

УДК 625.73

Л. А. СОСНОВСКИЙ, доктор технических наук, Е. А. ТЕМНИКОВ, Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

### УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ РЕЗИН: МЕТОДЫ И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Силловые взаимодействия асфальтобетона и шины определяют надежность и долговечность обоих элементов. Существует потребность в экспрессных испытаниях системы асфальтобетон / шина с целью определения ее износоусталостных характеристик. Существующие методы не всегда позволяют реализовать данную задачу. В работе изложены разработанные и апробированные ускоренные методы испытания, пригодные для практических целей.

Автомобильные дороги являются неотъемлемой составляющей современных транспортных систем. Силловые взаимодействия асфальтобетона и шины определяют надежность и долговечность обоих элементов.

Еще на стадии создания рецептуры шинной резины возникает потребность в экспрессных испытаниях с целью определения износоусталостных характеристик разрабатываемых смесей. Существующие методы не всегда позволяют реализовать данную задачу.

Ниже изложены разработанные и апробированные ускоренные методы испытания, пригодные для практических целей.

**Разработка методики испытаний при качении.** Разработана и апробирована модель (рисунок 1), которая в первом приближении удовлетворяет установленным требованиям к испытанию шинных резин. Она представляет собой контактную пару типа ролик / ролик, один из элементов которой моделирует шину, а другой – дорогу, например асфальтобетонное покрытие. Пара воспринимает контактную нагрузку  $F_N$  в процессе движения – трения качения. Долговечность оценивают, измеряя путь трения (число циклов контактного нагружения). В ходе испытаний измеряют изменения геометрических размеров, при анализе которых строят зависимости степени износа и повреждаемости от величины контактной нагрузки и времени испытания. Измерение температуры в зоне контакта позволяет проанализировать её влияние на степень износа.

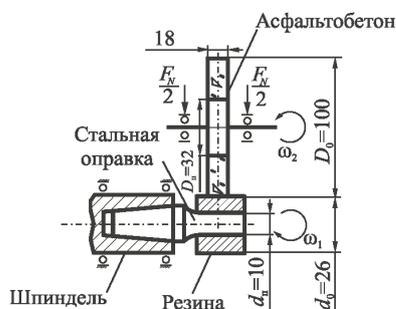


Рисунок 1 – Лабораторная модель асфальтобетон / шина: трение качения

Изготовление образцов из асфальтобетона производилось поперечным нарезанием дисков из кернов асфальто-

бетона диаметром  $D_0 = 100$  мм, толщиной 18 мм, и просверливанием отверстия по центру диаметром  $D_n = 32$  мм для закрепления на оси прижимного устройства (рисунок 2). Резиновый образец диаметром  $d_0 = 26$  мм изготавливается из протектора шины в виде кольцевой втулки, которая насаживается на цилиндрическую стальную оправку диаметром  $d_n = 26$  мм (рисунок 3) [1].

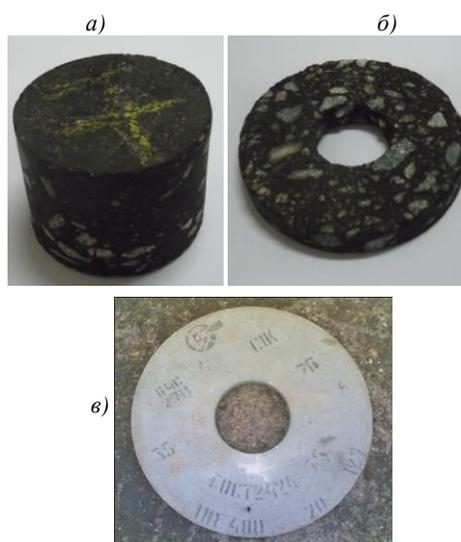


Рисунок 2 – КERN (а), образец из асфальтобетона (б), абразивный круг (в)

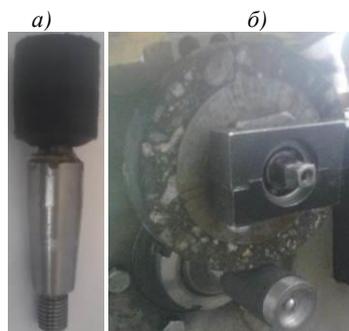


Рисунок 3 – Образец шины (а) и общий вид модели асфальтобетон / шина (б)

Размеры обоих испытуемых элементов указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Размеры элементов системы

В миллиметрах

Элемент системы	Размер образца	
	из асфальтобетона (абразивы)	из шинной резины
Рабочий диаметр	100	26
Внутренний (посадочный) диаметр	32	10
Толщина	34	8
Ширина	18	30

Для реализации ускоренных испытаний организуется многоступенчатое повышение контактной нагрузки при качении (рисунок 4).

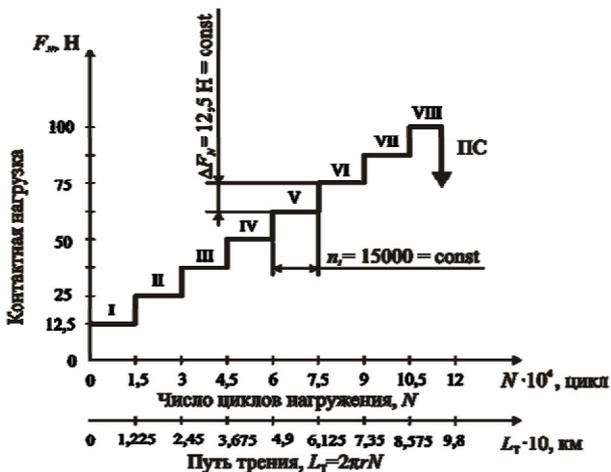


Рисунок 4 – Метод ускоренных испытаний (экспресс-метод)

Ступенчатый процесс нагружения характеризуется двумя параметрами:

- приращением  $\Delta F_N = \text{const}$  контактной нагрузки  $F_N$  на каждой ступени нагружения;
- длительностью  $n_i = \text{const}$  каждой ступени нагружения, характеризуемой числом циклов, путем трения или временем испытаний.

Численные величины этих параметров (см. рисунок 4) устанавливаются экспериментально из тех соображений, чтобы процесс нагружения до достижения предельного состояния содержал не менее 8 ступеней. Это позволяет задать большой диапазон нагрузок.

Длительность каждой ступени должна быть достаточной для того, чтобы прошла стабилизация изнашивания после повышения нагрузки  $\Delta F_N$ .

Начальная нагрузка  $F_N = 12,5$  Н приблизительно соответствует (в пересчете на площадь контакта) давление колеса грузового автомобиля на поверхность дорожного покрытия.

Система испытывается либо до достижения предельного состояния одного из элементов, либо до достижения требуемого – базового числа циклов нагружения  $N_B = \text{const}$ , которое соответствует требуемому пути трения  $L_B$ .

Возможные предельные состояния (ПС) системы:

- термодеструкция образца шинной резины (оплавление резины в зоне контакта вследствие повышения температуры до  $T_{lim}$ );
- критический износ резинового образца (износ  $i_{lim}$ , равный определенному проценту от начального диаметра образца);
- линейные (локальные) повреждения поверхности трения асфальтобетона (выкрашивание);

– общее разрушение (на части) образца асфальтобетона.

Температуру в зоне контакта измеряют бесконтактным способом в процессе испытания при помощи тепловизора (рисунок 5). Измерения вели через каждую минуту (3000 циклов). Данный промежуток обусловлен таким количеством циклов испытаний (временем), которое позволяет не упустить значимые резкие скачки температуры, и при этом отметить возможное изменение (рост, понижение) температуры.

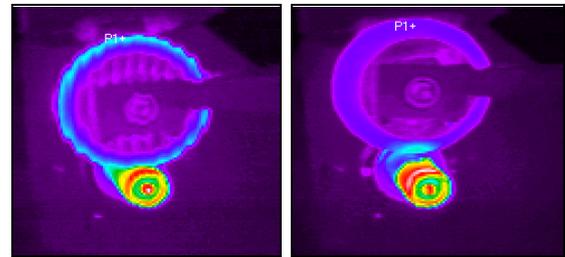


Рисунок 5 – Снимок тепловизора в зоне контакта

В ходе испытаний автоматически измеряли (при помощи датчика линейного перемещения) сближение осей  $\delta_c$  (рисунок 6), по которому вычисляют износ  $i$  резины (рисунок 7), учитывая, что контрообразец из асфальтобетона практически не изнашивается.

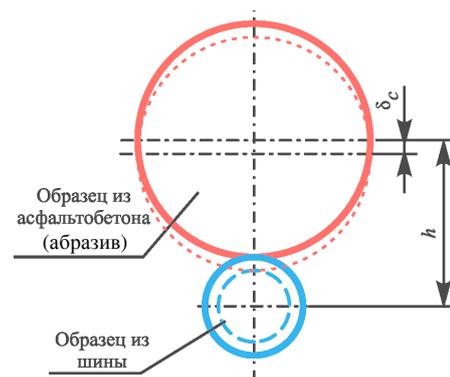


Рисунок 6 – Схема измерения сближения осей  $\delta_c$

Износ образца из резины определяется по формуле

$$i = \frac{d_0 - 2\delta_c}{2} = \frac{d_0 - d}{2},$$

где  $d_0$  – начальный диаметр образца из резины;  $d$  – фактический диаметр образца после испытаний.

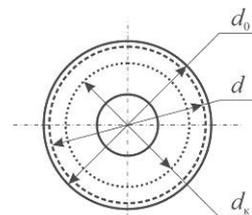


Рисунок 7 – К измерению параметров износа образца из резины ( $d_k$  – критический износ образца)

Разработанная методика испытаний имеет два варианта:

- 1) испытания с имитацией остановок;
- 2) непрерывные испытания.

**Вариант 1: испытания с имитацией остановок.** Особенность этого варианта состоит в том, что он, в какой-то мере, имитирует работу системы асфальтобетон/шина с оста-

новками, что характерно для работы автотранспортных средств. На каждой ступени многоступенчатого повышения контактной нагрузки выполняют необходимые измерения.

В качестве примера реализации варианта 1 провели испытания пары асфальтобетон (см. рисунок 2, б) / шина ИД-304М У-4. Длительность ступени нагружения принята  $n_i = 1,5 \cdot 10^4$  цикл = const, а приращение нагрузки –  $\Delta F_N = 12,5$  Н = const. В конце каждой ступени делали остановку испытаний на 3 мин, в течение которых измеряли изменения геометрических параметров резинового образца (таблица 2).

Таблица 2 – Изменение основных параметров образцов в ходе испытаний

Характеристики	Численные значения							
Число циклов $N \cdot 10^4$	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12
Изменение диаметра $\Delta d$ , мм	0	0,1	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
Износ резины $i$ , мм	0	0,05	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5
Путь трения $L_T$ , км	1,26	2,45	3,68	4,9	6,13	7,35	8,58	9,8
Повреждаемость $\omega$ , %	0	0,4	1,2	1,5	1,9	2,3	3,1	3,8

Как правило, в шинной промышленности устанавливают критическое состояние образца из резины: достижение температуры  $T_{кр} = 80$  °С, после которого изменения в структуре резины становятся необратимыми. Предельное состояние резины оценивают как  $T_{им}$ , соответствующую термодеструкции резины (рисунок 8).

На основании полученных данных построены зависимости изменения диаметра  $d$  и износа  $i$  (рисунок 9), температуры  $T$  (рисунок 10), повреждаемости  $\omega$  (рисунок 11) в зоне контакта в процессе испытания.



Рисунок 8 – Образец резины, достигший термодеструкции

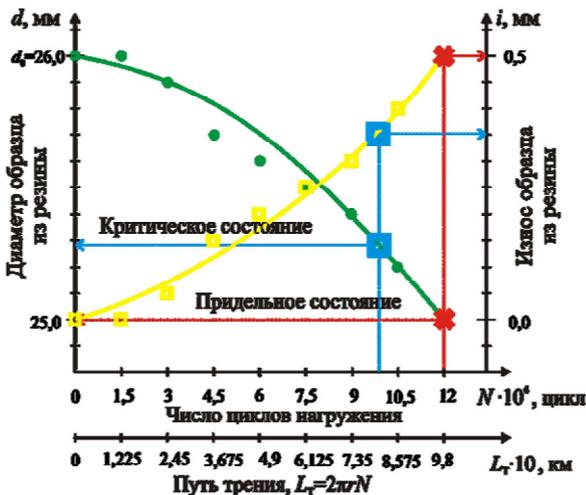


Рисунок 9 – Изменение диаметра образца из резины в процессе ступенчатого нагружения

Основные закономерности таковы: в процессе испытаний диаметр резинового образца уменьшается, а температура в зоне контакта, износ и повреждаемость соответственно растут, достигая в конечном счете предельных значений.

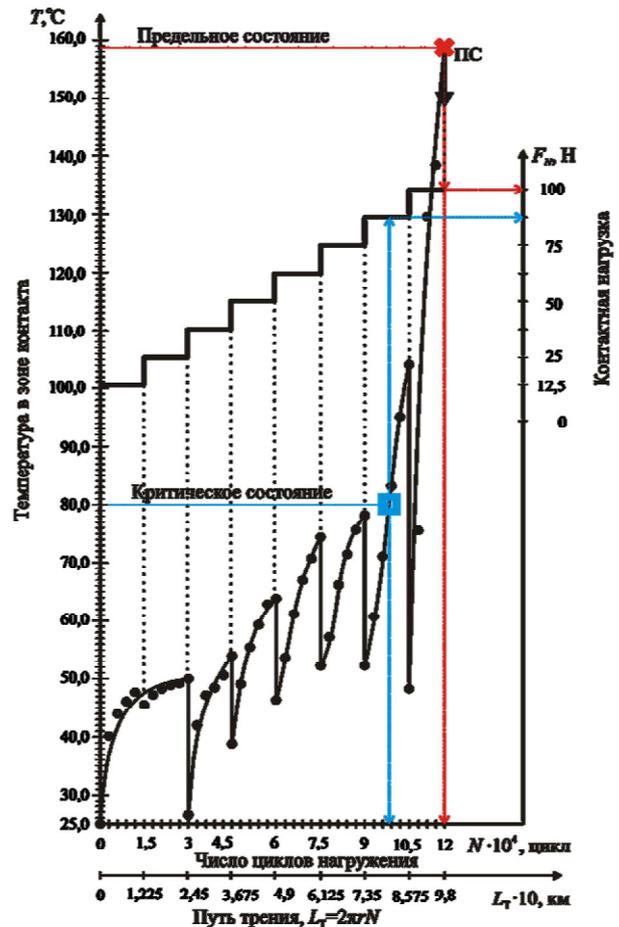


Рисунок 10 – Изменение температуры в зоне контакта при ступенчатом нагружении

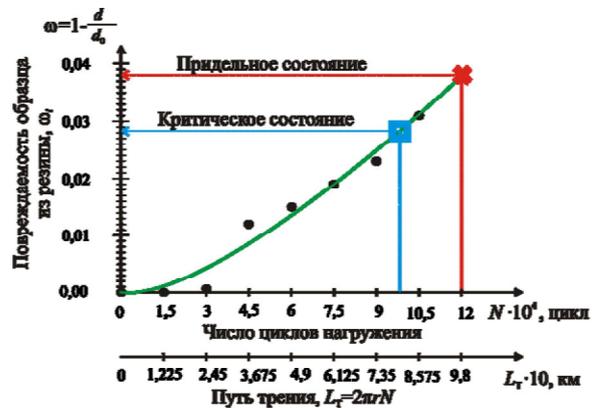


Рисунок 11 – Повреждаемость образца из резины при ступенчатом нагружении

Характеристики определяли по формулам:

– износ (толщина снятого в процессе испытаний слоя резины) –

$$i = \frac{d_0 - d}{2}; \quad (1)$$

– линейная интенсивность изнашивания (линейный износ, приходящийся на единицу длины пути трения) –

$$I_h = \frac{i}{L_T} = \frac{i}{2\pi r N}; \quad (2)$$

– объемная интенсивность изнашивания (объем снятого материала, приходящийся на единицу длины пути трения) –

$$I_V = \frac{V}{L_T} = \frac{V}{2\pi rN}; \quad (3)$$

– массовая интенсивность изнашивания (масса изношенного материала, приходящийся на единицу длины пути трения) –

$$I_m = \frac{m}{L_T} = \frac{m}{2\pi rN}; \quad (4)$$

– повреждаемость –

$$\omega = 1 - \frac{d}{d_0}; \quad (5)$$

– скорость повреждаемости –

$$\vartheta_\omega = \frac{\omega}{L_T} = \frac{\omega}{2\pi rN}. \quad (6)$$

Повреждаемость представляет собой, по существу, относительный (по отношению к первоначальному размеру  $d_0$ ) износ резинового образца. Этот параметр, как и скорость повреждаемости, имеет важное значение в случаях, когда сравнивается износ образцов разных размеров.

В таблице 3 дана сводка всех результатов, полученных при испытаниях пары асфальтобетон / шина ИД-304М У-4, по варианту 1 (см. рисунки 8–11) критические и предельные состояния на этих рисунках отмечены крупными точками.

Таблица 3 – Основные характеристики предельного и критического состояний

Характеристики	Критическое состояние	Предельное состояние
Нагрузка, Н	87,5	100
Температура, °С	80	160
Число циклов, цикл	98700	120000
Путь трения, м	80,57	98
Линейный износ, мм	0,36	0,5
Линейная интенсивность изнашивания, мм/км	0,0044	0,005
Объемная интенсивность изнашивания, мм <sup>3</sup> /км	6,474	7,353
Массовая интенсивность изнашивания, г/мм <sup>3</sup>	0,008	0,009
Повреждаемость, %	2,82	3,8
Скорость повреждения, /км	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$

**Вариант 2: непрерывные испытания.** Испытания по данному варианту аналогичны предыдущим экспериментам, с тем отличием, что в конце каждой ступени контактного нагружения не проводят разгрузки, так что процесс испытаний оказывается непрерывным. Для апробации этого метода была вдвое увеличена начальная нагрузка до  $F_N = 25$  Н и приращение нагрузки  $\Delta F_N = 25$  Н = const, а замер изменений геометрических параметров осуществляли автоматически, при помощи датчика сближения осей. Увеличение нагрузки и ее приращения объясняется желанием сократить время испытаний для достижения высоких нагрузок. Другой особенностью этого метода является то, что в качестве одного из элементов системы используется абразивный круг (см. рисунок 2, в) таких же размеров, как и ролик асфальтобетона (абразива) при испытаниях по варианту 1.

Достоинства такой замены очевидны:

– абразивный круг не разрушается и не выкрашивается в процессе испытаний;

– засаливание абразивного круга легко удаляется наждачной шкуркой при вращении круга;

– резко повышается интенсивность изнашивания резины, так как твердость абразивных частиц круга существенно выше асфальтобетона.

В качестве примера испытаний по варианту 2 представлены результаты для двух пар: абразив / Bridgestone 3А, а также абразив / Бел-162 1815 Бел 3515 (рисунок 12).

Так как истирания (износа) абразивного круга не происходит, то измеряемое сближение осей  $\delta$  равно износу образца из резины [см. формулу (1)].

Результаты испытаний обрабатывали по формулам (1)–(6). Полученные данные сведены в таблицу 4. В условиях данных испытаний предельное состояние не достигалось, испытания вели до базового числа циклов  $N_B = 120000$  цикл.

Таблица 4 – Основные характеристики образцов из резины на базе испытаний  $N_B$

Характеристики	Bridgestone 3А	Бел-162 1818 Бел 3515
Нагрузка, Н	200	200
Температура, °С	72	78
Число циклов, цикл	120000	120000
Путь трения, м	98	98
Линейный износ, мм	1,4	1,4
Линейная интенсивность изнашивания, мм/км	0,014	0,014
Объемная интенсивность изнашивания, мм <sup>3</sup> /км	79,45	79,45
Массовая интенсивность изнашивания, г/мм <sup>3</sup>	8,5	8,5
Повреждаемость, %	5,4	5,4
Скорость повреждения, /км	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$

По результатам испытаний образцов резины построены зависимости изменения диаметра и относительной повреждаемости от количества циклов испытаний (пути трения) (рисунки 13–14).

Изучение экспериментальных данных, представленных на рисунках 12–14 и в таблице 4, позволяет сделать полезные заключения о сравнительной работоспособности изученных материалов автомобильных шин: резина шины Бел-162 1815 Бел 3515 производства ОАО «Белшина» практически не уступает резине шины Bridgestone 3А по всем изученным характеристикам. Можно лишь отметить, что к концу испытания температура белорусской резины была несколько выше иностранного аналога (на 6 °С, т.е. на 5,6 %).

Как видно на рисунке 15, характер повреждения дорожки трения несколько иной, чем на образце белорусской шины: на белорусском аналоге практически отсутствуют дорожка трения и повреждения зоны контакта.

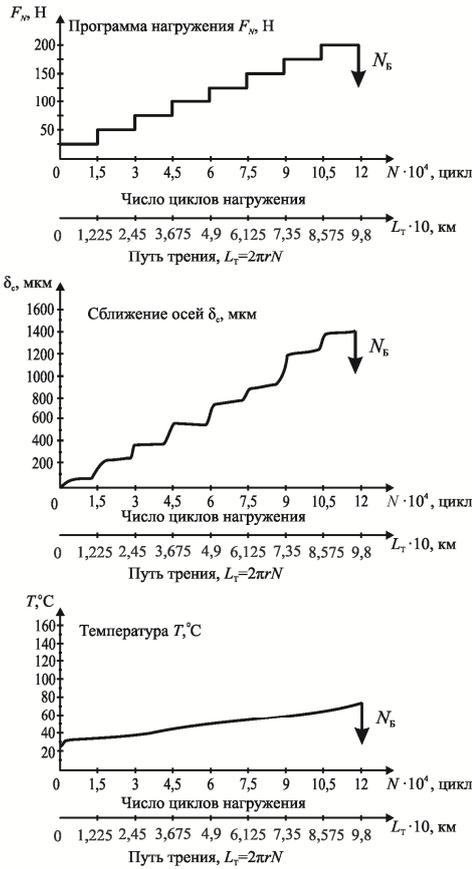
**Разработка методики испытаний при скольжении.** Испытания при скольжении особенно важны для оценки износа и температуры при движении юзом (заторможенное колесо) или в процессе торможения, когда резко возрастает степень проскальзывания при качении.

Во втором случае определяют степень проскальзывания по формуле

$$\lambda = (v_0 - v_K) / v_0, \quad (1)$$

где  $v_0$  и  $v_K$  – линейные скорости рабочих поверхностей образца из резины и асфальтобетона (абразива) соответственно.

а) абразив/Bridgestone 3A



б) абразив/Бел-162 1815 Бел 3515

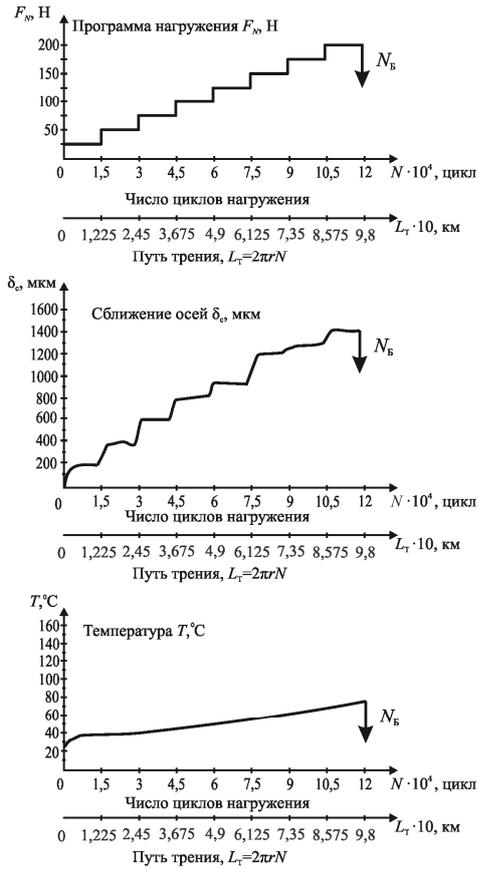


Рисунок 12 – Результаты сравнительных испытаний пар: абразив / Bridgestone 3A (а), абразив / Бел-162 1815 Бел 3515 (б)

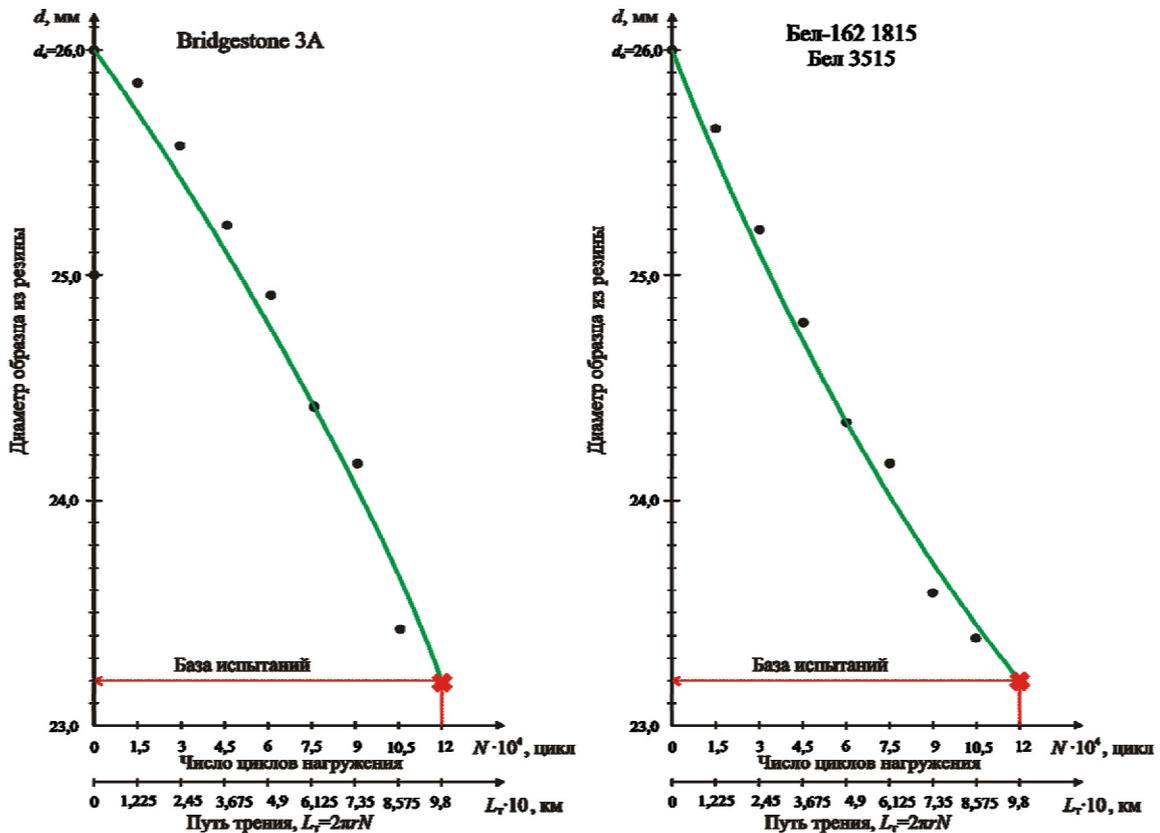


Рисунок 13 – Изменение диаметра образцов из резины в процессе ступенчатого нагружения

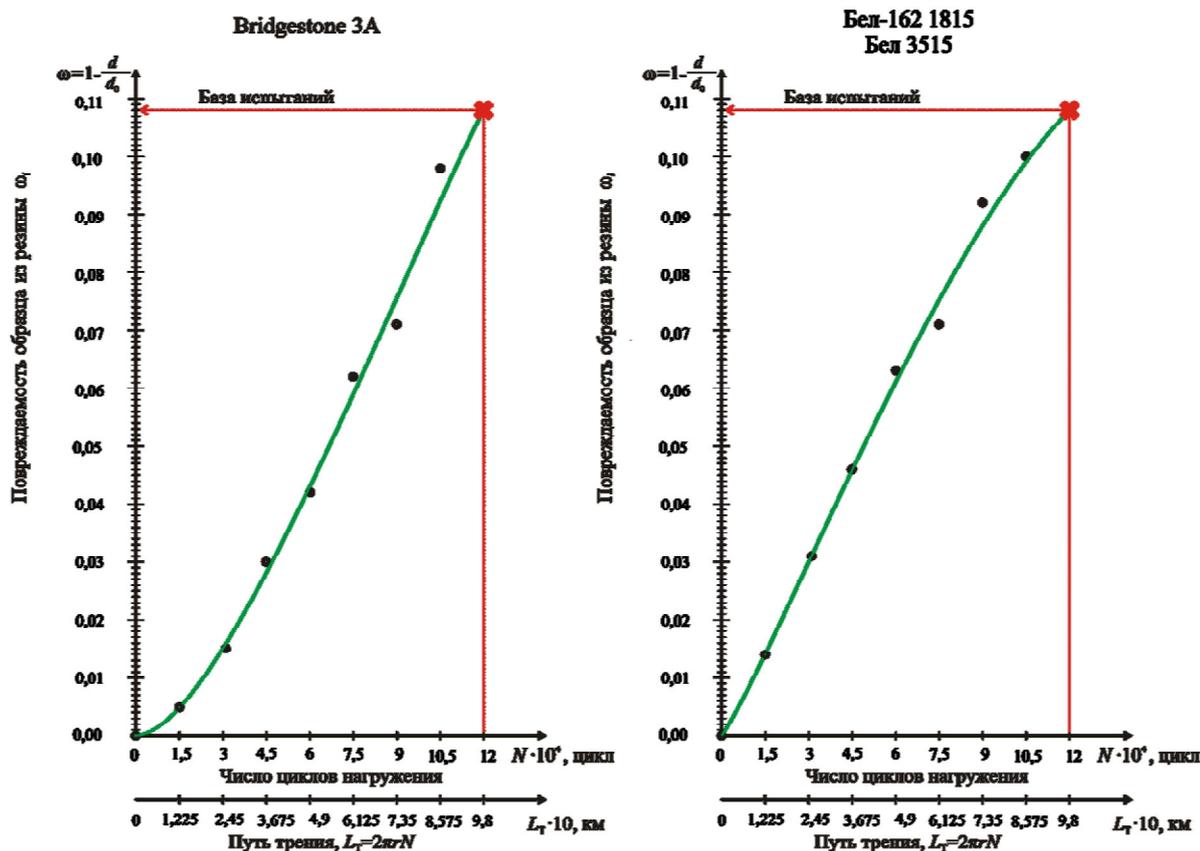


Рисунок 14 – Повреждаемость образцов из резины в процессе ступенчатого нагружения



Рисунок 15 – Фото образцов после испытания:  
а – Bridgestone 3; б – Бел-162 1815 Бел 3515

В соответствии с изложенным, были разработаны и реализованы два метода испытаний:

- 1) испытания при скольжении;
- 2) испытания при качении с проскальзыванием.

Очевидно, что оба варианта имеют свои особенности, достоинства и недостатки.

**Вариант 1: испытания при скольжении.** Испытание шинных резин при скольжении в условиях, близких к эксплуатационным, позволяет оценить работоспособность резины разных рецептур при движении юзом.

Была разработана и апробирована методика испытания при скольжении пары асфальтобетон / шина. Она представляет собой контактную пару типа ролик / частичный вкладыш, один из элементов которой моделирует шину, а другой – дорогу, например асфальтобетонное покрытие (рисунки 16 и 17). Пара воспринимает контактную нагрузку  $F_N$  в процессе движения при трении скольжения. Долговечность оценивают, измеряя путь трения (число циклов контактного нагружения). В ходе испы-

таний измеряют изменения геометрических размеров, при анализе которых строят зависимости степени износа и повреждаемости от величины контактной нагрузки и времени испытания. Измерение температуры в зоне контакта позволяет проанализировать её влияние на степень износа.

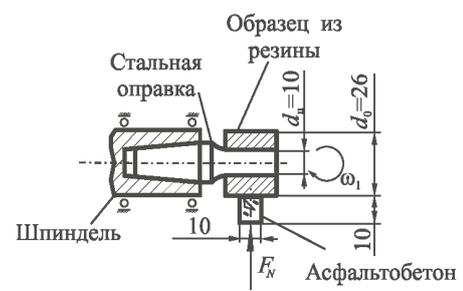


Рисунок 16 – Лабораторная модель асфальтобетон / шина: трение скольжения

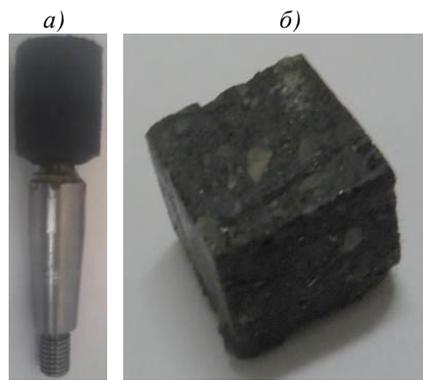


Рисунок 17 – Образец шины (а) и асфальтобетона (б)

Частичный вкладыш из асфальтобетона изготавливали в виде кубовидного образца с высотой грани 10 мм (см. рисунок 17, б). Размеры образца из резины представлены на рисунке 16 и в таблице 1.

Испытания ведут при жесткой фиксации частичного вкладыша из асфальтобетона (рисунки 17, 18) в установке при его контактном взаимодействии с вращающимся образцом из шинной резины. Контактная нагрузка  $F_N$  увеличивается плавно до заданного значения или до достижения парой трения предельного состояния (рисунок 19), который является термомодеструкцией одного из элементов системы. Обычно первым критической температуры достигает образец из резины.

В качестве примера реализации данного метода приведены испытания пары асфальтобетон / шина ИД-304М У-4 (см. рисунок 18). На основании полученных данных построены зависимости износа (рисунок 20), температуры  $T$  (рисунок 21) и повреждаемости  $\omega$  (рисунок 22) в зоне контакта в процессе испытания.



Рисунок 18 – Общий вид установки

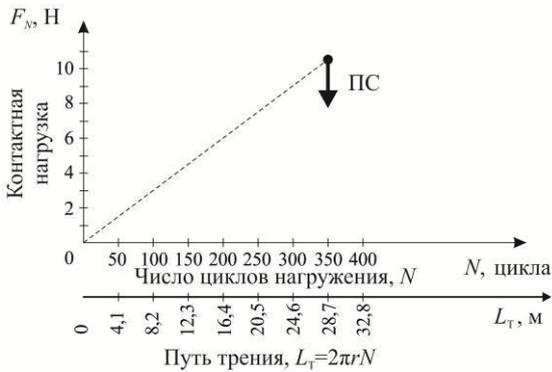


Рисунок 19 – Схема нагружения при трении скольжении

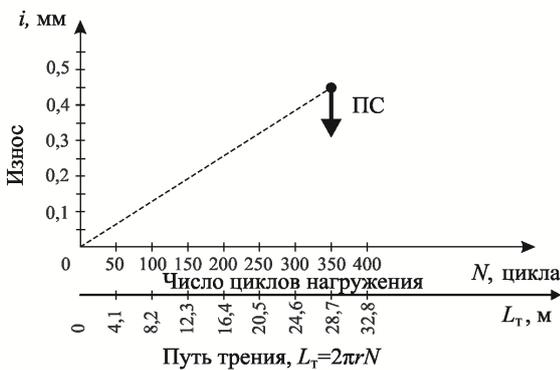


Рисунок 20 – Износ образца из резины при скольжении

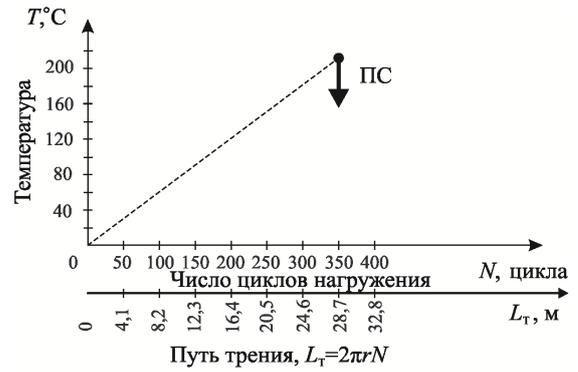


Рисунок 21 – Изменение температуры пары трения в зоне контакта при термной скольжении

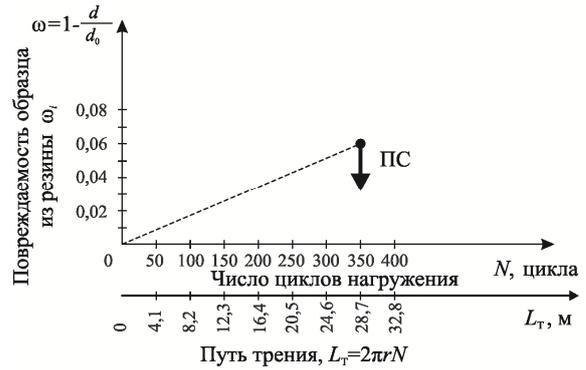


Рисунок 22 – Повреждаемость пары трения при скольжении

По результатам эксперимента определены основные характеристики работоспособности резины при трении (таблица 5).

Таблица 5 – Основные характеристики для предельного состояния

Характеристики	Предельное состояние
Нагрузка, Н	10
Температура, °C	200
Число циклов, цикл	350
Путь трения, м	32,8
Линейный износ, мм	0,45
Линейная интенсивность изнашивания, мм/км	0,0012
Объемная интенсивность изнашивания, мм <sup>3</sup> /км	1,3
Массовая интенсивность изнашивания, г/мм <sup>3</sup>	0,0012
Повреждаемость, %	6
Скорость повреждения, 1/км	0,17

В данном случае предельное состояние наступило при  $F_{lim} = 10$  Н, при этом путь трения составил  $L_{lim} = 28,7$  м, износ  $i_{lim} = 0,45$  мм, температура  $T_{lim} = 200$  мм, степень повреждаемости  $\omega_{lim} = 6$  %.

Нетрудно видеть, что имеется практически важная возможность оценить работоспособность резины в процессе скольжения по многим и разным характеристикам.

**Вариант 2: испытания при качении с проскальзыванием.** Ускоренные испытания при качении с заданным относительным проскальзыванием заключаются в поддержании контактной нагрузки постоянной, например  $F_N = 25$  Н = const, на протяжении требуемого базового числа циклов нагружения, например  $N_b = 9 \cdot 10^5$  цикл = const

(рисунок 23). Система может быть испытана и до достижения предельного состояния.

В качестве примера на рисунке 24 приведены результаты испытания шины Bridgestone 3A при степени проскальзывания 10 %.

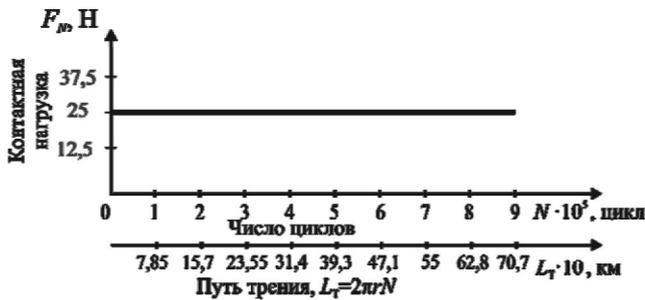


Рисунок 23 – Контактная нагрузка в процессе испытания

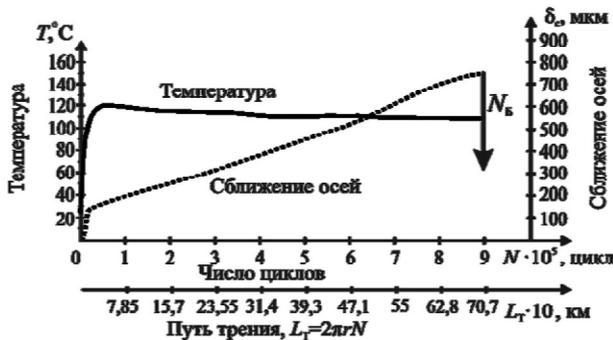


Рисунок 24 – Сближение осей и изменение температуры в процессе испытания

По результатам испытания определяют следующие основные характеристики работоспособности резины:

- износ  $i_n$  за установленное время испытаний, а также скорость повреждения (изнашивания)  $\omega_n$ ;
- критический износ  $i_{кр}$  и/или предельный износ  $i_{lim}$ ;

Получено 16.04.2016

**L. A. Sosnovskiy, E. A. Temnikov.** Accelerated testing tires: methods and some results.

Power interaction of asphalt concrete and tires determine the reliability and durability of both elements. There is a need of express testing asphalt system / tire to determine its wear-fatigue characteristics. Existing methods do not always allow you to implement this task. The paper presents developed and tested accelerated test methods suitable for practical purposes.

- критическую  $T_{кр}$  и/или предельную температуру (деструкции) резины  $T_{lim}$ ;
  - критическую  $F_{кр}$  и/или предельную контактную нагрузку  $F_{lim}$ ;
  - долговечность (путь трения  $L_T$ ) и/или число циклов  $n$  нагружения до достижения критического или предельного состояний;
  - упругие свойства резин.
- Данный метод испытаний имеет несколько модификаций, например:
- испытания при постоянной во времени контактной нагрузке  $F_N = const$ ;
  - испытания с варьируемой степенью проскальзывания  $\lambda$  в процессе трения (движения);
  - испытания с периодическими разгрузками («отдыхом»);
  - испытания, когда в качестве контробразца (имитирующего дорогу) применяется абразивный круг.

### Список литературы

- 1 Темников, Е. А. Методика и некоторые результаты испытаний модели системы «асфальтобетон – шина» / Е. А. Темников // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. – Вып. 2. – Минск : ОИМ НАНБ, 2013. – С. 270–272.
- 2 Резниковский, М. М. Механические испытания каучука и резины / М. М. Резниковский, А. И. Лукомская. – М. : Химия, 1964. – 528 с.
- 3 Сосновский Л. А. Механика трибофатических систем / С. С. Щербаков, Л. А. Сосновский. – Минск : БГУ, 2011. – 407 с.
- 4 Степнов, М. Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний : справ. / М. Н. Степнов. – М. : Машиностроение, 1984. – 231 с.
- 5 Трощенко, В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов : справ. : в 2 т. / В. Т. Трощенко, Л. А. Сосновский. – Киев : Наукова думка, 1987. – Т. 1. – 510 с.; Т. 2. – 825 с.