

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКОВ СЛУЖБЫ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ С УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИМ МАТЕРИАЛОМ

Николай Сергеевич Ковалев  
Елена Владимировна Куликова

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

В областях Центрально-Черноземного региона несколько сотен сельских населенных пунктов не имеют подъездных путей с твердым дорожным покрытием. В условиях дефицита денежных средств увеличение срока службы дорожных одежд даст существенный экономический эффект. Большинство исследователей полагают, что разрушение асфальтобетона и образование трещин носит усталостный характер и что наиболее достоверным критерием трещиностойкости асфальтобетона являются результаты испытаний на усталость. Характерная особенность явления усталости заключается в том, что к постепенному снижению прочности и разрушению покрытия дороги приводит воздействие нагрузок, по величине существенно меньше разрушающих. Рассмотрены теория Гриффитса и термофлуктуационная теория разрушения С.Н. Журкова, выбран способ испытания на циклическую усталость с постоянной амплитудой деформаций. Усталостное разрушение асфальтобетона в покрытии происходит в результате образования трещин вблизи подошвы слоя и постепенного их распространения к поверхности покрытия. Количество повторных нагрузок, необходимых для распространения трещин по толщине слоя, превышает количество циклов до появления первой усталостной трещины вблизи подошвы слоя приблизительно в 20 раз. Асфальтобетон с углеродсодержащим минеральным порошком является сравнительно новым материалом, и его свойства мало изучены. В качестве углеродсодержащего минерального материала использовали шунгит. Проведены исследования циклической усталости асфальтобетона в лабораторных условиях, на основании которых спрогнозированы сроки службы асфальтобетонных покрытий с углеродсодержащим минеральным порошком. Приведен пример расчета долговечности асфальтобетонных покрытий для условий Воронежской области.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** усталость асфальтобетона, характер развития трещин, асфальтобетон с углеродсодержащим минеральным порошком, прогнозирование долговечности.

## PREDICTION OF SERVICE LIFE OF ASPHALT CONCRETE PAVEMENTS WITH CARBON-CONTAINING MATERIAL

Nikolay S. Kovalev  
Elena V. Kulikova

Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

Several hundred of rural settlements in the Central Chernozem Region have no approaching roads with a hard surface. In the conditions of money deficiency an increase in the service life of roadway pavements will have a substantial economic effect. Most researchers believe that destruction of asphalt concrete and formation of cracks have a fatigue character, and the most reliable criterion of crack resistance of asphalt concrete is the results of fatigue tests. A characteristic feature of the fatigue phenomenon is that the gradual decrease in durability and further destruction of road pavement are caused by loads that are significantly less than the breaking load. The authors have considered the Griffith's theory and the thermofluctuational failure theory of S.N. Zhurkov and chosen the method of testing for cyclic fatigue with constant amplitude of deformation. Fatigue degradation of asphalt concrete in the pavement is caused by formation of cracks near the sole of the layer and their gradual propagation up to the surface. The number of repeated loads necessary for crack propagation over the layer thickness exceeds the number of cycles before the emergence of the first fatigue crack near the sole of the layer approximately by 20 times. Asphalt concrete with carbon-containing mineral powder is a relatively new material, and its properties are underexplored. Shungit was used as the carbon-containing mineral material. The authors conducted a research of cyclic fatigue of asphalt concrete in laboratory conditions and used the results as the basis for predicting the service life of asphalt concrete pavements with carbon-containing mineral powder. The authors provide an example of calculation of durability of asphalt concrete pavements for the conditions of Voronezh Oblast.

**KEY WORDS:** asphalt concrete fatigue, crack development character, asphalt concrete with carbon-containing mineral powder, prediction of durability.

**Актуальность исследований**

В центрально-черноземных областях несколько сотен сельских населенных пунктов не имеют подъездных путей с твердым дорожным покрытием. В условиях дефицита денежных средств увеличение срока службы дорожных одежд даст существенный экономический эффект. Чрезвычайно важной проблемой в обеспечении эксплуатационной надежности нежестких дорожных одежд является определение и прогнозирование усталостных свойств асфальтобетона и асфальтобетонных покрытий.

В последнее время значительно возрос интерес исследователей к изучению явлений усталости, проявляющейся в изменении во времени показателей прочности и деформативности асфальтобетона. Большинство исследователей полагают, что разрушение асфальтобетона и образование трещин носит усталостный характер и что наиболее достоверным критерием трещиностойкости асфальтобетона являются результаты испытаний на усталость [4, 5, 6, 7]. Они же считают, что усталостные испытания позволяют прогнозировать эксплуатационную надежность и долговечность асфальтобетона.

Характерная особенность этого явления (усталости) заключается в том, что к постепенному снижению прочности и разрушению покрытия дороги приводит воздействие нагрузок, по величине существенно меньше разрушающих.

**Методика исследований**

Определенный интерес представляют исследования, в которых предприняты попытки выяснения физической сущности процессов усталостного разрушения.

Приблизительно теоретическая прочность материала  $\sigma_{TEOP}$  может быть вычислена по формуле (1) [20]

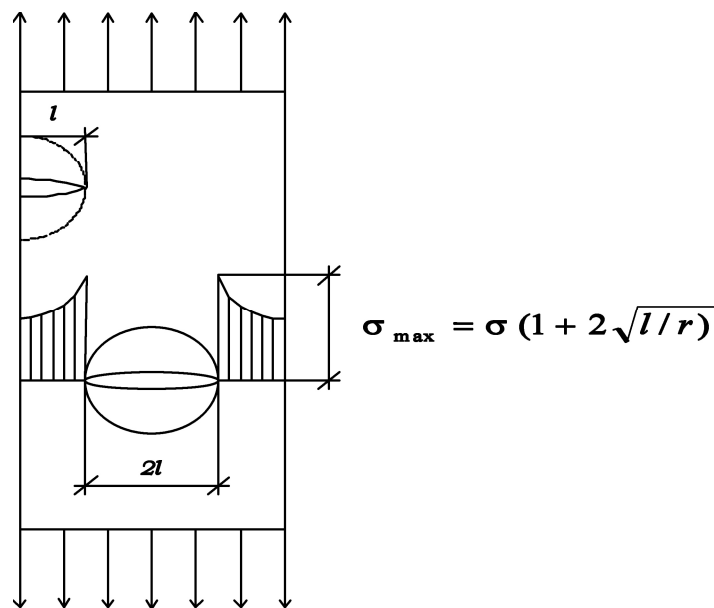
$$\sigma_{TEOP} = 2 \sqrt{\frac{GE}{X}}, \tag{1}$$

где  $G$  – поверхностная энергия твердого тела на  $1 \text{ см}^2$ ;

$E$  – модуль упругости;

$X$  – межатомное расстояние, в среднем равное  $2 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ .

Прочность реальных материалов существенно меньше их теоретической прочности из-за дефектов в строении. Упрощенно их можно представить как нарушения сплошности в виде поверхностных и внутренних микротрещин (см. рис.).



Концентрация напряжений в пластине с трещиной

При приложении нагрузки (при осевом растяжении) напряжения по сечению будут распределяться неравномерно и вблизи микродефектов, в частности на кончиках микротрещин они будут в  $K$  раз больше (2), чем среднее напряжение ( $\sigma$ ).

$$\sigma_K = \sigma \cdot K, \quad (2)$$

где  $K$  – коэффициент концентрации напряжений, который зависит от длины трещины ( $l$ ) и радиуса кривизны ( $r$ ) и приближенно описывается (3)

$$K = 1 + 2\sqrt{\frac{l}{r}}, \quad (3)$$

где  $l$  – длина трещины, идущей с поверхности, или полудлина внутренней эллиптической трещины;

$r$  – радиус кривизны в вершине трещины.

Явление усталости принимается как процесс постепенного разрушения материала трещинами. При этом различают три фазы разрушения: начало образования трещин; период стабильного роста трещины и стадию интенсивного роста трещины.

По сравнению с началом образования трещин, которое занимает незначительное время, фазу устойчивого роста трещин можно рассматривать в качестве основного процесса усталости. Циклическое воздействие нагрузки ведет к постепенному росту трещин до критической глубины. Трещина увеличивается на третьей стадии самопроизвольно, что и ведет к разрушению материала.

Условия, при которых только и возможен рост трещин под действием внешних сил у упругих тел, были сформулированы Гриффитсом [21]:

1) рост трещины должен быть энергетически выгодным процессом, т.е. распространение трещины должно сопровождаться уменьшением внутренней энергии деформированного тела. Когда под действием местных напряжений образуется трещина, она слегка раскрывается, и освобождается часть энергии упругой деформации. Одновременно при раскрытии и дальнейшем росте трещины образуются две новые поверхности с поверхностной энергией, равной  $2Gl$  на  $1 \text{ см}^2$ , то есть рост трещины сопровождается также и приобретением энергии, которая пропорциональна первой степени длины трещины.

2) должен работать молекулярный механизм, с помощью которого может осуществляться преобразование энергии упругой деформации в поверхностную энергию.

При распространении трещины материал вблизи трещины разгружается, и вследствие этого выделяется энергия деформации. Объем, в котором выделяется энергия, изображается на рисунке как половина объема единичной высоты, численно равного  $\pi l^2 / 2$ . Выделенная энергия  $U_d$  (4) зависит от приложенного напряжения  $\sigma$ , модуля упругости  $E$  и глубины трещины  $l$  (половина длины внутренней трещины)

$$U_d = -\pi l^2 \sigma^2 / 2E. \quad (4)$$

Образование двух новых поверхностей трещины требует затрат энергии (5)

$$U_{II} = 2Gl. \quad (5)$$

Рост трещины возможен, когда длина ее больше некоторого «критического» значения, при котором выполняется первое условие Гриффитса, то есть освобождающаяся энергия упругой деформации больше энергии образующихся новых поверхностей. Критическая длина трещины уменьшается с увеличением напряжения в материале

$$\pi l^2 \sigma^2 / 2E > 2Gl, \quad (6)$$

откуда

$$\sigma = 2\sqrt{\frac{GE}{\pi l}}. \quad (7)$$

Второе необходимое условие роста трещины по Гриффитсу – наличие механизма, с помощью которого энергия упругих деформаций преобразуется в энергию новых поверхностей. Таким механизмом для хрупких материалов является сохранение высокой концентрации напряжений  $K$  на кончиках трещины в процессе ее роста.

Поверхностная энергия разрушения асфальтобетона можно определить экспериментально в соответствии с методикой [1], однако применение теории Гриффитса для асфальтового бетона достаточно сложно в связи со значительной трудностью корректного определения площади поверхности разрушения.

К тому же пластичные материалы, к которым можно отнести асфальтобетон, вследствие ряда причин способны еще на молекулярном уровне сопротивляться возникновению нарушений сплошности и дальнейшему росту трещин. Под действием местных напряжений вблизи дефектов их строения появляются пластические деформации, выравнивающие напряжения по рабочему сечению [20].

Анализ усталостных характеристик на основе термофлуктуационной теории разрушения С.Н. Журкова показал [17], что усталостные свойства асфальтобетона непосредственно зависят от степени его пластичности и что имеется определенная связь между прочностными и усталостными свойствами материала.

Различают два способа испытаний на усталость [19]:

- испытания с постоянной амплитудой напряжений;
- испытания с постоянной амплитудой деформаций.

Способ испытаний на усталость с постоянной амплитудой деформаций, по моему мнению, является более корректным по сравнению с испытаниями с постоянной амплитудой напряжений, так как практически невозможно установить постоянное напряжение при росте трещин и, соответственно, уменьшении площади сечения материала.

Количество приложений нагрузки до момента разрушения асфальтобетона ( $N$ ) и амплитуду относительной деформации ( $\varepsilon$ ) связывают обычно выражением (8)

$$N = C (1/\varepsilon)^m, \quad (8)$$

где  $C$  и  $m$  – постоянные величины, зависящие от состава и свойств асфальтобетона.

Применимость этой зависимости к сопротивлению асфальтобетона повторным нагрузкам получила экспериментальное подтверждение для смесей различного состава [12]. Установлено также, что количество циклов повторного нагружения до разрушения образца возрастает с увеличением продолжительности пауз между приложениями нагрузок. При испытании образцов в лабораторных условиях пауза обычно не превышает длительности импульса нагружения. Фактически периоды отдыха асфальтобетона в покрытии между повторными воздействиями нагрузок от движущегося транспорта значительно больше длительности нагружения. Это приводит к увеличению усталостной долговечности примерно в 5 раз [12]. По другим данным, увеличение продолжительности перерыва между нагружениями увеличивает количество циклов до разрушения в 5-10 раз [19].

Усталостное разрушение асфальтобетона в покрытии происходит в результате образования трещин вблизи подошвы слоя и постепенного распространения трещин к поверхности покрытия. Количество повторных нагрузок, необходимых для распространения трещин по толщине слоя, превышает количество циклов до появления первой усталостной трещины вблизи подошвы слоя приблизительно в 20 раз. Следовательно, долговечность асфальтобетона в покрытии превосходит количество циклов «нагрузка – разгрузка» без пауз, которые образец асфальтобетона выдерживает в лаборатории до разрушения в 100 [12] или 200 раз [19].

Основываясь на данных [3, 11, 13, 16, 18], факторы эксплуатационной надежности асфальтобетонов можно разделить на две группы: внешние и внутренние.

К внешним факторам относятся воздействия окружающей среды трех видов: механические, физико-климатические и химические; к внутренним – показатели качества, определяющие способность асфальтобетона сопротивляться указанным видам внешних воздействий.

Асфальтобетон с углеродсодержащим минеральным порошком является сравнительно новым материалом, и его свойства мало изучены [2, 8, 9].

В проведенных исследованиях циклической усталости асфальтобетона в лабораторных условиях были изучены следующие факторы:

- механические – количество циклов нагружений до разрушения асфальтобетона;
- физико-климатические – водонасыщение асфальтобетона;
- химические – старение после прогрева в течение 5 часов при температуре 150°C;
- внутренние – рецептурный состав асфальтобетона.

Испытания на циклическую усталость при динамическом нагружении проводили на специально сконструированном стенде в лаборатории ФГУП Росдорнии, обеспечивающем приложение нагрузки с частотой 868 мин<sup>-1</sup> в режиме циклического изгиба образцов-балочек размером 2,5×4×16 см при фиксированной амплитуде деформации. Температура испытания была принята 20°C. Величину усталостной долговечности фиксировали по моменту разрушения образца. Амплитуда деформации при испытании составляла 0,0021 (прогиб балочки равнялся 0,35 мм).

#### **Результаты и их обсуждение**

Одним из важнейших свойств асфальтобетона, предопределяющих долговечность (время до разрушения) этого материала, является устойчивость его структуры в условиях изменяющегося влажностного и температурного режима. При водонасыщении адсорбционные слои воды, понижая поверхностную энергию, облегчают образование новых поверхностей в асфальтобетоне при его деформировании (эффект Ребиндера). Расклинивающее действие водных пленок, разъединяющих минеральные зерна и отслаивающих битумные слои, усиливает разрушающий эффект [3, 15].

Исследованиями А.В. Руденского [17] доказано, что механизм ускоренного усталостного разрушения водонасыщенного асфальтобетона при работе покрытия в режиме циклических динамических нагружений обусловлен в определенной степени возникновением импульсных гидродинамических давлений в насыщенных водой порах.

Оценка водостойкости асфальтобетона методом динамических воздействий на водонасыщенные образцы больше соответствует эксплуатационным условиям работы материала в дорожной конструкции, чем известные методы, основанные на статическом действии воды. Поэтому с целью проверки сравнительной усталостной долговечности асфальтобетона испытания проводили на сухих и водонасыщенных образцах. Водонасыщение образцов асфальтобетона составляло 1,65-1,66% по объему. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

**Таблица 1. Величины усталостной долговечности образцов асфальтобетона**

Состав асфальтобетона	Старение (температурное воздействие)	Количество циклов до разрушения	
		сухих	водонасы- щенных
Гранитный отсев – 92%, известняковый минеральный порошок – 8%, битум марки БНД 60/90 – 7,5%	Без прогрева	14756	10416
	После 5 часов прогрева	17707	11488
Гранитный отсев – 92%, углеродсодержащий минеральный порошок – 8%, битум марки БНД 60/90 – 7%	Без прогрева	17757	14322
	После 5 часов прогрева	20092	16297

Анализ результатов, представленных в таблице, позволяет установить следующее.

1. При использовании известнякового минерального порошка без прогрева усталостная долговечность водонасыщенных образцов асфальтобетона снижается на 29,4%, а после прогрева – уже на 35,2%.

2. При использовании углеродсодержащего материала без прогрева усталостная долговечность водонасыщенных образцов асфальтобетона снижается на 19,3%, а после прогрева – на 18,9% (по сравнению с сухими).

3. При прогреве асфальтобетона с известняковым минеральным порошком происходит возрастание усталостной долговечности при испытании в сухом состоянии на 20%, в водонасыщенном состоянии – на 10,3%.

4. При прогреве асфальтобетона с углеродсодержащим материалом происходит возрастание усталостной долговечности при испытании в сухом состоянии на 13%, в водонасыщенном состоянии – на 13,8%.

5. При использовании углеродсодержащего материала взамен известнякового минерального порошка усталостная долговечность асфальтобетона возрастает без прогрева в сухом состоянии – на 20,3%, а в водонасыщенном состоянии – на 13,5%.

6. При использовании углеродсодержащего материала взамен известнякового минерального порошка усталостная долговечность асфальтобетона возрастает после прогрева в сухом состоянии – на 37,5%, а в водонасыщенном состоянии – на 41,9%.

Таким образом, использование углеродсодержащего материала взамен известнякового минерального порошка способствует повышению усталостной долговечности асфальтобетона, особенно в условиях водонасыщения. Это связано, по всей видимости, с высокой адгезионной активностью углеродсодержащего материала.

Повышение усталостной долговечности асфальтобетона с использованием углеродсодержащего материала в результате старения (после прогрева в течение 5 часов) указывает на стабильность свойств при температурных воздействиях. Это связано, по нашему мнению, с миграцией масел из пор, находящихся в углеродсодержащем материале, и омолаживанием битумной пленки при ее старении [10].

В качестве основного критерия, характеризующего прочность дорожной одежды, принят упругий прогиб по оси действия нагрузки или вычисляемый по его величине модуль упругости.

Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки к точке на поверхности конструкции дорожной одежды за весь срок службы определяют по выражению (9) [14]

$$\sum N_p = 0,7 N_p \frac{K_c}{g^{(T_c-1)}} T_{pдг} k_n, \quad (9)$$

где  $N_p$  – приведенная интенсивность на последний год службы, авт./сут.;

$T_{pдг}$  – число расчетных дней в году, соответствующее определенному состоянию деформируемости покрытия конструкции (определяется в соответствии с таблицей 2) [14].

Расчетным считается день, в течение которого сочетание состояния грунта земляного полотна по влажности и температуре асфальтобетонных слоев конструкции обеспечивает возможность накопления остаточной деформации в грунте земляного полотна или малосвязных слоях дорожной одежды.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

**Таблица 2. Рекомендуемые значения  $T_{pde}$  в зависимости от местоположения дороги**

Номера районов	Примерные географические границы районов	Рекомендуемое количество расчетных дней в году ( $T_{pde}$ )
1	Зона распространения вечномёрзлых грунтов севернее семидесятой параллели	70
2	Севернее линии, соединяющей Онегу – Архангельск – Мезень – Нарьян-Мар – шестидесятый меридиан – до побережья Европейской части	145
3	Севернее линии, соединяющей Минск – Смоленск – Калугу – Рязань – Саранск – сорок восьмой меридиан до линии, соединяющей Онегу – Архангельск – Мезень – Нарьян-Мар	125
4	Севернее линии, соединяющей Львов – Киев – Белгород – Воронеж – Саратов – Самару – Оренбург – шестидесятый меридиан до районов 2 и 3	135
5	Севернее линии, соединяющей Ростов-на-Дону – Элисту – Астрахань до линии Львов – Киев – Белгород – Воронеж – Саратов – Самара	145
6	Южнее линии Ростов-на-Дону – Элиста – Астрахань для Европейской части, южнее сорок шестой параллели для остальных территорий	205
7	Западная и Восточная Сибирь, Дальний Восток, ограниченные с севера семидесятой параллелью, с юга – сорок шестой параллелью (кроме Хабаровского и Приморского краев, Камчатской области)	130-150 (меньшие значения для центральной части)
8	Хабаровский и Приморский края, Камчатская область	140

Расчетный срок службы ( $T_{сл}$ , лет), допускается назначать в соответствии с рекомендациями [14] (табл. 3).

**Таблица 3. Рекомендуемый расчетный срок службы конструкции**

Категория дороги	Тип дорожной одежды	Срок службы в дорожно-климатических зонах $T_{сл}$ , лет		
		I, II	III	IV, V
I	Капитальные	14-18	15-19	16-20
II	Капитальные	11-15	12-16	13-16
III	Капитальные	11-15	12-16	13-16
	Облегченные	10-13	11-14	12-15
IV	Капитальные	11-15	12-16	13-16
	Облегченные	8-10	9-11	10-12
V	Капитальные	8-10	9-11	10-12
	Облегченные	3-8	3-9	3-9

Значения коэффициента, учитывающего вероятность отклонения суммарного движения от среднего ожидаемого ( $k_n$ ), приведены в таблице 4 [14].

**Таблица 4. Коэффициент, учитывающий вероятность отклонения суммарного движения от среднего ожидаемого**

Тип дорожной одежды	Значения коэффициента $k_n$ при различных категориях дорог				
	I	II	III	IV	V
Капитальные	1,49	1,49	1,38	1,31	-
Облегченные	-	1,47	1,32	1,26	1,06
Переходный	-	-	1,19	1,16	1,04

В таблице 5 приведены значения коэффициента суммирования ( $K_c$ ) с учетом показателя изменения интенсивности движения данного типа автомобиля ( $g$ ) по годам [14].

Таблица 5. Значение коэффициента суммирования  $K_c$

Показатель изменения интенсивности движения по годам, $g$	Значение $K_c$ при сроке службы дорожной одежды $T_{сл}$ , лет			
	8	10	15	20
0,90	5,7	6,5	7,9	8,8
0,92	6,1	7,1	8,9	10,1
0,94	6,5	7,7	10,0	11,8
0,96	7,0	8,4	11,4	13,9
0,98	7,5	9,1	13,1	16,6
1,00	8,0	10,0	15,0	20,0
1,02	8,6	10,9	17,2	24,4
1,04	9,2	12,0	20,0	29,8
1,06	9,9	13,2	23,2	36,0
1,08	10,6	14,5	27,2	45,8
1,10	11,4	15,9	31,7	67,3

Фактический срок службы дорожной одежды можно определить по (10)

$$T_{\phi} = \frac{N_{ЛАБ} \cdot K}{N_{РАС}}, \quad (10)$$

где  $N_{ЛАБ}$  – лабораторное количество циклов нагружения до разрушения асфальтобетона;

$K$  – коэффициент перехода от лабораторных испытаний асфальтобетона на циклическую усталость к усталостному разрушению асфальтобетона в покрытии, равный 100 [12];

$N_{РАС}$  – суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки к точке на поверхности конструкции дорожной одежды за 1 год службы определяется по формуле (11)

$$N_{РАС} = \sum N_p / T_{сл}. \quad (11)$$

*Расчет долговечности асфальтобетонных покрытий для условий Воронежской области*

Дорога располагается в третьей дорожно-климатической зоне.

Категория автомобильной дороги – 3.

Приведенная к нагрузке типа А интенсивность движения на конец срока службы  $N_p = 900$  авт./сут.; приращение интенсивности = 1,04.

Используя формулу (9), определим суммарное расчетное число приложений нагрузки к точке на поверхности конструкции за весь срок службы:

$$\sum N_p = 0,7 \cdot 900 \frac{1,32}{1,04^{(14-1)}} 145 \cdot 20 = 1452796.$$

Определим суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки к точке на поверхности конструкции дорожной одежды за 1 год службы, используя формулу (11):

$$N_{РАС} = 1452796/14 = 103771.$$

Далее рассчитаем фактический срок службы дорожной одежды. Например, при  $N_{ЛАБ} = 14756$  (табл. 1)

$$T_{\phi} = \frac{14756 \cdot 100}{103771} = 14,3 \text{ года.}$$

Аналогично рассчитаны сроки службы по данным таблицы 1 (табл. 6).

Как видно из данных таблицы 6, прогнозная продолжительность срока службы асфальтобетонных покрытий с углеродсодержащим материалом существенно выше



эталонного покрытия. К тому же следует отметить, что лабораторные испытания на усталость не предусматривают возможности «самозалечивания» дефектов структуры асфальтобетона в период жаркого лета, а это также приведет еще к большей продолжительности срока службы покрытий [10].

**Таблица 6. Прогнозная продолжительность службы асфальтобетонных покрытий по данным лабораторных испытаний**

Состав асфальтобетона в покрытии автомобильной дороги	Старение (температурное воздействие)	Прогнозная продолжительность срока службы, лет	
		сухих	водонасыщенных
Гранитный отсев – 92%, известняковый минеральный порошок – 8%, битум марки БНД 60/90 – 7,5%	Без прогрева	14,3	10,3
	После 5 часов прогрева	17,1	11,1
Гранитный отсев – 92%, углеродсодержащий минеральный порошок – 8%, битум марки БНД 60/90 – 7%	Без прогрева	17,1	13,8
	После 5 часов прогрева	19,4	15,7

### **Выводы**

1. Разработаны теоретические положения образования усталостных трещин в асфальтобетонных покрытиях.
2. Исследована усталостная долговечность асфальтобетона в лабораторных условиях.
3. Установлена прогнозная продолжительность службы асфальтобетонных покрытий с углеродсодержащим материалом, которая в 2-3 раза превышает продолжительность службы эталонного покрытия.

### **Библиографический список**

1. Влияние адсорбции, твердения битума и температуры на свойства асфальтобетонных покрытий // Экспресс-информ. – Москва : ВИНТИ РАСХН. – 1976. – № 1. – С. 8-10.
2. Влияние углеродсодержащего минерального порошка на эксплуатационные свойства песчаного асфальтобетона / В.П. Подольский В.П. [и др.] // Повышение долговечности транспортных сооружений и безопасности дорожного движения : сб. науч. тр. Всерос. науч.-практ. конф. – Казань : КГАСУ, 2008. – С. 26-31.

3. Дорожный асфальтобетон / Под. ред. Л.Б. Гезенцева. – Москва : Транспорт, 1978. – 336 с.
4. Изменение модулей упругости асфальтобетонных покрытий в процессе их службы // Экспресс-информ. – Москва : ВИНТИ РАСХН. – 1975. – № 5. – С. 1-6.
5. Изучение процессов усталости битумоминеральных смесей // Экспресс-информ. – Москва : ВИНТИ РАСХН. – 1977. – № 3. – С. 7-9.
6. Калашникова Г.Н. Усталостные испытания асфальтобетона / Г.Н. Калашникова, А.В. Руденский // Экспресс-информ. – Москва : ЦБНТИ Минавтодора РСФСР. – 1973. – № 11. – С. 3-14.
7. Камруззаман М. Оценка долговременной прочности асфальтобетона при длительном воздействии воды / М. Камруззаман // Управление структурообразованием, структурой и свойствами дорожных бетонов. – Харьков, 1983. – С. 27.
8. Ковалев Н.С. Исследование деформативных свойств асфальтобетона из шлаковых материалов / Н.С. Ковалев // Пути повышения качества и снижения стоимости строительства и эксплуатации дорог на юге РСФСР : межвузовский сб. науч. тр. – Ростов-на-Дону : РИСИ, 1980. – С. 13-21.
9. Ковалев Н.С. Исследование усталостной долговечности асфальтобетона с углеродсодержащим материалом при циклическом динамическом нагружении / Н.С. Ковалев, Я.А. Быкова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2008. – Вып. 12 (31). – С. 62-67.
10. Ковалев Н.С. Научно-практические основы морозостойкости и трещиностойкости асфальтобетонных покрытий из шлаковых материалов : монография / Н.С. Ковалев. – Воронеж : ВГАУ, 2012. – 271 с.
11. Колбановская А.С. Дорожные битумы / А.С. Колбановская, В.В. Михайлов. – Москва : Транспорт, 1973. – 264 с.
12. Основы упрощенного метода расчета битумоминеральных смесей // Экспресс-информ. – Москва : ВИНТИ РАСХН. – 1975. – № 3. – С. 1-16.
13. Повышение надежности автомобильных дорог / Под. ред. И.А. Золотаря. – Москва : Транспорт, 1977. – 183 с.
14. Проектирование нежестких дорожных одежд : ОДН 218.046-01 / Росавтодор Минтранса РФ. – Москва : Информавтодор, 2001. – 145 с.
15. Ребиндер П.А. Научные основы технологии производства строительных материалов / П.А. Ребиндер, Н.В. Михайлов // Вестник АН СССР. – 1961. – № 10. – С. 70-77.
16. Руденский А.В. Анализ работы асфальтобетонных покрытий как конструкций с нестационарными эксплуатационными характеристиками / А.В. Руденский // Труды Гипродорнии. – 1979. – Вып. 27. – С. 66 – 78.
17. Руденский А.В. О закономерностях усталостного разрушения дорожных одежд / А.В. Руденский, Б.Г. Радовский, С.В. Коновалов // Труды Гипродорнии. – 1973. – Вып. 7. – С. 47.
18. Руденский А.В. Опыт строительства дорожных асфальтобетонных покрытий в различных климатических условиях / А.В. Руденский. – Москва : Транспорт, 1983. – 64 с.
19. Усталостная прочность асфальтобетонных смесей // Экспресс-информ. – Москва : ВИНТИ РАСХН. – 1976. – № 41. – С. 7-19.
20. Шейкин А.Е. Строительные материалы : учебник для вузов / А.Е. Шейкин. – Москва : Стройиздат. – 432 с.
21. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids / A.A. Griffith // Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A. – 1921. – Vol. 221. – P. 163-198.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Ковалев Николай Сергеевич – кандидат технических наук, профессор кафедры планировки и кадастра населенных мест, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(473) 264-74-15, E-mail: NSKovalev@mail.ru.

Куликова Елена Владимировна – кандидат биологических наук, доцент кафедры мелиорации, водоснабжения и геодезии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(473) 253-73-90, E-mail: Melior-agronomi@inbox.ru.

Дата поступления в редакцию 04.03.2016

Дата принятия к печати 28.06.2016

### AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Nikolay S. Kovalev – Candidate of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Landscaping Design and Cadastre of Populated Settlements, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8(473) 264-74-15, E-mail: NSKovalev@mail.ru.

Elena V. Kulikova – Candidate of Biological Sciences, Docent, the Dept. of Land Reclamation, Water Supply and Geodesy, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8(473) 253-73-90, E-mail: Melior-agronomi@inbox.ru.

Date of receipt 04.03.2016

Date of admittance 28.06.2016