].

Это подтверждается также данными [11] из которых следует, что с ростом комплексного модуля $E^*_{ЛВУ}$ критическое напряжение асфальтобетона растет в 2,6 раза больше, чем критическая деформация. Согласно [12] это соотношение равно 2,4, а согласно [13] – 1,8 раза.

С учетом накопившихся к настоящему времени сведений об обусловленности реологического поведения асфальтобетона реологическими свойствами битума целью настоящей работы является установление взаимосвязи между предельными напряжениями асфальтобетона (σ_{LVE}) и предельными напряжениями сдвига битума ($\tau_б$).

II. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве вяжущих для исследований использованы: битумы различной консистенции; битумы, полученные окислением и вакуумной дистилляцией; битумы, модифицированные полимерами (табл. 1).

Таблица 1: Свойства принятых к исследованию вяжущих

Битумы	Полимер	%	Свойства вяжущих					Обозначения
			$П_{25}$, дм	$Т_р$, °С	IP	$Т_{хр}$, °С	$Е_{25}$, %	
1	SBS линейный	0	46	56	0,0	-15	–	○
		3	30	72	1,92	-15	77	●
2	SBS линейный	0	70	51	-0,11	-18	–	△
		3	46	66	1,94	-18	80	▲
3	SBS линейный	0	116	46	0,01	-20	–	◇
		3	60	55	0,44	-20	86	◆
		5	48	80	4,21	-19	95	■

		7	40	91	5,11	-28	95	▲
	SBS радиальный	3	70	59	1,74	-19	88	●
	EVA	5	76	53	0,62	-20	57	+
4	SBS линейный	0	176	39	-1,04	-23	–	□
		3	66	52	-0,02	-21	90	■
		3	126	47	0,64	-25	93	
5		0	57	54	-0,20	-16	–	
		0	72	50	-0,7	-17	–	
		0	120	45	-0,5	-18	–	
		0	170	42	-0,4	-19	–	

Минеральный порошок, полученный помолом известняка, содержал зерен мельче 0,071 мм – 72 %. Гранулометрический состав минеральной части исследованного асфальтобетона типа Б характеризовался: полными остатками на ситах с размером круглых отверстий (мм): 10, 5; 2,5, 1,25, 0,63, 0,315, 0,14, 0,071 соответственно (20, 40, 53, 63, 72, 80, 86 и 89) %. Содержание вяжущего в такой смеси было в пределах 4,8-5,0 %, сверх 100 % минеральной части. Критерием назначения содержания вяжущего было то его количество, при котором прочность асфальтобетона на сжатие при 20 °С была максимальной.

III. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Битумные вяжущие:
Среди предполагаемых показателей свойств вяжущих, которые могут быть взаимосвязаны с характеристикой $\sigma_{ЛВЕ}$ асфальтобетона, как показано выше, предпочтительным является сопротивление сдвигу и когезия.

Сопротивление сдвигу определяли при деформировании вяжущего в зазоре ротационного вискозиметра при скорости равной $1с^{-1}$ и температуре 25 °С по методу EN 13302:2010.

Когезию при сдвиге определяли методом одноплоскостного сдвига пленки вяжущего в слое толщиной 200 мкм при тех же температуре и скорости сдвига.

Сопротивления сдвига, установленное таким образом, согласуется с сопротивлением сдвига, установленным методом ротационной вискозиметрии [14].

Асфальтобетоны: Реологические свойства асфальтобетонов исследовали методом гармонических колебаний в соответствии с EN 12697-26 [15] по схеме изгиба двумя сосредоточенными силами[8, 9]. При такой схеме напряженного состояния имеется возможность измерять очень малые относительные деформации, начиная от $1x10^{-5}$. Испытания выполняли в диапазоне температур – от минус 25 °С до плюс 30 °С и частот от 0,01 Гц до 20 Гц.

Каждому испытанию по определению комплексных модулей в широком диапазоне частот и температур предшествовало определение зависимости между усилиями и прогибами. Предельным напряжением линейности считали участок, в пределах которого отклонение от линейности не превышало 10 %. Типичные диаграммы напряжение – деформация и схема определения $\sigma_{ЛВУ}$ $\varepsilon_{ЛВУ}$ при температуре 20 °С и частоте 0,5 Гц приведены на рис.1.

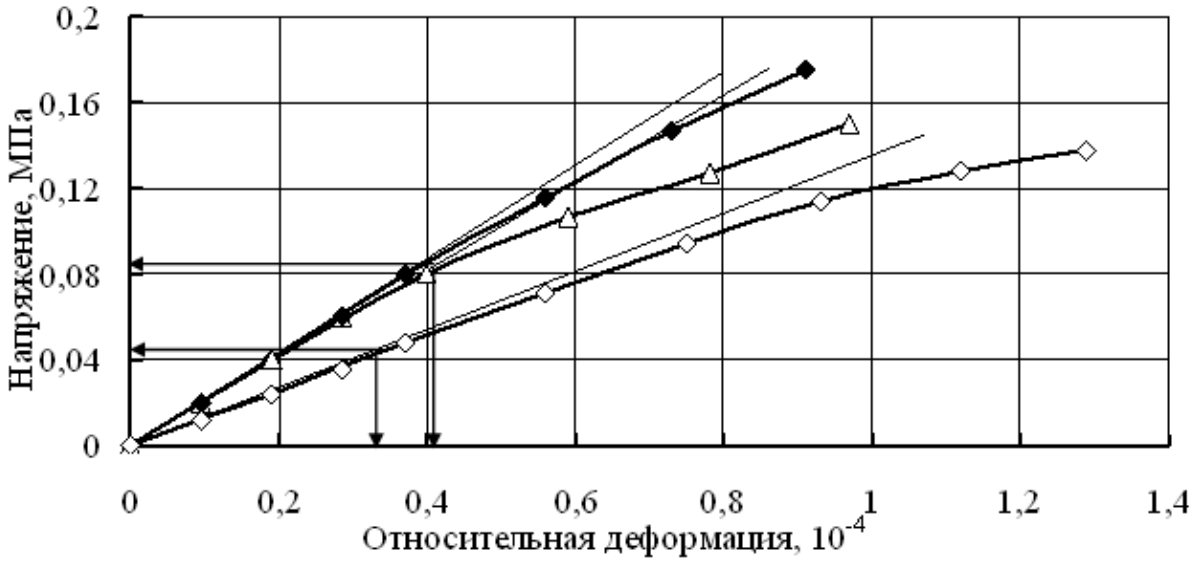

Рис. 1: Зависимость между напряжениями ($\sigma_{ЛВУ}$) и деформациями ($\varepsilon_{ЛВУ}$) асфальтобетона на вяжущих с разной пенетрацией: ◇ - 116 × 0,1 мм; △ - 70 × 0,1 мм и БМП ⋄ - 60 × 0,1 мм

3.1 Экспериментальная зависимость предельных напряжений линейности ($\sigma_{ЛВУ}$) асфальтобетона от пенетрации битума

Исторически при исследовании асфальтобетона на протяжении 50 лет в первую очередь уделяли внимание зависимости его механических свойств от пенетрации битумов. Для принятых объектов исследования зависимости $\sigma_{ЛВУ}$ от пенетрации [16] показаны на рис.2. Рост пенетрации вяжущего приводит к существенному снижению $\sigma_{ЛВУ}$ асфальтобетона на его основе.

С повышением пенетрации от 46 до 70 dmm, 116 dmm и 176 dmm (т.е. в 1,52; 2,56 и 3,82 раза) критическое напряжение $\sigma_{ЛВУ}$ уменьшается в 1,73, 3,22 и 5,9 раза. При этом критическая деформация линейности $\varepsilon_{ЛВУ}$ уменьшается в 1,42; 1,76 и 2,62 раза. При близкой пенетрации вяжущие (чистый битум – 46 dmm; битум с $П_{25}$=70 dmm и с 3 % полимера – $П_{25}$=46 dmm; битум с пенетрацией 116 dmm и с 5 % полимера –$П_{25}$=48 dmm) имеют критические напряжения (σ_{LVE}) асфальтобетонов линейности соответствовали 0,142 МПа, 0,140 МПа и 0,144 МПа.

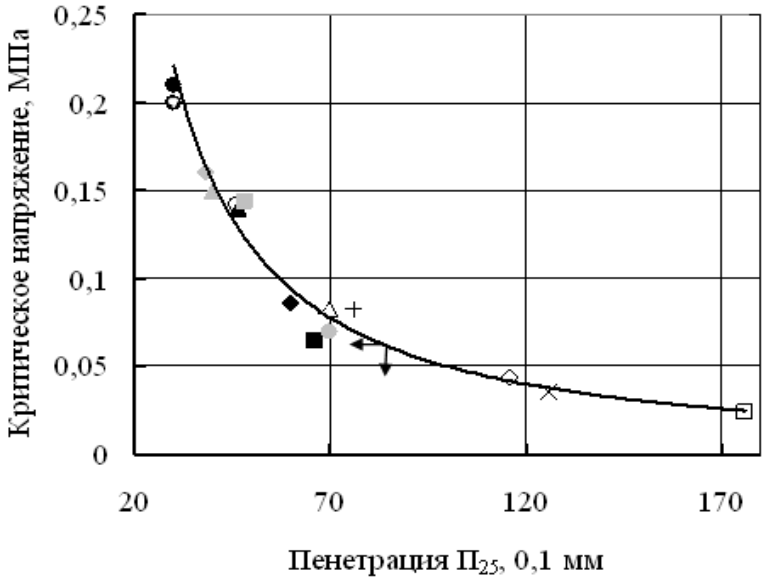

Рис. 2: Взаимосвязь между критическим напряжением линейности σ_{LVE} асфальтобетонов и асфальтополимербетонов (при температуре 20 °С и частоте 0,5 Гц) и пенетрацией вяжущих (условные обозначения приведены в табл.1)

Для зависимости, приведенной на рис.2, переход от резко ниспадающей ветви к плавно изменяющейся части зависимости обусловлен конусностью пенетрационной иглы и отвечает пенетрации (60-70) dmm.

Эта зависимость свидетельствует о безусловной связи пенетрации с σ_{LVE} асфальтобетона. Она подобна множеству зависимостей от пенетрации прочности, модулей жесткости, колеестойкости асфальтобетона. Однако все они остаются условными настолько, насколько пенетрация является условной эмпирической характеристикой. Именно поэтому пенетрация исключена из системы SHRP Superpave и в нее введена фундаментальная характеристика модуля сдвига битума.

Учитывая это, целесообразно установить объективную, метрологически обоснованную связь между $\sigma_{ЛВУ}$ асфальтобетона и характеристикой, отражающей сопротивление сдвига битума при заданных температуре и скорости деформирования. Его можно определить экспериментально, как описано выше или расчетом по методике, приведенной в [17].

3.2 Степенные зависимости $\sigma_{ЛВУ}$ от частоты деформирования

Предельным напряжениям линейной вязкоупругости асфальтобетонов присуща принципиальная особенность, характерная для всех вязкоупругих систем и выражающаяся в зависимости их реологических характеристик от скорости, частоты или времени деформирования. Как правило, эти зависимости являются степенными (рис.3). Для асфальтобетонов на битумах разной консистенции, полученных из одной нефти способом окисления, коэффициенты частотной зависимости практически одинаковы. Приведенная на рис.

3 прямая, обозначенная Δ, относится к асфальтобетону на использованном в работе [3] дистилляционном битуме с пенетрацией 49 х0,1 мм и температурой размягчения – 52 °С.

Это может объясняться тем, что у него наиболее низкий индекс пенетрации (-0,76) по сравнению с другими, т.е он наиболее чувствителен к частоте деформирования и температуре. Он находится в области самых больших значений σ_{LVE}, т.к. использованный для получения асфальтобетона битум имел самую низкую, по сравнению с другими битумами, пенетрацию.

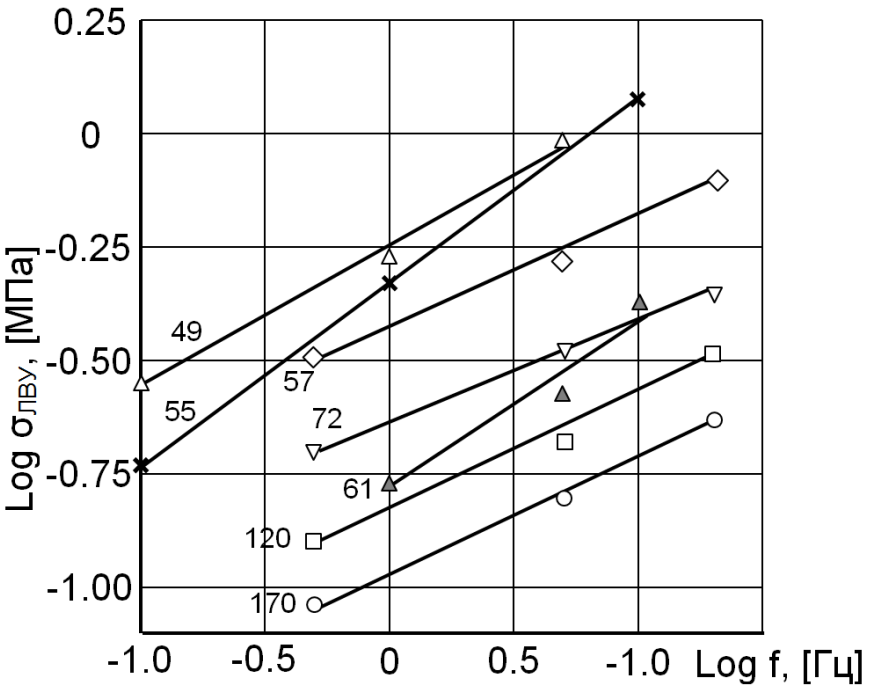

Рис. 3: Зависимость напряжения линейности (σ_{LVE}) от частоты (f) деформирования асфальтобетонов на битумах с разной пенетрацией при 20 °С (Цифры над прямыми – пенетрация при 25 °С)

Прямая, обозначенная ▲, получена обработкой данных [3]. Она относится к битуму, модифицированному радиальным SBS. Она расположена существенно ниже прямой, обозначенной Δ, поскольку в этом случае пенетрация БМП (61х0,1 мм) существенно больше пенетрации чистого битума ($П_{25}$=49х0,1 мм). При этом высокая температура размягчения БМП (72 °С) не повлияла на значение $\sigma_{ЛВУ}$, асфальтобетона.

Определяющим фактором влияния на $\sigma_{ЛВУ}$ является пенетрация. Прямая, обозначенная ×, получена обработкой данных [13]. Она достаточно хорошо согласуется с зависимостями для других вяжущих. Ее больший наклон, как и прямой обозначенной ▲, обусловлен тем, что вяжущие этих асфальтобетонов, как и все дистилляционные битумы, характеризуются большей температурной чувствительностью, чем окисленные битумы. Эти зависимости хорошо согласуются с полученными в [18] зависимостями модуля упругости асфальтобетона от времени действия нагрузки.

3.3 Взаимосвязь $\sigma_{ЛВУ}$ асфальтобетонов и предельного напряжения сдвига вяжущих.

Изначально, когда взаимосвязь $\sigma_{ЛВУ}$ асфальтобетона и предельного напряжения сдвига битумов еще не предполагалась, предельные напряжения асфальтобетонов были определены при температуре 20 °С, и частоте 0,5 Гц. Сопротивление сдвигу вяжущих при выполнении работ, имеющих целью установление взаимосвязи между когезией и пенетрацией, определяли, как отмечено выше, при температуре 25 °С и скорости сдвига 1 $с^{-1}$. Для целей же настоящей работы (обеспечения сопоставимости результатов обоих испытаний), возникла необходимость приведения $\sigma_{ЛВУ}$ асфальтобетонов к круговой скорости 1 $с^{-1}$ по формуле $\omega=2\pi f$. Приведение $\sigma_{ЛВУ}$ к температуре 25 °С было осуществлено по ранее установленному коэффициенту температурной чувствительности $\Delta \lg E^* / \Delta T$ между 20 и 30 °С [1]. Примеры такого приведения даны в табл. 2.

Таблица 2: Критические напряжения линейности $\sigma_{ЛВУ}$, приведенные к условиям, отвечающим условиям определения сопротивления сдвигу вяжущих

Битумные вяжущие, пенетрация при 25 °С	$\sigma_{ЛВУ}$ при 0,5 Гц и 20 °С, МПа	Показатель степенной зависимости $\sigma_{ЛВУ}$	$\sigma_{ЛВУ}$ при 20 °С и $\omega=1с^{-1}$, МПа	$\sigma_{ЛВУ}$ при 25 °С и $\omega=1с^{-1}$, МПа
Битум 70	0,082	0,20	0,065	0,061
БМП 46 (3 % СБС)	0,140	0,17	0,115	0,110
Битум 116	0,044	0,22	0,035	0,032
БМП 60 (3 % СБС)	0,086	0,18	0,070	0,066
Битум 176	0,024	0,24	0,018	0,016
БМП 66 (3 % СБС)	0,064	0,21	0,051	0,048

Взаимосвязь $\sigma_{ЛВУ}$ асфальтобетонов и предельного напряжения сдвига вяжущих (τ) приведена на рис. 4. Она может быть описана корреляционной зависимостью $\sigma_{LVE}=0,967\cdot\tau+0,0002$. Наличие такой зависимости с коэффициентом корреляции $R^2=0,951$ свидетельствует о непосредственном влиянии предельного напряжения сдвига, вяжущего на значение критических напряжений линейности асфальтобетона. При этом зависимость распространяется не только на чистые битумы, но и на битумы, модифицированные умеренным количеством полимера типа СБС. Следовательно, можно предполагать подобие механизмов деформирования пленок битума в когезионном слое и межзерновом слое в асфальтобетоне.

Результаты, относящиеся к асфальтобетонам на битумах, модифицированных полимерами, несколько выпадают из общей зависимости.

Такое отклонение может быть связано с изменением структуры и реологических характеристик вяжущих в результате модификации полимером [10]. На сложность использования подходов, принятых для битумов, к битумам с большим содержанием полимера обращали внимание в [19].

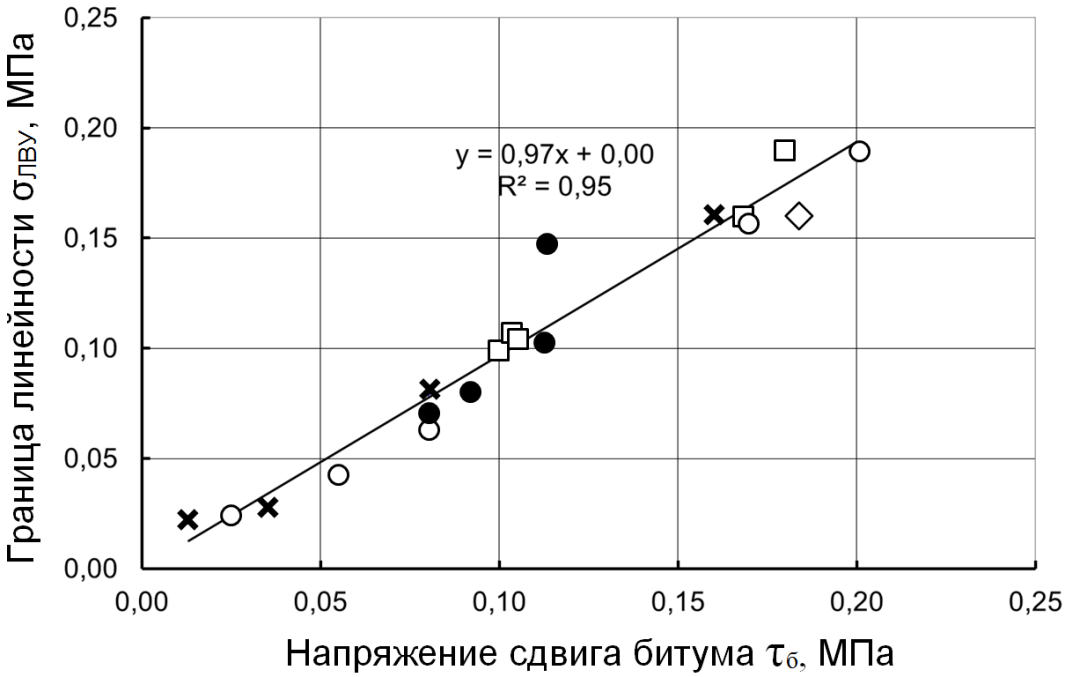

Рис. 4: Взаимосвязь между границей линейности (σ_{LVE}) асфальтобетонов и предельным сопротивлением сдвигу вяжущих при температуре 25 °C. Битумы с пенетрацией (0,1 мм): 57, 72, 120, 157 (×); битумы с пенетрацией (0,1 мм): 46, 70, 116, 176 (○); они же модифицированные 3 % полимера SBS (·); дистилляционный битум с пенетрацией 49 (0,1 мм) (◇) и модифицированный битум с пенетрацией 61 (0,1 мм) (◆) [2]; битумы, окисленные с пенетрацией: 50, 75, 105, 172 (0,1 мм), битумы дистилляционные Nynas с пенетрацией 52, 79, 118, 182 (0,1 мм) для которых когезия определена по пенетрационной зависимости (□) [17].

Дополнительным обстоятельством в пользу полученной зависимости является идентичность сопротивления сдвигу битума, определяемого при ротационных испытаниях [20], и модуля его потерь при эквивалентности круговой частоты и скорости сдвига, а также соответствие сопротивления сдвигу при ротационных измерениях и при одноплоскостном сдвиге [14]. Тем не менее, представляется предпочтительным, учитывая простоту эксперимента, прогнозировать $\sigma_{ЛВУ}$ асфальтобетона путём определения предельного сопротивления сдвига по результатам ротационной вискозиметрии и/или по когезии битумов, установленной при одноплоскостном сдвиге.

Приведенные здесь экспериментальные результаты свидетельствуют о необходимости углубленных исследований физической сущности деформирования битумов и асфальтобетонов на микроуровне в области малых деформаций и напряжений. Это находится в согласии с результатами работ [21, 22, 23, 24].

Требует обоснования практическое совпадение значений модулей упругости асфальтобетонов определяемых: при прямом растяжении и сжатии [25] при изгибе и сжатии [26]. Это относится и к податливости полых образцов при сжатии и непрямом (IDT) растяжении [27]. Обнадеживающим является утверждение, что значения комплексных модулей упругости в области малых деформаций (10^{-5}) не зависят ни от геометрии, ни от конфигурации испытаний [28]. Оно может восприниматься как одно из свидетельств справедливости изложенных здесь результатов исследований.

IV. ВЫВОДЫ

1. Способность асфальтовых бетонов к поведению, характерному линейным вязкоупругим телам, является базовым принципом конструирования и расчета

нежестких дорожных одежд. В соответствии с этим система оценки поведения асфальтобетона по реологическим критериям может быть дополнена характеристиками их линейного поведения: предельными напряжениями и деформациями.

2. Предельные напряжения линейного вязкоупругого поведения асфальтобетонов существенно более чувствительны к изменению свойств битумного вяжущего и внешним температурно-временным (частотным) воздействиям, чем предельные деформации линейности. Это позволяет более наглядно, чем в случае с $\varepsilon_{ЛВУ}$ отражать влияние на реологическое поведение асфальтобетона факторов состава и технологий.
3. Предельные напряжения линейности асфальтобетона, в изученном здесь диапазоне, находятся в степенной зависимости от частоты деформирования, подобно тому, как в этой же зависимости находятся их модули упругости, а также показатели прочности.
4. Установлена близкая к прямолинейной корреляционная зависимость между предельным сопротивлением битумного вяжущего сдвигу и предельным напряжениям линейного деформирования асфальтобетона. Она может быть использована для прогнозирования поведения асфальтобетона под нагрузкой в покрытии при заданной температуре и скорости деформирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Золотарев, В.А. Долговечность дорожных асфальтобетонов Харьков. 1977 116 с.
2. Anderson, D.A., Christenson, D.W., Bahia, H.V., Dongre, R., Sharma, M.G., Antle, C.E., & Button, J. (1994). Binder characterization and evaluation, vol. 3. Physical characterization. Report SHRP-A-369 (491 p.), Washington D.C.
3. Airey, G.D., Rahimzadeh, B., & Collop, A.C. (2002). Linear and nonlinear rheological properties of asphalt mixtures. Proceedings of the 4th European Symposium on the Performance of Bituminous and Hydraulic Materials in Pavements, Nottingham (pp. 137–145).
4. Airey, G.D., Rahimzadeh, B., & Collop, A.C. (2003). Viscoelastic linearity limits for materials. Proceedings of the 6th International RILEM Symposium. Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials (pp. 331–339).
5. Olard, F., Di Benedetto, H., Eckmann, B., & Triquigneaux, J.-P. (2003). Linear viscoelastic properties of bituminous binders and mixtures at low and intermediate temperatures. International Journal of Road Materials and Pavement Design 4(1), 77–107.
6. Francken, L., & Verstraeten, J. (1975). Relation entre le module de rigidité d'un enrobé bitumineux et le module de cisaillement du bitume qu'il renferme. Rapport du deuxième colloque international rilem consacré aux essais sur bitumes et matériaux bitumineux, Budapest (Vol. 1, pp. 375–388).
7. Francken, L. (1977). Module complexe des mélanges bitumineux. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, Spécial V, 181–198.
8. Huet, Ch. (1963). Étude par méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés. Thèse du grade d'ingenieur-docteur (140 p.). Paris.
9. Sayegh, G. (1965). Contribution à l'Étude des Propriétés Viscoélastiques de Bitumes Purs et des Bétons Bitumineux. Thèse du docteur – ingénieur (133 p.). Paris.
10. Bahia, H.V., Zhai, H., Bonetti, K., & Kose, S. (1999). Non-linear viscoelastic and fatigue properties of asphalt binders. Association of Asphalt Paving Technologists, 68, 1–35.
11. Airey, G.D., Rahimzadeh, B., & Collop, A.C. (2011). Linear Viscoelastic Performance of Asphaltic Materials. Road Materials and Pavement Design, Volume 4, Issue 3, (pp. 269–292). https://doi.org/10.1080/14680629.2003.9689949.
12. Liao, Min-Chih, Chen, Jian-Shiuh & Airey Gordon (2015). Characterization of Viscoelastic Properties of Bitumen-Filler

Mastics, Asian Transport Studies, Volume 3, Issue 3, (pp.312-32).
13. Babadopulos, L., Orozco, G., Mangiafico, S., Sauzéat, C. & Di Benedetto, H. (2019) Influence of loading amplitude on viscoelastic properties of bitumen, mastic and bituminous mixtures, Road Materials and Pavement Design, 20:sup2, S780-S796, DOI: 10.1080/14680629.2019.1628428.
14. Zolotarev, V., Pyrig, Y., & Galkin, A. (2018). Cohesion of bitumen: its opportunities and prospects. Road Materials and Pavement Design. doi: 10.1080/14680629.2018.1551149.
15. EN 12697-26:2012 (2018). Bituminous mixtures. Test methods. Stiffness. European Committee for Standardization.
16. Лапченко, А.С. (2010). Реологические свойства асфальтополимербетонов при динамическом деформировании. Ph.D. thesis (231 p.). Kharkov.
17. Золотарёв В.А. Разгаданная пенетрация. Наука и Техника в Дорожной отрасли №4, 2018. с 38-40.
18. Руденский А.В., Руденская И.М. Реологические свойства битумных смесей. М.: «Высшая Школа». -1971. -131 с.
19. Molenaar, J.M.M., Hagos, E.T., Van de Ven, M.F.C., & Hofman, R. (2004). An investigation into the analysis of polymer modified asphalt. Proceedings of 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna (Paper 203, Book II, pp. 2080–2091).
20. Isayev, A., Zolotarev, V.A., & Vinogradov, G.V. (1975). Viscoelastic properties of bitumens in continuous and cyclic deformation. Rheologica Acta 14, 135–144.
21. Des Croix, P., & Di Benedetto, H. (1996). Binder-mix rheology: limits of linear domain, non linear behavior. Eurasphalt & Eurobitume Congress, Strasbourg (Vol. 2, Paper E&E.5.107).
22. Chappat, M., & Ferraro, M. (1997). Pour y voir clair dans les essais SHRP et dans leur application aux bitumes polymères. Revue générale des routes et aérodromes, 753, 47–55.
23. Vinogradov, G.V., Isayev, A.I, Zolotarev, V.A., & Verebskaya, E.A. (1977). Rheological properties of paving bitumen. Rheologica Acta 16, 266–281.
24. Радовский Б.С., Телтаев Б.Б., Вязкоупругие характеристики битумов и их оценка по стандартным показателям. Алматы «Білім Баспасы». –2013. –152с.
25. Goacolou, H., & Mazé, M. (2000). Enrobés à haut module élastique. Proceedings of the Papers Submitted for Review. 2nd Eurasphalt–Eurobitume Congress. Barcelona (Book 1, pp. 269–275).
26. De la Roche, Ch., Di Benedetto, H., & Doubbaneh, E. (1999). Fiabilité des essais de module complex sur enrobés. Comparaison d'essais en flexion et en traction–compression. Eurobitume Workshop 99 (Paper 31).
27. Buttlar, W.G., & Al –Khateeb, G.G. (2003). Evaluating creep compliance of asphaltic paving mixtures using a hollow-cylinder tensile tester. Proceedings of the 6h International RILEM Symposium (pp. 527–533).
28. Olard, F., Noel, F., & Loup, F. (2005). Mesure du module diamétrale des enrobés bitumineux. Revue générale des routes et aérodromes, 844, 77–83.