

УДК 625.855.3

**В. А. ЗОЛОТАРЕВ**

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

## **ВРЕМЯ КАК КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АСФАЛЬТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Предложен новый аспект оценки долговечности асфальтобетонов по продолжительности его жизни под постоянно действующими нагрузками по принципу ползучести. Показано, что продолжительность жизни гораздо объективнее характеризует долговечность асфальтобетона, чем показатели прочности и модули упругости. Продолжительность жизни рассматривается как альтернативный показатель циклической усталости. Это утверждение основывается на соответствии значений коэффициентов пластичности асфальтобетонов при циклических и статических испытаниях, при режимах загрузки и деформирования, при разных схемах напряженного состояния. Предложен ускоренный метод определения устойчивости асфальтобетонов, основывающийся на одновременном воздействии на асфальтобетон нагрузок и жидких агрессивных сред.

**битум, асфальтобетон, усталость, продолжительность жизни, режимы механического воздействия и схемы напряженного состояния**

Развиваемая в последнее время концепция «вечных» нежестких дорожных одежд или одежд с большой продолжительностью жизни (БПЖ) [1] базируется на усовершенствовании конструкций, технологий и использовании материалов высокого качества. Наибольшую сложность в отношении прогнозирования долговечности как длительности жизни дорожных покрытий представляют асфальтовые материалы, являющиеся типичными реологическими телами, поведение которых во времени определяется консистенцией, температурным и напряженным состоянием битумных вяжущих.

Как правило, подход к долговечности асфальтобетона сводится к определению его механических характеристик, главными из которых являются прочность и модули упругости при различных схемах напряженного состояния. Эти и другие производные от них показатели включаются в нормативные документы. Тем не менее не существует способов перехода от них к временным показателям долговечности, которые и должны являться сутью такого понятия.

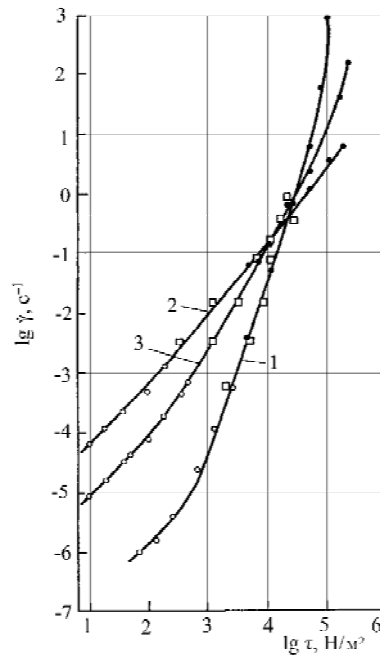
В связи с этим возникает необходимость разработки и принятия таких критериев оценки работоспособности асфальтовых материалов, которые определялись бы временем устойчивого поведения какого-либо показателя или совокупности показателей их свойств до наступления критического состояния. Поскольку разрушение асфальтобетона в конечном итоге происходит из-за потери сплошности пленки свободного, структурированного битума (асфальтовяжущего вещества) или адгезионного контакта на границе раздела фаз (сцепления), то в качестве показателя его долговечности можно принять время жизни от момента начала воздействия нагрузки до нарушения его сплошности\*.

Существующий опыт и данные многочисленных исследований позволяют проиллюстрировать роль временного фактора в оценке поведения битумов и асфальтобетонов.

### **ВРЕМЯ КАК НАИБОЛЕЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ БИТУМА**

Процесс течения битума, оцениваемый временным критерием – вязкостью, обусловлен разрывом межмолекулярных связей тем большим, чем больше скорость деформирования или напряжения. Это отражается реологическими кривыми течения битумов трех структурных типов (рис. 1) [2]. Вязкость

*\* Здесь не рассматривается случай образования новых поверхностей в каменных материалах при уплотнении или под движением транспорта*



**Рисунок 1** – Кривые течения при 25 °С битумов трех структурных типов: 1 – гель; 2 – золь; 3 – золь-гель.

исключительно чувствительна к структурным особенностям битумов. В области неньютоновского течения увеличение напряжения в 10 раз вызывает падение вязкости битума типа «гель» – в 1 000 раз, битума типа «золь-гель» в 40 раз, а битума типа золь в 16 раз.

Эта тенденция сохраняется и в отношении скоростных зависимостей когезии, когда изменение скорости сдвига битума марки с пенетрацией 52,0×0,1 мм в 100 раз сопровождается увеличением когезии при 20 °С в 5 раз, а битума с пенетрацией 113,0×0,1 мм в 12 раз [3].

Инверсия напряжений при высоких скоростях сдвига позволяет понять, почему когезия битумов типа «золь» больше, чем битумов типов «золь-гель» и «гель», и почему подобно этому изменяется прочность асфальтобетонов на битумах разных типов.

Убедительной иллюстрацией повышенной чувствительности реологического параметра – вязкости, по сравнению с пенетрацией ( $P_{25}$ ), температурой размягчения ( $T_p$ ) и динамическим модулем сдвига битума, являются данные табл. 1 [4].

**Таблица 1** – Чувствительность вяжущих разной консистенции по  $P_{25}$ ,  $T_p$ ,  $\rho_{60}$ ,  $G''$

№ п/п	Марка битума	Показатели свойств и степень отличия			
		$P_{25} \times 0,1$ мм	$T_p$ , °С	$\eta_{60}$ , Па·с	$G''$ , Па
1	35/50	47/1	52/0	$3,67 \cdot 10^2/1$	$9,9 \cdot 10^4/1$
2	50/70	61/1,3	49/3	$11,4 \cdot 10^2/3,2$	$5,83 \cdot 10^4/1,7$
3	70/100	90/1,9	46/6	$5,2 \cdot 10^2/7,0$	$2,74 \cdot 10^4/3,6$
4	БМП	53/1,13	73/21	$167 \cdot 10^2/4,2$	$7,63 \cdot 10^4/1,29$

**Примечание.** В знаменателе приведено отношение значения параметра вяжущего (2, 3, 4) к параметру битума 35/50 (1) и разность значений их температур размягчения.

Среди приведенных в табл. 1 вяжущих три являются чистыми битумами с разной пенетрацией, а четвертый – БМП получен модификацией битума 70/100 полимером SBS. По пенетрации битум 70/100 менее тверд, чем битум 35/50 в 1,9 раза. При этом разница их температур размягчения составляет 6 °С. Разница между температурой размягчения чистого битума 35/50 и БМП составляет 21 °С, тогда как разница по пенетрации очень мала – 6,0×0,1 мм. Модуль потерь ( $G''$ ) битума 70/100 в 3,6 раза меньше, чем битума 35/50. Он же в случае БМП в 1,29 раза ниже, чем чистого битума близкой пенетрации 35/50. Значение модуля потерь находится в качественной и количественной связи с пенетрацией, как было неоднократно доказано ранее в отношении комплексного модуля упругости

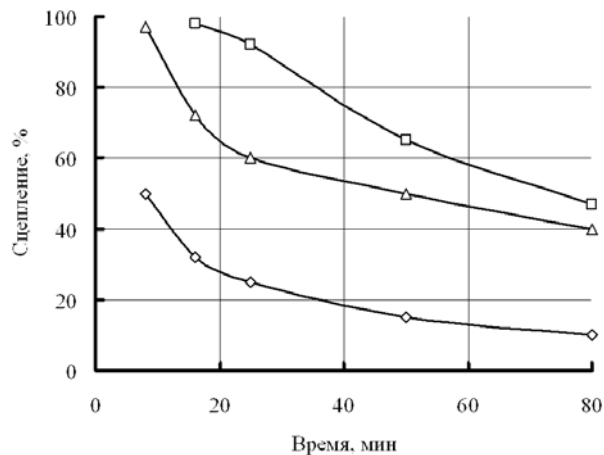
битумов [5]. В то же время наиболее чувствительный к особенностям битумов является вязкость при 60 °С. Битум 70/100 менее вязок, чем битум 35/50 в 7 раз, а БМП при близкой пенетрации вязче битума 35/50 в 4,2 раза, что соответствует тенденции изменения температуры размягчения. Эти данные отчетливо свидетельствуют о большей чувствительности к особенностям структуры битума показателя вязкости, чем традиционные и, даже, модуль потерь при сдвиге  $G''$ .

В [6] представлены результаты исследований течения битума при циклической ползучести, на основе которых предлагалось прогнозировать колееобразование, заменив таким образом критерий  $G^*/\sin \delta$ , используемый для этой цели в системе SHRP, который, по мнению авторов [6], характеризуется слабой чувствительностью к реологическим особенностям битумов.

В [7] предпринята попытка объяснить разрушение асфальтобетона при низких температурах усталостным трещинообразованием в битуме и в асфальтовяжущем веществе. Для этой цели использован динамический сдвиговый реометр, работающий по схемам конус-плоскость и цилиндр-цилиндр в режиме релаксации напряжений. Приведенные для достаточно твердых битумов данные свидетельствуют об исключительно высокой чувствительности количества циклов к накоплению разрушений в битумном образце. Согласно данным [7] уменьшение значения модуля сдвига в 2 раза соответствует снижению количества циклов в 3,3 раза, а увеличение деформации при испытании асфальтовяжущего в 1,6 раза сопровождается уменьшением количества циклов нагружения в 5 раз.

Подобные этим результаты получены в [4] в ходе определения времени жизни битумных пленок при температуре минус 20 °С под постоянно действующей нагрузкой. Изменению величины действующего напряжения при изгибе битумных балочек в 1,4 раза отвечало увеличению времени жизни в 2,4 раза.

В отношении битума также показательными являются зависимости сцепления битумной пленки от времени действия водной среды (рис. 2). Ранее было показано [8], что с повышением температуры воды сцепление битума (площадь, покрытая битумом после испытания) с твердой подложкой резко уменьшается. Чем больше время термостатирования, тем больше степень отслоения.



**Рисунок 2** – Зависимость сцепления от времени термостатирования чистого битума ( $\Delta$  – при 80 °С,  $\diamond$  – при 90 °С) и битума с добавкой ПАВ ( $\square$  – при 90 °С).

Для случая, приведенного на рис. 2, при переходе от 80 до 90 °С сцепление в диапазоне времени от 8 до 80 минут уменьшается от 30 до 40 %. Время же достижения уменьшения сцепления на 50 % падает в 6,25 раза. После введения ПАВ этот же уровень сцепления при температуре 90 °С достигается за промежуток времени в 9,4 раза больший. Рассматривая отслаивающее действие воды как один из активных элементов разрушения асфальтобетона, носящего молекулярный характер, можно утверждать, что и в отношении процессов, происходящих на границе раздела фаз битум – минеральная подложка, время является гораздо более чувствительным критерием оценки, чем величина сцепления.

Таким образом, данные по адгезионно-временной зависимости, по зависимости вязкости от напряжения, по усталостным зависимостям битума показывают, что критерии, включающие скорость деформирования, время действия нагрузки или количество циклов до обусловленного уровня разрушения битумов, являются гораздо более чувствительными, чем напряжения, его вызывающие.

## ВРЕМЕННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ СВОЙСТВ АСФАЛЬТОБЕТОНА

В виду того, что битум является единственной в асфальтобетоне реологической составляющей, временная зависимость его свойств сообщается асфальтобетону. Первым подтверждением этому явилось установление Н. Н. Ивановым и Телегиным в СССР [9] и М. Дюрьезом во Франции [10] скоростной зависимости прочности асфальтобетона. Это привело к необходимости учета скорости его деформирования при нормировании показателей прочности на сжатие: в СССР – 3 мм/мин., во Франции – 60 мм/мин. Что касается модулей упругости, то их расчетные значения определяют в Украине и России при времени действия нагрузки 0,1 сек., а во Франции при частоте синусоидальных колебаний – 15 Гц, т. е. при времени действия почти в 10 раз меньшем. Но даже знание коэффициента пластичности асфальтобетона как показателя степенной зависимости прочности или модуля упругости при различных схемах напряженного состояния не позволяет предсказывать его долговечность в размерности времени.

Именно поэтому к настоящему времени за рубежом накопилось множество работ по установлению выносливости асфальтобетона при циклических нагружениях, функционально связанной со временем. В Украине практически единственная работа в этом направлении выполнена И. М. Щербаковым [11]. Показателем выносливости служит количество циклов до разрушения под действием нагрузок и соответственно возникающим вследствие этого напряжением в образце. При стендовых испытаниях, призванных моделировать эксплуатационные условия асфальтобетона, устанавливая зависимость количества проходов от нагрузки на ось испытательных тележек.

Расположение таких зависимостей в координатах – количество циклов от действующих напряжений или деформаций зависит от формы воздействия (синусоидальное, циклическое в виде прямоугольника или треугольника), от уровня загрузки относительно нулевого значения напряжения в образце, от частоты загрузки в случае синусоидального воздействия или режима загрузки (периодов нагрузок и отдыха) при воздействии, отличающемся от синусоидального. Больше того, в ЕС и в EN 12687-24 практикуется метод определения показателя усталости по схеме синусоидального изгиба асфальтобетонного образца при нормируемой деформации как количества циклов, при котором возникающие при нормированном деформировании напряжения снижаются на 50 % от начального. Это может рассматриваться как релаксационная усталость.

При расчете долговечности нежестких дорожных одежд обычно ориентируются на разное количество циклов воздействий (проходов). В разных источниках оно колеблется: 30 млн – для 30 лет службы; 200 млн проходов для 30 лет службы; 100 млн – 230 млн проходов с нагрузкой на ось 8,0 т (80 кН) для «вечных дорог» [1]. Обычно в лабораториях определяют циклическую выносливость на базе не более 107 циклов до разрушения. Если предположить, что продолжительность воздействия близка к 0,1 с, то общее время жизни составит около 278 часов, т. е. более 11,6 суток. Циклические испытания на усталость на базе такого количества циклов считаются уникальными. Ни в СССР, ни в России, ни в Украине они не выполнялись и не предвидятся.

Одним из видов циклических испытаний асфальтобетона являются испытания на колееобразование. Именно они являются бесспорным аргументом в пользу большой разрешающей способности времени жизни асфальтобетона. Критерием стойкости против колееобразования повсеместно считается глубина колеи. Она оценивается в миллиметрах или процентах от толщины плиты. Для асфальтобетонных дорожных одежд после 3·10<sup>4</sup> проходов пневмоколеса при 60 °С она нормируется дифференцировано. Для наиболее распространенного во Франции среднещебенчатого асфальтобетона она не должна превышать 10 %. При толщине плиты 10 см колея должна быть меньше 10 мм. Часто колея находится в пределах 3...5 мм. Эти значения очень малы, они недостаточно чувствительны к особенностям состава и структуры асфальтобетона, а реальные условия измерения колеи позволяют оценить ее с точностью ±0,5 мм, что может привести к большим погрешностям при малых глубинах.

Для рассмотренного выше примера (табл. 1), иллюстрирующего чувствительность различных показателей к особенностям битумов, в [4] получены значения показателей колееобразования, которые приведены в табл. 2.

Эти данные свидетельствуют о том, что при значениях пенетрации, отличающихся не более, чем в два раза, и значениях глубины колеи, после 3·10<sup>4</sup> проходов, отличающихся не более чем в 5,6 раза, количество проходов, необходимое для достижения колеи равной 3 мм, отличается в десятки и даже в сотни раз. Характерно также, что в случае БМП это количество даже в 1,9 раза меньше, чем в случае битума 35/50 с близкой пенетрацией.

**Таблица 2** – Влияние консистенции битумного вяжущего на колееобразование

Марка битума	Показатели колееобразования и степень их различия		
	Колея в мм после $3 \cdot 10^4$ проходов	К-во проходов при колее 3 мм	К-во проходов при колее 5 мм
35/50	1,25/1	$1,5 \cdot 10^6/1$	–
50/70	2,5/2	$6,0 \cdot 10^4/25$	$1 \cdot 10^6/1$
70/100	7,0/5,6	$7 \cdot 10^3/214$	$1,75 \cdot 10^4/57$
БМП	0,88/1,4	$8 \cdot 10^5/1,9$	

Реакция колееобразования в асфальтобетонах (по глубине колеи) и времени жизни (по количеству проходов) под воздействием различных факторов может быть проиллюстрирована следующим. При переходе температуры от 60 к 50 °С и при равном количестве проходов (105 циклов) глубина колеи уменьшается от 4 мм до 3 мм, а количество циклов увеличивается от  $6 \cdot 10^3$  до  $10^5$ , т. е. в 17 раз; при переходе от битума с пенетрацией 39,0×0,1 мм к битуму с пенетрацией 76,0×0,1 мм при  $10^5$  проходов колея увеличивается от 4,8 мм до 7,8 мм, а количество циклов уменьшается до  $4 \cdot 10^3$ , т. е. в 25 раз; введение 10-% окатанного песка крупностью 4 мм, вместо дробленного, увеличивает колею всего на 1 мм, а время достижения колеи, равной 5 мм, снижается с  $4 \cdot 10^4$  до  $8 \cdot 10^3$ , т. е. в 5 раз; введение 10 % мелкого песка крупностью 0,2 мм уже после  $10^3$  проходов увеличивает колею на 4 мм, т. е. в два раза, а количество циклов, необходимых для достижения колеи, равной 5 мм, уменьшается в 50 раз. Увеличение содержания битума в асфальтобетоне на дробленном песке с 6,05 до 6,40 % практически не сказалось ни на глубине колеи, ни на количестве циклов; увеличение же содержания битума с 6,0 до 6,25 % в асфальтобетоне, включающем 10 % окатанного песка уже после  $10^3$  проходов увеличило колею с 8 мм до 12 мм. При этом количество циклов, необходимых для достижения этой глубины, уменьшилось вдвое. Интересен факт увеличения колеи с переходом от непрерывного типа гранулометрии к прерывистому при том, что растет и содержание щебня и прочность асфальтобетона.

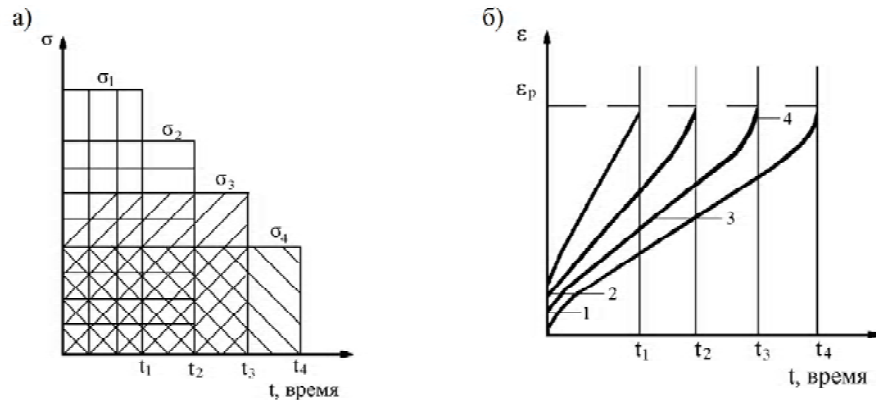
Данные по асфальтобетонам на БМП и на чистом битуме при их пенетрации соответственно 53,0×0,1 и 47,0×0,1 мм, модулях упругости  $4,55 \cdot 10^4$  и  $4,34 \cdot 10^4$  МПа и температурах размягчения 73 и 52 °С показывают, что в первом случае после  $3 \cdot 10^4$  проходов пневматика колея равна 0,88 мм, а во втором 1,25 мм, тогда как количество проходов необходимое для образования колеи глубиной 3 мм в первом случае равно  $8 \cdot 10^5$ , а во втором  $1,5 \cdot 10^6$ . Это в который раз свидетельствует о том, что температура размягчения не является параметром, по которому можно судить о колееустойчивости асфальтобетонных на чистых битумах и битумах, модифицированных полимером типа SBS в количестве, по крайней мере, большем 2,5–3,5 %. В то же время нельзя выпускать из вида, в каких по содержанию щебня и минерального порошка асфальтобетонах применяются эти вяжущие.

Многообразие методов оценки циклической усталости по деформационно-прочностным показателям не может не сказаться на сопоставляемости получаемых результатов. Кроме того, во всех случаях нужно переводить полученное экспериментом количество циклов в долговечность, трактуемую как время жизни асфальтобетона в покрытии с учетом интенсивности, состава, скорости движения, типов осей подвижного состава. Остается неясным, как учитывать при этом суточное и годовое изменение температуры, влияния рабочих сред и др.

### ВРЕМЯ ЖИЗНИ ПОД ПОСТОЯННОЙ НАГРУЗКОЙ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОНА

Многие из сопутствующих циклическим испытаниям на усталость неопределенностей могут быть устранены испытанием на статическую усталость при ползучести (в трактовке школы С. Н. Журкова [12] долговременную прочность). Определение статической усталости при испытаниях на ползучесть не представляет особого труда. Суть этого метода заключается в том, что образцы асфальтобетона в лабораторных условиях подвергаются действию серии постоянных нагрузок, вызывающих в образцах соответствующие той или иной схеме напряженного состояния напряжения, приводящие их к разрушению. Таким образом можно определить зависимости статической усталости, т. е. времени жизни асфальтобетона от меняющихся нагрузок (рис. 3).

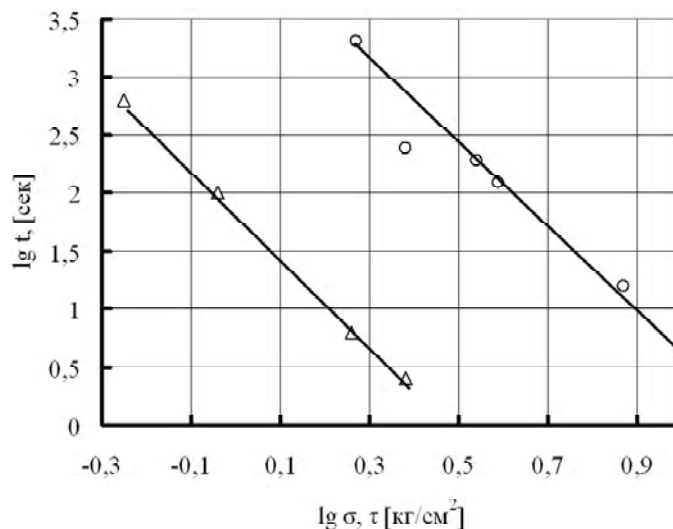
При испытаниях малыми нагрузками можно найти ответ на вопрос, существует ли предел долговременной прочности для тех или иных типов асфальтобетонных, что в свою очередь позволит определить, какой прочностью должен обладать асфальтобетон для обеспечения проектной продолжительности жизни. При этом можно утверждать, что результаты такого испытания представляют собой самый жесткий случай, когда асфальтобетон не отдыхает ни между циклами, ни в период



**Рисунок 3** – Схема нагружения при испытании в режиме постоянных напряжений ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > \sigma_4$ ) (а) и характер развития деформаций до разрушения ( $\epsilon_p$ ) за время  $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$  (б).

низкой загруженности, ни за счет снижения температуры. Такие испытания отличаются простотой эксперимента, его полной воспроизводимостью и получением результата, максимально приближенного к понятию долговечности.

Изменение этих времен жизни от напряжения при сдвиге и изгибе показаны соответственно на рис. 4. Такого рода испытания на основе растяжения проведены в 50-ых годах Н. В. Горелышевым и А. М. Гоглидзе. В своих работах они преследовали цель определить скорость течения асфальтовых систем и их вязкость. Они не обращали внимания на время жизни асфальтобетонов под разными нагрузками, хотя продолжительность жизни при малых напряжениях достигала 113 часов. Но обработка их данных привела к установлению зависимостей полностью идентичных тем, что были получены на основе специальных испытаний на статическую усталость.



**Рисунок 4** – Зависимость времени жизни от напряжения асфальтобетона типа В при сдвиге ( $\Delta$ ) и изгибе ( $\circ$ ) [20].

Простые сопоставления времен жизни под действием различных факторов показывают, что они во много раз чувствительнее, чем прочность, к особенностям самого асфальтобетона, к температуре испытания и другим факторам.

Так, прочность асфальтобетонов на сжатие при изменении пенетрации битума от 46 до 143,0×0,1 мм, т. е. в 3,1 раза, изменяется в 1,5 раза, а время жизни в 7,2 раза; прочность асфальтобетона при переходе от температуры испытания 20 к 50 °С уменьшается в 2,1 раза, а время жизни в 790 раз.

Эти соотношения мало зависят от схемы напряженного состояния. Так, изменение температуры испытания от 20 до 50 °С в аналогичных напряженных условиях приводит к уменьшению времени жизни

при сдвиге до 1 500 раз, а при изгибе в 1 000 раз. При переходе от битума с пенетрацией 78,0×0,1 мм к битуму с пенетрацией 168,0×0,1 мм время жизни асфальтобетона при изгибе изменяется в 5 раз, а при сдвиге в 5,5 раза [13, 14].

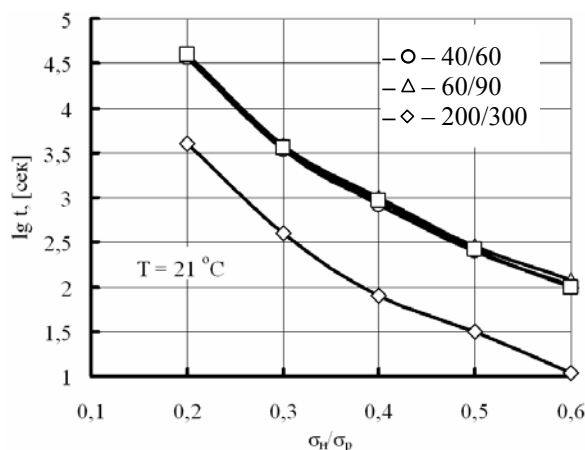
Естественно, что эти огромные различия во многом обусловлены несопоставимостью уровня напряженного состояния для асфальтобетонов на битумах разных марок. Нагрузка, которая для асфальтобетона на битуме с малой пенетрацией вызывает напряжения, далекие от разрушающих при одноразовом испытании, для асфальтобетона на маловязком битуме может быть близка к критической. С этим связана область применения тех или иных видов асфальтобетонов на дорогах разных категорий. Чем меньше интенсивность движения, чем меньше приведенная нагрузка на ось, тем менее прочный асфальтобетон может применяться. Однако это не означает, что он будет обязательно менее долговечен в дороге низкой категории под менее интенсивное и легкое движение. Из-за меньшего уровня нагружения применение такого асфальтобетона может быть функционально оправданным. В то же время даже немногочисленные проезды большегрузных транспортных средств могут разрушить дорожную одежду. Однако чаще всего определяющей в этом случае может быть низкая несущая способность самой дорожной одежды.

Чтобы привести все разновидности асфальтобетонов к сопоставимым условиям, нужно проводить испытания при одинаковых уровнях напряженного состояния. Для этого по принятой схеме напряженно-деформированного состояния (сжатие, изгиб, растяжение, сдвиг) при определенной скорости деформирования не меньшей, чем стандартная, а целесообразней при скорости близкой к скорости деформирования, при которой производят определение модулей упругости, определяют прочность асфальтобетона.

После установления на представительной пробе средней прочности ( $\sigma_p$ ) образцов можно производить испытание по определению времени жизни при напряжениях, 0,2, 0,4, 0,6 от  $\sigma_p$ . Уровни напряженного состояния могут быть приняты разными, но желательно, чтоб начальным был уровень (0,01–0,20)  $\sigma_p$ , при котором асфальтобетон близок линейной области деформирования.

Согласно [15, 16] эта область находится в пределах (0,2–0,3)  $\sigma_p$ . В соответствии с [13] уровень напряженного состояния, после которого асфальтобетон переходит в нелинейную зону деформирования, зависит от частоты синусоидального нагружения, так же как и модуль упругости асфальтобетона. Для консольного изгиба при частоте 0,5 Гц и температуре 20 °C он близок к (0,20–0,32) МПа, что для асфальтобетонов на битумах с пенетрацией от 57,0×0,1 до 130,0×0,1 мм составляет около 10 % прочности при чистом изгибе.

Приведенные на рис. 5 зависимости времени жизни от уровня напряженного состояния для асфальтобетона типа Б практически одинаковы в пределах пенетраций (46–143)×0,1 мм. В то же время зависимость асфальтобетона на битуме с пенетрацией 270,00×0,11 мм отвечает гораздо меньшему уровню времен жизни. Это может быть следствием того, что отношение действующего напряжения к разрушающему в этом случае лежит гораздо выше границы его линейного вязкоупругого поведения.



**Рисунок 5** – Зависимость времени жизни асфальтобетонов на битумах разных марок от уровня напряженного состояния.

Времена жизни, полученные при разных уровнях напряженного состояния, могут быть использованы для предсказания долговечности асфальтобетона, для выбора наиболее долговечного состава,

применительно к условиям его работы, для определения эффективности различных добавок и технологий в некоторых «стерильных» условиях.

На дороге, кроме нагрузок, асфальтобетон подвергается действию многих факторов, главными среди которых являются температура, замораживание-оттаивание, действие воды и различных водных растворов или суспензий. Изучение температурных зависимостей времени жизни асфальтобетона не представляет существенных трудностей. Это показано в работе [17], когда удалось получить не только зависимости время – напряжение, но и установить эффект снижения времени жизни асфальтобетона при фиксированном напряжении с понижением температуры, ниже температуры его механического стеклования. Установленный таким образом максимум подобен тому, что был обнаружен при испытании асфальтобетона на изгиб с определенной скоростью деформирования при разных температурах [18].

Влияние фактора агрессивной жидкой среды до температуры ее замерзания на время жизни асфальтобетона также может быть установлено практически без затруднений. В работе [14] развиты исследования, выполненные в 1970 году [19]. Результаты этих исследований показывают, что совместное действие среды и механических нагрузок ускоряет процесс разрушения настолько, что коэффициенты длительной водостойкости, полученные в соответствии со стандартным способом определения после 15 суток водонасыщения, при испытаниях на статистическую усталость могут быть определены за несколько часов. Одним из механизмов такого разрушения можно считать эффект понижения прочности П. А. Ребиндера [20].

Особенностью испытаний на статистическую выносливость является большой разброс результатов параллельных испытаний. Это связано со свободным распространением трещин по наиболее слабым поверхностям. Поэтому малейшая неоднородность распределения составляющих, изменение пористости, трещины в каменных материалах, дефекты адгезионных контактов – все это приводит к ощутимому изменению времен жизни образцов. В [12] подчеркнуто, что даже для достаточно однородных пластмасс и полимеров на каждую по напряжению точку необходимо было испытывать десятки образцов. В случае асфальтобетона хорошая однородность распределения каменных материалов, достаточно толстый слой битума и его непрерывность способствуют уменьшению разброса результатов.

В то же время высокая чувствительность времени жизни к различным влияющим факторам дает возможность объективно оценить эффективность любых технологических приемов регулирования качества асфальтобетона. Это может быть проиллюстрировано сравнением соотношения коэффициентов водоустойчивости, полученных стандартным способом, с соотношением времен достижения коэффициентом водоустойчивости значения, равного 0,8, в случае асфальтобетона на чистом битуме и битуме с добавками (табл. 4).

**Таблица 4** – Влияние добавок ПАВ и полимера на коэффициент длительной водостойкости ( $K_{15}$ ) и время его достижения ( $t_k$ )

Состав вяжущего	Значения коэффициентов водостойкости $K_{15}$ и их рост под действием добавок / разы	Время ( $t_k$ ), соответствующее достижению $K_v = 0,8$ , мин	Соотношение $t_k$ асфальтобетонов на чистом битуме и с добавками
Битум 130 / 200	0,73 / 1,0	2 517	1,0
С 0,7 ПАВ	0,76 / 1,04	3 548	1,42
С 3 % СБС	0,78 / 1,07	5 623	2,24
С 0,7 % ПАВ и 3 % СБС	0,82 / 1,12	22 290	8,9
Битум 90 / 130	0,77 / 1	3 980	1
С 0,7 % ПАВ	0,79 / 1,03	7 070	1,8
С 3 % СБС	0,82 / 1,06	25 118	6,3
С 0,7 % ПАВ и 3 % СБС	0,85 / 1,1	141 253	35,4

Из данных, приведенных в табл. 4, следует, что коэффициенты длительной водостойкости изменяются ничтожно мало, потеря прочности за счет введения добавок ПАВ и СБС по сравнению с прочностью асфальтобетона на исходном битуме в случае битума БНД 90/130 уменьшается в 1,55 раза, а в случае битума БНД 130/200 – в 1,50 раза. При этом время жизни в первом случае увеличивается в 35 раз, а во втором – в 8,9 раз.



## ИДЕНТИЧНОСТЬ СУЩНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ, СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ И РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Если исходить из того, что разрушение асфальтобетона обусловливается накоплением критических трещин, а точнее, вновь образовавшихся полых зон или поверхностей, то в конечном итоге время жизни отвечает этому моменту. Вопрос в том, будет ли время накопления этих дефектов зависеть от того, какой режим нагружения, вызывающий одинаковые напряжения, принят: статический, периодический, циклический, равными или различными по нагрузкам циклам или другой. Очевидно, что использование цикла нагрузка-разгрузка прерывает процесс микротрещинообразования, но вряд ли стоит ожидать полного залечивания трещин, хотя процесс аутогезии вяжущего или повторной адгезии вяжущего к поверхности каменного материала может иметь место и быть более или менее активным в зависимости от вязкости битума, температуры, продолжительности отдыха.

С учетом этого можно предположить, что время жизни под постоянно действующим напряжением и суммарное время циклических нагружений может быть разным. Тем не менее в настоящее время существуют возможности сравнения и пересчета времен жизни асфальтобетона с переходом от одного режима к другому. При этом принципиальным является вопрос о виде зависимостей времени жизни от величины напряжения при статическом или циклическом нагружении. То, что они являются степенными многократно доказано. Следовательно, задача сводится к определению величин показателей степени в уравнении Вейлера. В этом отношении принципиальным является то, что величины этих показателей зависят, главным образом, от скорости релаксационных процессов в битумном вяжущем, замедляющихся за счет структурирующей способности минеральных поверхностей.

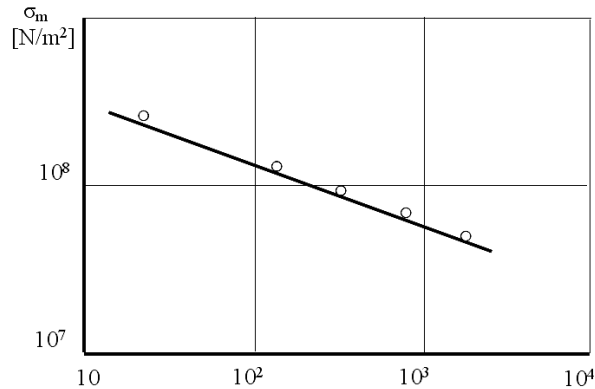
Чувствительность временных зависимостей напряжений, характеризуемых значениями коэффициентов пластичности, рассчитываемых по приращениям логарифмов напряжений к соответствующим приращениям времен жизни, практически не изменяется с изменением схемы напряженного состояния (рис. 4). Это следует из сравнения данных [13] и [14], которое показывает, что при равном времени жизни, например 100 с, напряжения при сдвиге (кручении) от напряжений при изгибе отличаются в 4,4 раза, тогда как время жизни под напряжением 0,175 МПа при сдвиге в 250 раз меньше, чем изгибе. В то же время коэффициенты пластичности одинаковы при деформировании с постоянной скоростью и при испытаниях на ползучесть [13]. Кроме того, нет оснований ожидать, что релаксационные процессы зависят от схемы напряженного состояния, поскольку они равно вероятны по всему объему тела.

Имеющиеся в литературе данные также свидетельствуют о том, что значения показателей пластичности, определяемые при усталостных испытаниях в режимах с заданными амплитудами деформаций и постоянным напряжением, очень близки. Для получения совместимых кривых уровень синусоидальных нагружений принимали равным 61 % от уровня постоянного нагружения при ползучести. При температуре 20 °С установлена общая зависимость, описывающая результаты, полученные при разных методах испытаний (рис. 6).

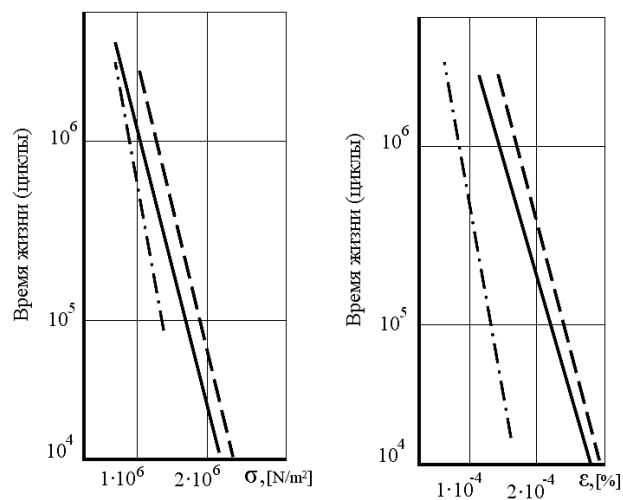
В дополнение к этому можно отметить, что были исследованы асфальтобетоны, изъятые из покрытия накануне открытия движения, через 5, 15, 24 и 51 месяц эксплуатации. Опыты на усталость производились в различных лабораториях: при постоянных синусоидальных нагружениях в Shell Fracaise, а при синусоидальных постоянных деформациях в Центральной лаборатории дорог и мостов Франции. Полученные результаты (рис. 7) свидетельствуют о практическом равенстве коэффициентов пластичности в обоих случаях: перед открытием движения – 0,16 и 0,17; через 5 месяцев 0,15 и 0,16; через 51 месяц – 0,12 и 0,11. Это в свою очередь может служить аргументом в пользу идентичности релаксационных процессов в обоих случаях и определяющей роли в определении характера временных зависимостей соотношении времен релаксации и действия нагрузки или деформирования.

В работе [21] на основе установленных для 12 асфальтобетонов, по составу подобных типу Б, с использованием машины MAER-LPC, критической деформации линейности и временной зависимости модулей упругости при статическом нагружении обосновывается возможность определения выносливости при циклической усталости. В [21] также утверждается, что потеря линейности играет главную роль в развитии усталостных разрушений.

Объективность этого предположения достаточно высока, поскольку в испытаниях на ползучесть течение с постоянной скоростью начинает развиваться после участка, на котором заканчивается развитие условно мгновенной упругости, характеризующее соответствующим модулем упругости. Отсюда следует, что направленное повышение критического напряжения и критической



**Рисунок 6** – Сравнение временных зависимостей при циклическом нагружении ( $O$ ) и ползучести (сплошная линия) [27].



**Рисунок 7** – Время жизни в циклах асфальтобетона, взятого из покрытия (— после открытия движения; --- после 5 месяцев; -.- после 51 месяца эксплуатации) в зависимости от амплитуды напряжения ( $\sigma$ ) и амплитуды деформации ( $\epsilon$ ).

деформации, ограничивающих область линейного вязкоупругого деформирования, приводит к повышению выносливости асфальтобетона при статических и циклических испытаниях на усталость [22]. Это может касаться прежде всего асфальтобетонов на основе модифицированных битумов, когда увеличение содержания полимера типа СБС в асфальтобетоне приводит к повышению критических напряжений и деформаций, отвечающих переходу в область нелинейного деформирования [23].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Термин долговечность является, вероятно, одним из наиболее употребляемым в отношении зданий, сооружений, конструкций и материалов и в то же время наименее конкретизированным и количественно определенным. В отношении нежестких дорожных одежд в последние годы он приобретает содержательность, благодаря появлению и развитию концепции вечных дорог. Конструирование дорожной одежды с заданной продолжительностью жизни 40–50 лет становится все более реальным. В связи с этим становится актуальным и необходимым предсказание жизненного цикла сменного верхнего слоя покрытия во временном измерении.

2. Такая необходимость в отношении асфальтобетона усугубляется тем, что его суть и свойства определяются битумным вяжущим, которое как термопластичное реологическое тело исключительно чувствительно к температуре и скорости деформирования. Именно состав, структура и состояние битумного вяжущего определяет поведение асфальтобетона в реальных условиях эксплуатации.

3. Временная характеристика свойств битума гораздо более чувствительна к воздействию различных факторов, чем традиционные механические показатели. Это касается вязкости, времени адгезионной устойчивости, циклической ползучести и ползучести при статическом нагружении.

4. В качестве временных показателей жизненного цикла асфальтобетона чаще всего используются результаты усталостных испытаний, выраженные количеством циклов до разрушения при циклическом нагружении или гармоническом деформировании или нагружении. К ним могут быть отнесены и результаты испытаний на колееобразование, выраженные в количестве проходов, необходимых для образования заданной глубины колеи. Изменение колеи в несколько раз может сопровождаться изменением количества проходов в десятки раз.

5. Циклическая усталостная выносливость, обладая высокой чувствительностью к составу, структуре и состоянию асфальтобетона, является сложной характеристикой, требующей специального оборудования, больших затрат времени и зависящей от условий испытаний (схемы напряженного состояния), режима, формы и ритмичности нагружающего воздействия. Эти усложнения устраняются при определении времени жизни асфальтобетона под действием серии постоянных нагружений при чистом изгибе. Более того, эта схема разрушения является исключительно информативной для оценки времени жизни асфальтобетонов при одновременном воздействии жидких агрессивных сред. Чувствительность времени жизни асфальтобетонов в десятки и сотни раз выше, чем прочности на сжатие, изгиб, сдвиг.

6. Релаксационный характер процессов деформирования и разрушения асфальтобетонов обеспечивает близость коэффициентов пластичности, определенных: в результате усталостных циклических и статистических испытаний; полученных при изгибе и сдвиге; осевом растяжении-сжатии; при синусоидальных нагружениях и деформациях. Более того, вполне осуществимым при современном состоянии развития вычислительной теории и техники, является переход от времени жизни при статистических испытаниях к количеству циклов до разрушения и наоборот. При этом испытания по определению времени жизни асфальтобетона под действием постоянных нагрузок отличаются простотой, применением несложного и надежного оборудования, низкой стоимостью.

7. Приведенные здесь данные и суждения свидетельствуют в пользу введения, после накопления данных, в нормативные документы принципиально новых критериев: времени жизни асфальтобетона при нормированных уровнях напряженного состояния и коэффициентов средоустойчивости как отношения времени жизни под нагрузкой в среде ко времени жизни под той же нагрузкой на воздухе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радовский, Б. С. Концепция вечных дорожных одежд [Текст] / Б. С. Радовский // Каталог-справочник : Дорожная техника. – Санкт-Петербург : ООО «Славутич», 2011. – С. 132–144.
2. Об особенностях вязко-упругого поведения битумов разных структурно-реологических типов в режимах непрерывного деформирования [Текст] / Г. В. Виноградов, В. А. Золотарев, Е. А. Веребская, А. М. Бодан // Коллоидный журнал. – 1978. – № 4. – С. 629–635.
3. Маляр, В. В. Закономерности механических свойств нефтяных битумов при стекловании [Текст] : дис. ... на соискание научн. степени канд. техн. наук : 05.23.05 – строительные материалы и изделия / В. В. Маляр. – Харьков, 1993. – 214 с.
4. Contribution des mesures rheologiques sur liants a la prevision l'ornierage en laboratoire [Текст] / J. Jolivet, M. Malot, G. Ramond, M. Pastor // Bull. Liaison Labo. P. et Ch. – 1994. – № 194. – P. 3–10.
5. Heukelom, W. Une methode ameliee de caracterisation des bitume par leurs proprietes mecaniques [Текст] / W. Heukelom // Bull. Liaison Labo. P. et Ch. – 1975. – № 76. – P. 55–64.
6. Carswel, J. Etude des essais de fluage repetes comme methode predictive de la resistance a l'ornierage des enrobes [Текст] / J. Carswel, O. Noglia // RGRA. – 2003. – № 817. – P. 55–59.
7. Olard, F. Developpement de l'essai de fatigue sur liants et mastics bitumineux [Текст] / F. Olard, D. Chabert // RGRA. – 2008. – № 865. – P. 69–74.
8. Золотарев, В. А. Об оценке адгезии битума к поверхности каменного материала [Текст] / В. А. Золотарев, Е. Н. Агеева // Автомобильные дороги. – 1995. – № 12. – С. 13–15.
9. Иванов, Н. Н. К обоснованию показателей механических свойств асфальтовых смесей [Текст] / Н. Н. Иванов, М. Я. Телегин // Труды ДорНИИ : «Исследование органических вяжущих материалов и физико-механических свойств асфальтовых систем» / Дорожн. научн. исслед. ин-т. – Москва : Дориздат, 1949. – С. 106–133.
10. Duriez, M. Nouveau traite des materiaux de construction. Paris [Текст] / M. Duriez, J. Arrambide. – Dunod, 1962. – V. 3. – 1543 p.
11. Щербаков, И. М. Исследование и учет структурно-механических характеристик асфальтобетона при назначении конструкций дорожных одежд бетона [Текст] : автореф. дис. ... на соискание научн. степени канд. техн. наук : 05.23.05 – строительные материалы и изделия / И. М. Щербаков. – Москва : СоюздорНИИ, 1979. – 23 с.

12. Регель, В. Р. Кинетическая природа прочности твердых тел [Текст] / В. Р. Регель, А. И. Слущер, Э. Е. Томашевский. – М. : Наука, 1974. – 500 с.
13. Золотарев, В. А. Долговечность дорожных асфальтобетонов : монография [Текст] / В. А. Золотарев. – Харьков : Вища школа, 1977. – 116 с.
14. Ефремов С. В. Долговечность асфальтобетона в условиях воздействия агрессивных сред [Текст] : дис. ... на соискание научн. степени канд. техн. наук : 05.23.05 – строительные материалы и изделия / С. В. Ефремов. – Харьков, 2010. – 187 с.
15. ВСН 46-83. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа [Текст]. – Взамен «Инструкции по проектированию дорожных одежд нежесткого типа» ВСН 46-72 ; введ. 01.01.1984 г. – Москва : Транспорт, 1985. – 157 с.
16. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд [Текст] / Под ред. Н. Н. Иванова. – М. : Транспорт, 1973. – 328 с.
17. Золотарев, В. А. О долговременной прочности асфальтобетона в широком диапазоне температур [Текст] / В. А. Золотарев, В. С. Титарь // Известия ВЗУов. Строительство и архитектура. – 1981. – № 11. – С. 83–87.
18. Гордеев, С. О. Деформации и повреждения дорожных асфальтобетонных покрытий [Текст] / С. О. Гордеев. – М. : Минкоммунхоз РСФСР, 1963. – 132 с.
19. Золотарев, В. А. Разрушение асфальтовых материалов под воздействием нагрузок и агрессивных сред [Текст] / В. А. Золотарев, З. Г. Зубко, А. В. Космин // Реферативный сборник «Межотраслевые вопросы строительства (отечественный опыт)». – М. : ЦИНИС, 1970. – Вып. 3. – С. 92–94.
20. Горюнов, Ю. В. Эффект Ребиндера [Текст] / Ю. В. Горюнов, Н. В. Перцов, Б. Д. Сумм. – М. : Наука, 1966. – 128 с.
21. Linder, R. La machine d'essais rheologique asservie (MAER-LCP) et son utilisation pour l'essai de traction LPC sur enrobes [Текст] / R. Linder, F. Moutier, M. Penet, P. Peyzet // Bull. Liaison Labo. P. et Ch. – 1986. – № 142. – P. 132–138.
22. Золотарев, В. А. Фундаментальные показатели линейного вязко-упругого деформирования асфальтобетона [Текст] / В. А. Золотарев // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2010. – № 3. – С. 24–27.
23. Золотарев, В. А. Реологические свойства асфальтобетонов на основе битумов с большим содержанием полимера [Текст] / В. А. Золотарев, А. С. Лапченко // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2004. – № 3. – С. 23–26.

Получено 04.12.2013

## В. О. ЗОЛОТАРЬОВ ЧАС ЯК КРИТЕРІЙ ОЦІНКИ ДОВГОВІЧНОСТІ АСФАЛЬТОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Запропоновано новий аспект оцінки довговічності асфальтобетонів за тривалістю його життя під постійно діючими навантаженнями за принципом повзучості. Показано, що тривалість життя набагато об'єктивніше характеризує довговічність асфальтобетону, ніж показники міцності і модулі пружності. Тривалість життя розглядається як альтернативний показник циклічної втоми. Це твердження ґрунтується на відповідності значень коефіцієнтів пластичності асфальтобетонів при циклічних і статичних випробуваннях, при режимах завантаження і деформування, при різних схемах напруженого стану. Запропоновано прискорений метод визначення стійкості асфальтобетонів, що ґрунтуються на одночасному впливі на асфальтобетон навантажень і рідких агресивних середовищ.

**бітум, асфальтобетон, втома, тривалість життя, режими механічної дії та схеми напруженого стану**

## VIKTOR ZOLOTARYOV AS THE CRITERION FOR ASSESSING THE DURABILITY OF ASPHALT MATERIALS

Kharkov National Automobile and Highway University

A new aspect of the assessment of durability of asphalt concrete for the duration of his life under constant load action on the basis of creep has been suggested. It has been shown that the life expectancy is much more objective characterizes the durability of asphalt than indicators of strength and modulus of elasticity. Life expectancy is considered as an alternative measure of cyclic fatigue. This assertion is based on the values of the coefficients according asphalt ductility under cyclic and static tests, modes of loading and deformation under different schemes stress. Accelerated method of determining the stability of asphalt concrete, based on the simultaneous exposure to asphalt loads and liquid aggressive media has been suggested.

**asphalt bitumen, fatigue, life, modes of mechanical impact and stress state scheme**

**Золотарьов Віктор Олександрович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології дорожньо-будівельних матеріалів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Наукові інтереси: склад, структура, властивості, технологія, реологія та довговічність бітумних в'язучих і бетонів на їх основі.

**Золотарев Виктор Александрович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии дорожно-строительных материалов Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Научные интересы: состав, структура, свойства, технология, реология и долговечность битумных вяжущих и бетонов на их основе.

**Zolotaryov Viktor** – DSc (Eng), Professor, the Head of the Road-Building Materials Technology Department, Kharkov National Automobile Road University. Scientific interests: consist, structure, properties, technology, theology and durability bitumen knitting and concrete on their basis.