

УДК 625.855.3:665.775

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРЕДЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЛИНЕЙНОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОНА С ПРЕДЕЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ СДВИГА БИТУМА

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

Реологическое поведение асфальтобетона в значительной степени обусловлено температурно-временными особенностями поведения битумного вяжущего. В зависимости от уровня загрузки асфальтобетона деформируются как линейные или нелинейные вязкоупругие тела. Переход к нелинейному деформированию оценивают по предельным деформациям и напряжениям, выше которых прямо пропорциональная взаимосвязь между ними нарушается. В статье показано, что предельные напряжения линейности гораздо более чувствительны к деформированию, чем предельные деформации линейности.

В соответствии с этим для оценки влияния битумных вяжущих на переход асфальтобетона к нелинейному деформированию приняты предельные напряжения сдвига битумов, отвечающие выходу их на стационарное течение, или их когезия. Показана прямолинейная зависимость между предельными напряжениями линейности асфальтобетона и предельными напряжениями сдвигу битумных вяжущих.

Ключевые слова: битумные вяжущие, пенетрация, асфальтобетон, линейное вязкоупругое поведение; предельное напряжение линейности, предельное напряжение сдвига.

Состояние вопроса и цель исследования

Основным условием обеспечения надежности работы слоев дорожных покрытий является их способность к обратимому восстановлению деформаций, вызванных нагружениями от автомобилей в транспортном потоке. 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 свойства материалов 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 [1-4]. Позже были предложены модели расчета температурно-частотных зависимостей комплексных модулей асфальтобетона по соответствующим показателям вяжущих [5].

Несмотря на значительный поток информации по рассматриваемому научному направлению, одна из его сторон до сих пор остается неизученной, а именно, взаимосвязь критического напряжения ($\sigma_{ЛВУ}$) или критической деформации ($\epsilon_{ЛВУ}$) линейности асфальтобетона с реологическими или техническими показателями битумов. Имеются работы, в которых приводятся зависимости модулей упругости от пенетрации [6, 7], однако это не позволяет решить 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 позволили выявить одну из особенностей изменения критериев линейности асфальтобетона с частотой и температурой. Такая особенность заключается в том, что предельные напряжения линейности ($\sigma_{ЛВУ}$) более чувствительны к частоте деформирования, чем предельные деформации ($\epsilon_{ЛВУ}$). Согласно данным [3, 4], с ростом частоты деформирования от 0,01 Гц до 20 Гц при температуре 20 °С $\epsilon_{ЛВУ}$ возрастает в 1,2 раза, $\sigma_{ЛВУ}$ – в 8-10 раз. Согласно [1], при изменении частоты на 2 порядка (от 0,1 Гц до 10 Гц) и той же температуре $\epsilon_{ЛВУ}$ 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 $\sigma_{ЛВУ}$ почти в 16 раз, в то время как $\epsilon_{ЛВУ}$ 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 обу-

словленности реологического поведения асфальтобетона реологическими свойствами битума целью настоящей работы является установление взаимосвязи между пределами напряжениями ЛВУ асфальтобетона и предельного сопротивления сдвигу битума (τ_0).

Объекты исследований

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

Таблица 1

Свойства принятых к исследованию вяжущих

Битумы	Полимер	Содержание, %	Свойства вяжущих					Обозначения
			П25, дм	Тр, °С	IP	Тхр, °С	E25, %	
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.

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. Сопротивление 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 двухточечного изгиба [8, 9]. При такой схеме напряженного состояния имеется возможность измерять очень малые относительные деформации, начиная от 1×10^{-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 $\sigma_{ЛВУ}$ и $\varepsilon_{ЛВУ}$ при температуре 20 °С и частоте 0,5 Гц приведены на **рис. 1**.

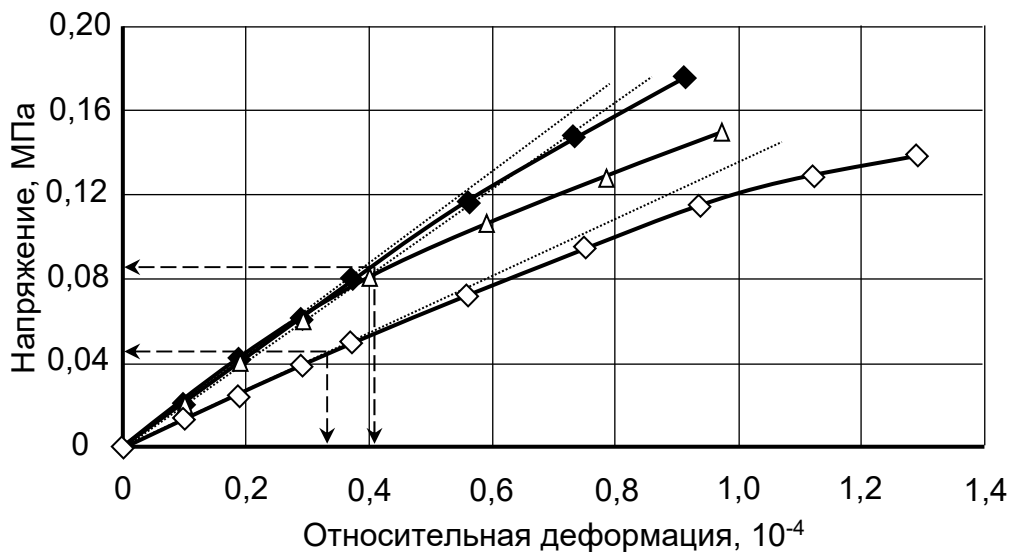


Рис. 1. Зависимость между напряжениями ($\sigma_{ЛВУ}$) и деформациями ($\epsilon_{ЛВУ}$) асфальтобетона на вяжущих с разной пенетрацией:

◇ – 116 × 0,1 мм; △ – 70 × 0,1 мм; ◆ – БМП- 60 × 0,1 мм

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 дмм, 116 дмм и 176 дмм (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 $\epsilon_{ЛВУ}$ уменьшается в 1,42; 1,76 и 2,62 раза. При близкой пенетрации вяжущих (чистый битум – 46 дмм ; битум с $P_{25}=70$ дмм и с 3 % полимера – $P_{25}=46$ дмм ; битум с пенетрацией 116 дмм и с 5 % полимера – $P_{25}=48$ дмм) критические напряжения ($\sigma_{ЛВЕ}$) асфальтобетонных линейности соответствовали 0,142 МПа, 0,140 МПа и 0,144 МПа.

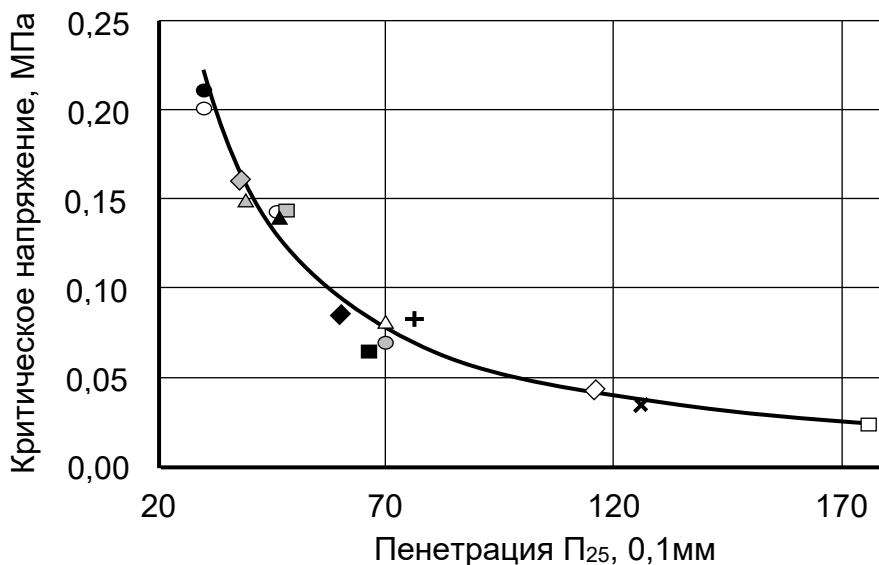


Рис. 2. Взаимосвязь между критическим напряжением линейности $\sigma_{ЛВУ}$ асфальтобетонов и асфальтополимербетонов (при температуре 20 °С и частоте 0,5 Гц) и пенетрацией вязнущих (условные обозначения – см. табл. 1)

Для зависимости, приведенной на **рис. 2**, переход от резко ниспадающей ветви к плавно изменяющейся части зависимости обусловлен конусностью пенетрационной иглы и соответствует пенетрации 60-70 дмм.

Эта зависимость свидетельствует о безусловной связи пенетрации с $\sigma_{ЛВУ}$ асфальтобетона. Она подобна множеству зависимостей от пенетрации прочности, модулей жесткости, колеестойкости асфальтобетона. Однако все такие зависимости остаются условными настолько, насколько пенетрация является условной эмпирической характеристикой. Именно поэтому пенетрацию исключили из системы SHRP Superpave США, введя при этом фундаментальную характеристику модуля сдвига битума.

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

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 x 0,1 мм и температурой размягчения – 52 °С. Это может объясняться тем, что у данного битума наиболее низкий индекс пенетрации (-0,76) по сравнению с другими, т.е. он наиболее чувствителен к частоте деформирования и температуре. Асфальтобетону на этом битуме отвечает самое большое значение $\sigma_{ЛВУ}$, так как использованный для получения асфальтобетона битум имел самую низкую, по сравнению с другими битумами, пенетрацию.

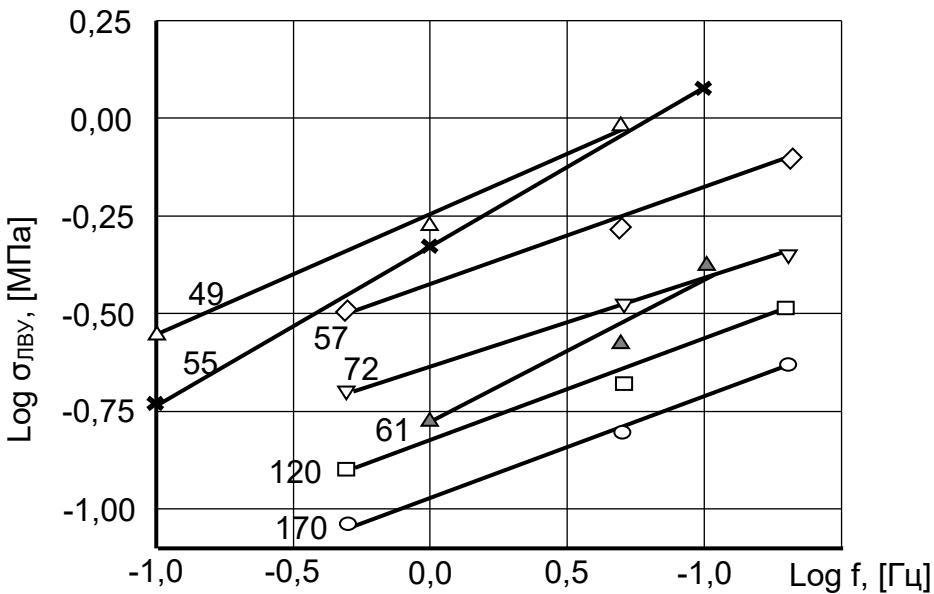


Рис. 3. Зависимость напряжения линейности ($\sigma_{ЛВУ}$) от частоты (f) деформирования асфальтобетонов на битумах с разной пенетрацией при 20 °С (цифрами на графике указаны значения пенетрации при 25 °С)

Прямая, обозначенная \blacktriangle (рис. 3), получена обработкой данных [3]. Она относится к битуму, модифицированному радиальным SBS. Данная линия расположена существенно ниже прямой, обозначенной Δ , поскольку в этом случае пенетрация БМП (61x0,1 мм) существенно больше пенетрации чистого битума ($P_{25}=49x0,1$ 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 на рис. 3 \times , получена обработкой данных [13]. Она достаточно хорошо согласуется с зависимостями для других вяжущих. Ее больший наклон, как и прямой, обозначенной \blacktriangle , 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.

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.

Взаимосвязь $\sigma_{ЛВУ}$ асфальтобетонов и предельного напряжения сдвига вяжущих (τ) приведена на рис. 4. Она может быть описана корреляционной зависимостью $\sigma_{ЛВУ} = 0,967 \cdot \tau + 0,0002$. 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 дефор-

мирования пленок битума в когезионном слое и межзерновом слое в асфальтобетоне.

Таблица 2

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

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

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].

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 путем определения предельного сопротивления сдвига по результатам ротационной вискозиметрии и/или по когезии битумов, установленной при одноплоскостном сдвиге.

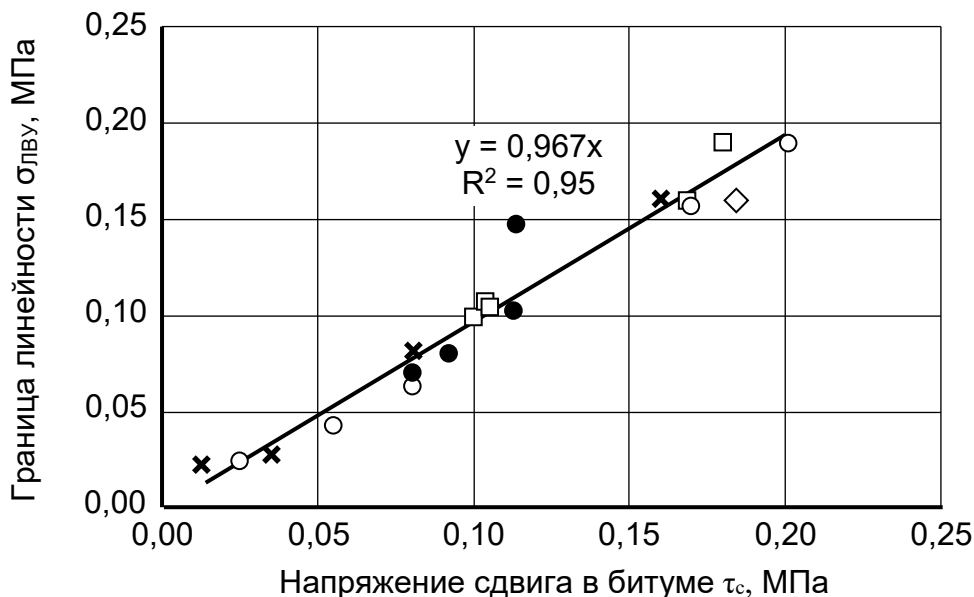


Рис. 4. Взаимосвязь между границей линейности (блву) асфальтобетонов и предельным сопротивлением сдвигу вяжущих при температуре 25 °С:

- 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) (◇);
- модифицированный битум с пенетрацией 61 (0,1 мм) (◆) [2];
- окисленные битумы с пенетрацией: 50, 75, 105, 172 (0,1 мм);
- дистилляционные битумы Nupac с пенетрацией 52, 79, 118, 182 (0,1 мм), для которых когезия определена по пенетрационной зависимости (□) [17]

Приведенные в данной статье экспериментальные результаты свидетельствуют о необходимости углубленных исследований физической сущности деформирования битумов и асфальтобетонов на микроуровне в области малых деформаций и напряжений, что согласуется с итогами работ [21-24].

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 гео-

метрии, ни от конфигурации испытаний [28]. Это утверждение может восприниматься как одно из свидетельств справедливости изложенных выше результатов исследований.

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 $E_{ЛВУ}$ 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. Такая зависимость 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 / В.А. Золотарев // Харьков: Вища школа, 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 non-linear rheological properties of asphalt mixtures. Proceedings of the 4th European Symposium on the Performance of Bituminous and Hy-

- draulic 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'ingénieur-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. Babadopoulos, 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. Stiff-*

- ness. *European Committee for Standardization*.
16. Лапченко, А.С. (2010). *Реологические свойства асфальтополимербетонов при динамическом деформировании*. Ph.D. thesis (231 p.). Kharkov.
 17. Золотарев В.А. *Разгаданная пенетрация* / В.А. Золотарев // *Наука и техника в дорожной отрасли*. – 2018. – №4. – С. 38-40.
 18. Руденский А.В. *Реологические свойства битумных смесей* / А.В. Руденский, И.М. Руденская. – 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. *Pour y voir clair dans les essais SHRP et dans leur application aux bitumes polymères* / M. Chappat, M. Ferraro // *Revue Générale des Routes et Aéroдромes*. – 1997. – № 753. – 47–55.
 23. Vinogradov, G.V., Isayev, A.I., Zolotarev, V.A., & Verebskaya, E.A. (1977). *Reological properties of paving bitumen*. *Rheologica Acta* 16, 266–281.
 24. Радовский Б.С. *Вязкоупругие характеристики битумов и их оценка по стандартным показателям* / Б.С. Радовский, Б.Б. Телтаев. – Алматы: Билим, 2013. – 152 с.
 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). *Faisabilité des essais de module complexe 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 6th International RILEM Symposium (pp. 527–533)*.
 28. Olard F. *Mesure du module diamétrale des enrobés bitumineux* / F. Olard, F. Noel, F. Loup // *Revue Générale des Routes et Aéroдромes*. – 2005. – № 844. – P. 77–83.

L I T E R A T U R A

1. Zolotarev V.A. *Dolgovechnost' dorozhnyh asfal'tobetonov* / V.A. Zolotarev // *Har'kov: Vishcha shkola*, 1977. – 116 s.
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 non-linear 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'ingénieur-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. Babadopoulos, 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:sup 2, 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. Lapchenko, A.S. (2010). *Reologicheskie svojstva asfal'topolimerbetonov pri dinamicheskom deformirovanii. Ph.D. thesis (231 p.). Kharkov*.
17. Zolotarev V.A. *Razgadannaya penetraciya / V.A. Zolotarev // Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli. – 2018. – №4. – S. 38-40*.
18. Rudenskij A.V. *Reologicheskie svojstva bitumnyh smesey / A.V. Rudenskij, I.M. Rudenskaya. – M.: Vysshaya shkola. –1971. –131 s*.
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, Parer E&E.5.107)*.
22. Chappat M. *Pour y voir clair dans les essais SHRP et dans leur application aux bitumes polymères / M. Chappat, M. Ferraro // Revue Générale des Routes et Aérodrômes. – 1997. – № 753. – 47-55*.
23. Vinogradov, G.V., Isayev, A.I, Zolotarev, V.A., & Verebskaya, E.A. (1977). *Reological properties of paving bitumen. Rheologica Acta 16, 266–281*.
24. Radovskij B.S. *Vyazkouprugie harakteristiki bitumov i ih ochenka po standartnym pokazatelyam / B.S. Radovskij, B.B. Teltaev. – Almaty: Bilim, 2013. – 152 s*.
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). *Faisabilité des essais de module complexe 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 6th International RILEM Symposium (pp. 527–533)*.
28. Olard F. *Mesure du module diamétrale des enrobés bitumineux / F. Olard, F. Noel, F. Loup // Revue Générale des Routes et Aérodrômes. – 2005. – № 844. – R. 77–83*.

RELATIONSHIP OF LINEARITY LIMIT STRESS OF ASPHALT CONCRETE WITH LIMIT SHEAR STRESS OF BITUMEN

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

The rheological behavior of asphalt concrete is largely due to the temperature-time characteristics of the bituminous binder behavior. Depending on the loading level, asphalt concrete deforms as linear or non-linear viscoelastic bodies. The transition to nonlinear deformation is evaluated by the limit strains and stresses, above which the directly proportional relationship between them is disturbed. The article shows that linearity limit stresses are much more sensitive to deformation than linearity limit strains.

In accordance with this, to assess the effect of bituminous binders on the transition of asphalt concrete to nonlinear deformation, the limit shear stresses of bitumen, corresponding to their exit to a stationary flow, or their cohesion, are taken. The straight-line relationship between linearity limit stresses of asphalt concrete and limit shear stresses of bituminous binders is shown.

Key words: *bituminous binders, penetration, asphalt concrete, linear viscoelastic behavior, linearity limit stress, limit shear stress.*

Рецензент: д-р техн. наук Б.С. Радовский (Radnat Consulting, США).
Статья поступила в редакцию: 02.07.2020 г.