

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСТАЛОСТНОГО РЕСУРСА АСФАЛЬТОБЕТОНА

THEORETICAL AND METHODOLOGICAL FOUNDATIONS FOR DETERMINATION OF ASPHALT FATIGUE SERVICE LIFE

В статье рассмотрены теоретические и методологические основы определения усталостного ресурса асфальтобетона: методика построения диаграммы испытания асфальтобетонных образцов на циклические нагрузки в мягком режиме нагружения, упруго-вязко-пластическая модель асфальтобетона, законы ее деформирования при нагружении и разгрузке, методики определения усталостной повреждаемости асфальтобетонного образца, расчетного и остаточного сроков службы вновь устроенных и эксплуатируемых асфальтобетонных покрытий.

The article covers theoretical and methodological foundation for determination of asphalt fatigue service life: technique of plotting diagram for testing asphalt samples for cyclic loads under soft loading mode, elastic-viscous-plastic model of asphalt, laws of its deformation under loading and unloading conditions, techniques for determination of fatigue damageability of asphalt sample, estimated and residual service life of newly arranged asphalt cover and asphalt cover in service correspondingly.

ВВЕДЕНИЕ

Значительные резервы повышения усталостной долговечности асфальтобетонных покрытий заложены не только в применении качественных дорожно-строительных материалов и современных инновационных технологий, но и в возможности снижения влияния некачественно выполненных работ при подборе состава асфальтобетонной смеси, в достаточно полном учете «наследственных» дефектов, образующихся вследствие деградационных изменений в структуре асфальтобетона, происходящих на стадии приготовления асфальтобетонной смеси, ее транспортировки, укладки и уплотнения, в конечном итоге локали-

С.Е. Кравченко,
кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Строительство и эксплуатация дорог» Белорусского национального технического университета, г. Минск, Беларусь

Л.И. Шевчук,
доцент кафедры «Сопротивление материалов и ТУ» Белорусского национального технического университета, г. Минск, Беларусь

зующихся в структуре асфальтобетона в виде очагов первичного разрушения, а также в применении оптимальной стратегии эксплуатационного содержания покрытия. Несомненно, наибольшее влияние на усталостную долговечность асфальтобетонных покрытий оказывают процессы приготовления асфальтобетонной смеси и устройства асфальтобетонных покрытий, которые следует рассматривать не изолировано друг от друга, а во взаимосвязи, так как конечные эксплуатационные характеристики покрытий формируются под воздействием всего комплекса как предыдущих, так и последующих технологических операций. При этом от предыдущих операций могут «унаследоваться» как положительные, так и отрицательные факторы, определенным образом влияющие на формирование структуры асфальтобетона.

Можно постулировать, что оптимальная структура асфальтобетона, при которой достигается максимальный усталостный ресурс асфальтобетонного покрытия, закладывается при проектировании и подборе состава асфальтобетона, реализуется при устройстве асфальтобетонного покрытия и поддерживается при его эксплуатации. Общий алгоритм усталостной долговечности покрытия может быть представлен как система, состоящая в общем случае из ряда частных алгоритмов, находящихся между собой в причинно-следственной связи:

- алгоритм усталостной долговечности на стадии проектирования и подбора состава асфальтобетонной смеси;
- алгоритм усталостной долговечности при приготовлении асфальтобетонной смеси;
- алгоритм усталостной долговечности при устройстве асфальтобетонного покрытия;
- алгоритм усталостной долговечности при эксплуатации асфальтобетонного покрытия.

Значительную долю в обеспечении усталостного ресурса асфальтобетона занимает реализация алгоритма усталостной долговечности на стадии

проектирования и подбора состава асфальтобетонной смеси.

Сегодня проектирование и подбор состава асфальтобетонной смеси для дорог высоких категорий следует осуществлять с обязательным математическим планированием эксперимента. Эффективность этого процесса в значительной степени зависит от выбора факторов и критериев оптимизации. Опыт эксплуатации асфальтобетонных покрытий показывает, что существующая гамма нормативных требований к составляющим асфальтобетона и к самой смеси не гарантирует обеспечения расчетного срока службы этих покрытий. Одной из основных причин данного факта следует считать отсутствие функциональности методов определения показателей свойств материалов, то есть невозможность точного воспроизведения при лабораторных исследованиях реальных условий работы асфальтобетонного покрытия.

В качестве контролируемого параметра наиболее часто определяют предел прочности при сжатии. Это связано с тем, что испытание на сжатие при скорости деформирования 3 мм/мин нормировано СТБ 1033 [1]. Однако этот параметр не в полной мере отражает реальные эксплуатационные условия работы материала в дорожной кон-

струкции. Проведенные исследования позволяют утверждать, что наиболее полно отражающей реальные условия работы материала в условиях воздействия на асфальтобетонное покрытие потока автомобилей может быть усталостная повреждаемость асфальтобетона, определяемая при испытании по схеме растяжения при циклическом динамическом изгибе в условиях жесткого режима нагружения или испытании на динамическую ползучесть циклически сжимающей нагрузкой цилиндрических образцов в условиях нагружения в мягком режиме. При этих режимах испытаний механизм разрушения асфальтобетонного образца в достаточной степени соответствует механизму разрушения асфальтобетона, эксплуатируемого в реальных условиях [2].

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ДИАГРАММЫ ИСПЫТАНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ОБРАЗЦОВ НА ЦИКЛИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ В МЯГКОМ РЕЖИМЕ НАГРУЖЕНИЯ

Сущность методики основана на изменении высоты асфальтобетонного образца под воздействием импульсной нагрузки, действующей параллельно его вертикальной оси при температуре 20 °С. Целью является получение диаграмм цикловой деформации и зависимости нагрузки от деформации на каждом цикле и последующий анализ соотношения упругой и пластической деформаций, деформации упругого последствия коэффициентов аппроксимирующих функций для максимальной цикловой деформации и для упругой составляющей деформации образца.

При проведении испытаний используется установка Cooper Technology (рис. 1).

Продолжительность испытания - 1 800 циклов нагружения.

Испытание происходит в два этапа:

- подготовка - предварительное воздействие нагрузки 10 кПа в течение 210 с;

- основное испытание - циклическое воздействие на образец нагрузки 100 кПа в течение 1 с, затем следу-

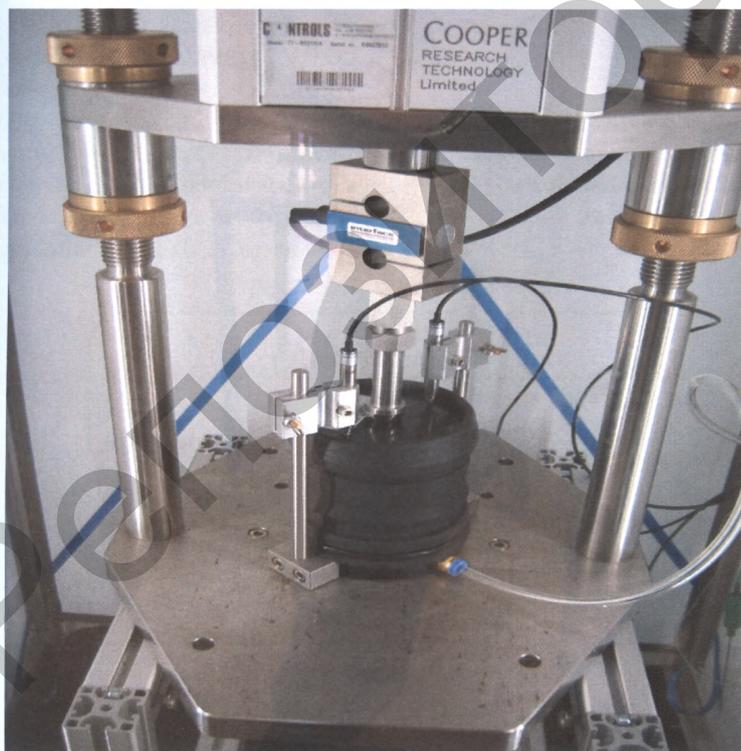


Рисунок 1 - Установка Cooper Technology

ет пауза продолжительностью 1 с.

На рисунке 2 представлены синхронизированные графики «Сила (нагрузка) – Время» и «Деформация – Время» процесса определения устойчивости асфальтобетона к пластическим деформациям под действием циклической нагрузки.

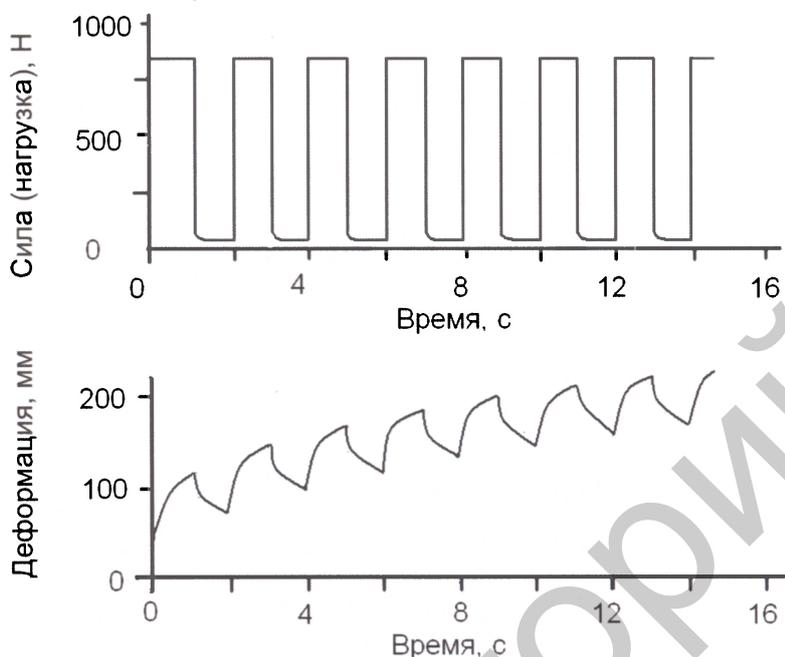


Рисунок 2 - Синхронизированные графики «Сила (нагрузка) - Время» и «Деформация-Время» процесса определения устойчивости асфальтобетона к пластическим деформациям под действием циклической нагрузки

Во время испытания измеряется величина полной деформации, включающей упругую и пластическую составляющие. Начало отсчета деформации образца (нулевое значение) устанавливается после

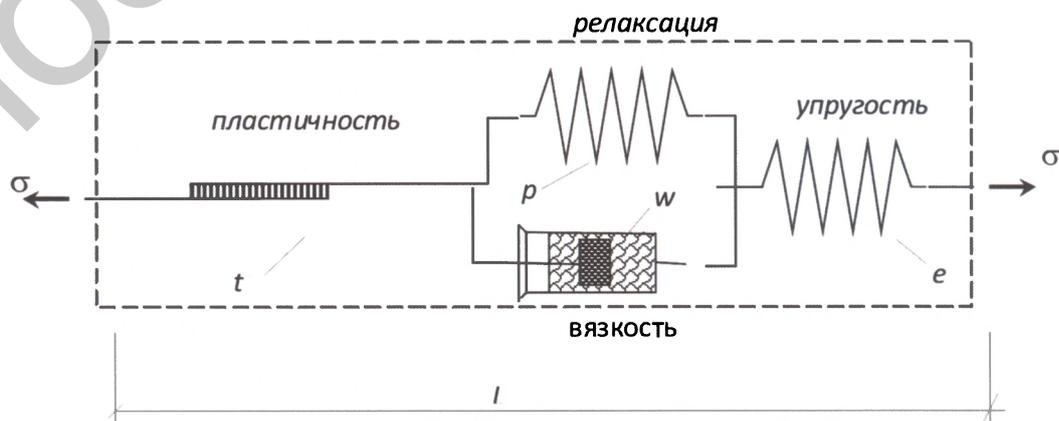


Рисунок 3 - Схематическое представление модели упруго-вязко-пластической среды

воздействия предварительной нагрузки. Первое измерение деформации образца происходит через 2 цикла, в интервале 10-100-й цикл – через каждые 10 циклов, последующие измерения – через каждые 100 циклов.

Обработка результатов испытаний выполняется по программе GREEP.

Исходные данные для программы CREEP, а именно: количество циклических нагружений образца, величина циклической нагрузки, продолжительность периода циклических нагружений и отдыха образца, значения деформации образца при циклическом нагружении – определяются из диаграммы цикловой деформации.

УПРУГО-ВЯЗКО- ПЛАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ОБРАЗЦА

В соответствии с [3] схематически упруго-вязко-пластическую среду, проявляющую релаксационную способность, можно представить в виде модели, состоящей из трех частей (рис. 3). Первая часть модели является упругой и состоит из одного элемента e . Вторая часть явля-

ется упруго-вязкой и включает упругий p и идеально вязкий w элементы. Третья часть модели содержит один элемент t и обеспечивает моделирование местного разрушения и пластические свойства материала.

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ВЯЗКОЙ МОДЕЛИ ПРИ НАГРУЖЕНИИ

Закон деформирования упруго-вязкой части модели, способной к релаксации (рис. 4), определяется следующим образом. В упругом элементе p напряжение определяется его деформацией, а в вязком w – скоростью деформации. Если упругий и вязкий элементы характеризуются параметрами α и β , то напряжения в них равны

$$\sigma_p = \alpha \varepsilon_p; \quad \sigma_w = \beta \dot{\varepsilon}_w. \quad (1)$$

Общее напряжение равно сумме напряжений в упругом и вязком элементах (1)

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_w = \alpha \varepsilon_p + \beta \dot{\varepsilon}_w. \quad (2)$$

Для удобства обозначим отношения параме-

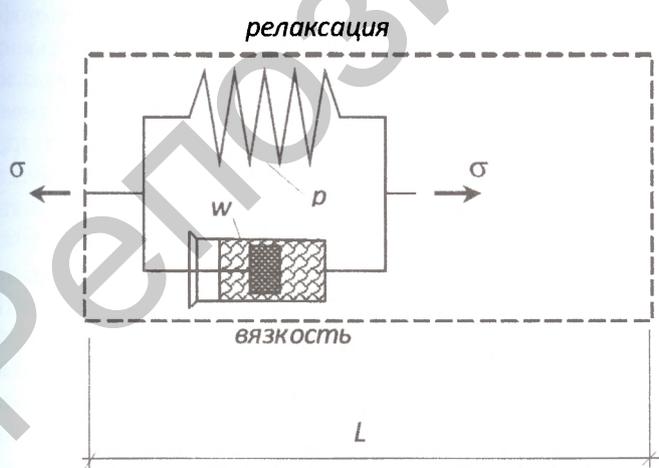


Рисунок 4 - Схематическое представление модели вязкой среды

тров модели следующим образом:

$$a = \frac{\alpha}{\beta}, \quad b = \frac{\sigma}{\beta}, \quad \frac{b}{a} = \frac{\sigma}{\alpha}. \quad (3)$$

Учитывая, что деформации обоих элементов одинаковые $\varepsilon_p = \varepsilon_w = \varepsilon$, уравнение (3) запишем в таком виде

$$\dot{\varepsilon} + \alpha \varepsilon = b. \quad (4)$$

В результате получено неоднородное дифференциальное уравнение первого порядка с постоянными коэффициентами.

Интегрируя уравнение (4) и определяя постоянную интегрирования из условия $t = t_0, \varepsilon = \varepsilon_0$ получим решение в виде

$$\varepsilon = \frac{b}{\alpha} + \left(\varepsilon_0 - \frac{b}{\alpha} \right) e^{-\alpha(t-t_0)}. \quad (5)$$

Жесткость упругого элемента характеризуется параметром γ . Его деформация определяется законом Гука

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\gamma}. \quad (6)$$

Складывая деформации вязкого (5) и упругого (6) элементов, после преобразований получим закон деформирования упруго-вязкой части модели с учетом начальной деформации для прямого хода нагружения

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{\alpha} \left[1 - e^{-\frac{\alpha}{\beta}(t-t_0)} \right] + \varepsilon_0 e^{-\frac{\alpha}{\beta}(t-t_0)} + \frac{\sigma}{\gamma}. \quad (7)$$

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ВЯЗКОЙ ЧАСТИ МОДЕЛИ ПРИ РАЗГРУЗКЕ (ОТДЫХЕ)

Так как разгрузка происходит мгновенно, то мгновенно исчезает и деформация упругого элемента ε (6). Затем начинается вязкое течение – часть деформации, приобретенной вязким элементом, медленно уменьшается. Образец “отдыхает” (участок диаграммы $t_2 - t_1$ на рисунке 5).

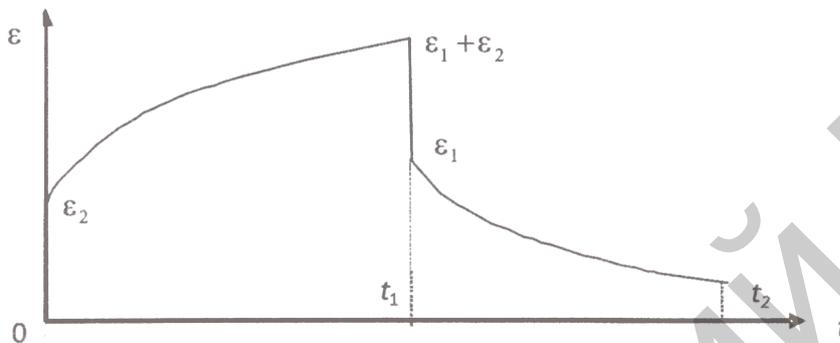


Рисунок 5 - Диаграмма деформирования упруго-вязкого элемента при нагрузке и разгрузке

В последний момент нагружения t_1 модель будет иметь деформацию, равную

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{\alpha} \left[1 - e^{-\frac{\alpha}{\beta}(t_0 - t_1)} \right] + \varepsilon_0 e^{-\frac{\alpha}{\beta}(t_0 - t_1)} \quad (8)$$

Соблюдая условие равновесия и учитывая выражения (1), получим дифференциальное уравнение следующего вида

$$\dot{\varepsilon} + \alpha \varepsilon = 0. \quad (9)$$

Определяя значение постоянной интегрирования из условия $t = t_1$, $\varepsilon = C e^{-\alpha t} = \varepsilon_1$, получим закон деформирования модели при разгрузке с учетом начальной деформации в виде

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{\alpha} e^{-\frac{\alpha}{\beta}(t_1 - t)} + \left(\varepsilon_0 - \frac{\sigma}{\alpha} \right) e^{-\frac{\alpha}{\beta}(t_0 - t)}. \quad (10)$$

Здесь t изменяется от t_1 до t_2 (t_1 – время удерживания образца под нагрузкой; t_2 – время завершения одного цикла испытания; $(t_2 - t_1)$ – время “отдыха” образца).

ДЕФОРМИРОВАНИЕ УПРУГО-ВЯЗКО- ПЛАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИ НАГРУЖЕНИИ И РАЗГРУЗКЕ С УЧЕТОМ НАЧАЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Обозначим полную, упругую (полностью восстанавливающуюся), вязкую (частично восстанавливающуюся) и необратимую деформацию образца, соответственно, ε_{tot} , ε_e , ε_w и ε_r .

Элемент, моделирующий необратимые (пластические) деформации, характеризуется коэффициентом η . Закон деформирования имеет вид

$$\eta \dot{\varepsilon} = \sigma, \quad (11)$$

где η – коэффициент, характеризующий развитие необратимых деформаций образца;

σ – напряжение, прикладываемое к образцу.

Проинтегрируем дифференциальное уравнение (11) и получим необратимые пластические деформации образца за один цикл

$$\varepsilon_r = \int_0^{t_1} \frac{\sigma}{\eta} dt = \frac{\sigma}{\eta} \int_0^{t_1} dt = \frac{\sigma}{\eta} t_1 \quad (12)$$

Отсюда следует, что необратимая деформация в упруго-вязко-пластической модели зависит от напряжения и времени испытания.

Величина ε_r вычисляется на каждом цикле испытания (12) и учитывается при определении общей деформации упруго-вязко-пластической модели образца за время удерживания нагрузки t_1 как часть начальной деформации ε_0 .

При разгрузке (“отдыхе”), которая начинается в момент времени t_1 и заканчивается в момент времени t_2 , считается, что упругая деформация мгновенно исчезает, вязкая деформация частично

восстанавливается, а необратимые деформации за счет разрушения материала образца не происходят. Поэтому они в расчете не учитываются. Часть невосстановленной вязкой деформации за время цикла определяется из выражения (10) при $t = t_2$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\sigma}{\alpha} e^{\frac{\alpha}{\beta}(t_1 - t_2)} + \left(\varepsilon_0 - \frac{\sigma}{\alpha} \right) e^{\frac{\alpha}{\beta}(t_0 - t_2)}. \quad (13)$$

Невосстановленная часть вязкой деформации вместе с пластической (необратимой) деформацией учитываются в очередном цикле как начальная деформация.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОНА И ЕГО УСТАЛОСТНОГО РЕСУРСА

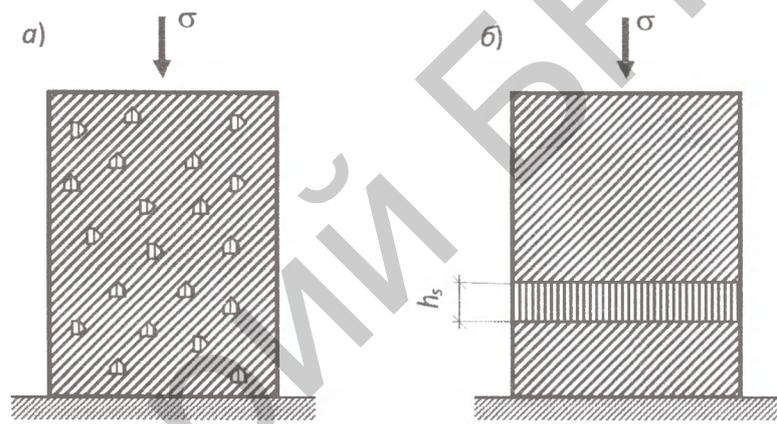
В процессе многократного циклического нагружения асфальтобетонного образца в мягком режиме в нем происходит накопление необратимых микроразрушений за счет пластических деформаций. При этом степень разрушения материала может быть оценена исходя из усталостной повреждаемости материала как отношение объема поврежденной части к общему объему образца, выраженное в процентах. Для определения указанных величин используется диаграмма испытания асфальтобетонных образцов на циклические нагрузки в мягком режиме нагружения и модель упруго-вязко-пластического материала.

По результатам расчета упруго-вязко-пластической модели методом минимизации разности площадей опытной и расчетной диаграмм устанавливаются параметры E_p , E_d , χ , η , а также общая деформация образца ε_{tot} . Затем, используя полученные параметры E_p , E_d , χ , η , выполняется расчет упруго-вязкой модели образца и определяется полная деформация ε_{tot}^* . Разность полных деформаций упруго-вязко-пластической и упруго-вязкой моделей определяет пластическую (необратимую) деформацию образца, нако-

пленную им за все циклы испытания.

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{tot} - \varepsilon_{tot}^* \quad (14)$$

Рассмотрим порядок определения пластической (необратимой) деформации образца асфальтобетона. Так как материал неоднородный, поврежденные и испытывающие пластические деформации части образца распределены по его объему хаотически (рис. 6а). Для наглядности со-



а) хаотическое расположение поврежденных частей;
б) сосредоточение разрушений образца в его слое

Рисунок 6 - Схематическое представление разрушения образца

берем все поврежденные части и части с пластическими деформациями в один слой толщиной h_s (рис. 6б). В процессе испытания происходит накопление пластических и необратимых деформаций в выделенном слое. За счет этого образец укорачивается на толщину этого слоя, то есть его необратимая абсолютная деформация равна толщине выделенного слоя. Тогда относительная остаточная деформация может быть выражена отношением

$$\varepsilon_{pl} = \frac{h_s}{h} \quad (15)$$

Если повреждение образца оценивать усталостной повреждаемостью D , то она равна отношению поврежденного объема V_s ко всему объему V образца, что равно относительной остаточной

деформации ε_{pi} .

Принимая во внимание (12), суммарная усталостная повреждаемость определена выражением (16), %

$$D = m \frac{\sigma}{\eta} t_1 \cdot 100, \quad (16)$$

где m – количество циклов испытания;

η – коэффициент, характеризующий развитие необратимых деформаций образца;

σ – напряжение, прикладываемое к образцу;

t_1 – время нагружения (прямого хода) образца в пределах одного цикла.

Усталостный ресурс асфальтобетонных покрытий может быть оценен исходя из расчетного срока службы устраиваемых или остаточного срока службы эксплуатируемых покрытий.

Расчетный срок службы вновь устраиваемых покрытий определяется по формуле

$$T = \frac{D_{kp} - D_b}{\Delta D}, \quad (17)$$

где D_{kp} – критическая усталостная повреждаемость асфальтобетона соответствует состоянию покрытия, достигшего третьего уровня дефектности, %;

D_b – базовая усталостная повреждаемость асфальтобетона устроенного слоя (заносится в паспорт дороги и хранится у Заказчика, владельца дороги, и организации, выполняющей измерения), %;

ΔD – прогнозируемая усталостная повреждаемость асфальтобетона за год эксплуатации, %.

В свою очередь остаточный срок службы асфальтобетонного покрытия определяется по формуле (18).

$$T = \frac{D_{kp} - D_b}{D_t - D_b} \cdot t, \quad (18)$$

где D_{kp} – критическая усталостная повреждаемость асфальтобетона, соответствующая состоянию покрытия, достигшего третьего уровня дефектности, %;

D_b – базовая усталостная повреждаемость асфальтобетона устроенного слоя (заносится в паспорт дороги и хранится у Заказчика, владельца дороги, и организации, выполняющей измерения), %;

D_t – фактическая усталостная повреждаемость асфальтобетона, соответствующая усталостной повреждаемости на текущий момент времени, %;

t – срок эксплуатации покрытия между определением значений D_b и D_t .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Усталостный ресурс новых и эксплуатируемых асфальтобетонных покрытий может быть оценен соответственно их расчетным и остаточным срокам службы с учетом усталостной повреждаемости асфальтобетона, представляющей собой пластическую (необратимую) деформацию образца, накопленную им за все циклы испытания и определяемую как разность полных деформаций, полученных при расчете реологических упруго-вязко-пластической и упруго-вязкой моделей методом минимизации разности площадей опытной и расчетной диаграмм цикловой деформации.

Литература

1. *Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия: СТБ 1033-2004. – Введ. 2005-01-01. – Минск: Минстройархитектуры, 2004.*
2. *Кравченко, С.Е. Усталостное разрушение асфальтобетона // Строительная наука и техника – 2009. – №5. – С. 32-36.*
3. *Коларов, Д., Балтов, А., Бончарова, Н. Механика пластических сред. – М.: Мир, 1979. – 302 с.*