

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНОСА И ПРОБЕГА ШИН СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

**Шермухамедов Абдулазиз Адилхакович**

Ташкентский государственный транспортный университет

[sheraziz@mail.ru](mailto:sheraziz@mail.ru)

**Холдаров Фидокор Эркинбой ўғли**

Академия МВД Республики Узбекистан

[fidokor0504@gmail.com](mailto:fidokor0504@gmail.com)

***Аннотация:** В статье рассматриваются характеристики шин, их конструкция, давление воздуха в них, нагрузка на колесо, механические свойства протекторной резины, общие методы определения интенсивности износа и пробега шин специализированных транспортных средств.*

***Ключевые слова:** протектор, шина, деформация, напряжение, грунт, ресурс, норма, интенсивность, изнашивания, скорость процесса изнашивания, интенсивность изнашивания, профиллограмм, Фрикционные характеристики, площади контакта, крутящему момент, коэффициенты сцепления, износ, резина.*

Для определения ресурса шин расчетным методом используется прогнозирование работоспособности шин в определенный момент времени. Так как единственным постепенным отказом шин является износ протектора, чаще всего именно этот параметр применяют для установления нормы эксплуатационного пробега.

Среди ученых сложилось представление о наличии трех видов износа шин [1, 2]: усталостный, посредством скатывания, абразивный.

Усталостный - это основной вид износа, при этом на поверхности беговой дорожки не образуются видимых следов истирания, разрушение же происходит при многократных деформациях выступами истиравшей поверхности.

Износ посредством скатывания наблюдается при высоких температурах и у мягких резин. При повышении температуры в зоне контакта резина размягчается, прилипает к поверхности дороги и скатывается в небольшие жгуты.

При эксплуатации шин на дорогах со щебёночным покрытием наблюдается абразивный износ. Внешнее проявление данного вида - царапины, надрывы, срезы и т.п.

В реальной эксплуатации износ происходит по смешанному механизму, при этом соотношение различных видов и суммарная интенсивность меняются в зависимости от внешних условий [1].

Интенсивность изнашивания - скорость процесса изнашивания.

Мгновенная интенсивность изнашивания при малом изменении наработки и средняя интенсивность изнашивания в определенном интервале наработки рассчитываются по известным формулам [3].

В работах [1,4] предложены зависимости для определения интенсивности усталостного изнашивания шин при действии на колесо касательных нагрузок любого направления, в работе [5] от температуры и нагрузки на шину, в работе [6] от условия переменного рельефа местности.

В работе [7] авторами предлагается определять интенсивность изнашивания шины на основе установленных для эталонных шин зависимости износостойкости протектора от того или иного эксплуатационного параметра. Используя принцип суперпозиции о независимости влияния отдельных эксплуатационных параметров на изнашивание шины, предложено уравнение интенсивности изнашивания шины при заданных величинах нагрузки, внутреннего давления, крутящего или тормозного момента, угла увода, скорости качения, высоты выступов рисунка протектора.

На основе анализа существующей литературы нами предлагается следующая методика расчета интенсивности износа шин СТС.

1. Определение среднего конурного давления контакта шины с опорной поверхностью.

Под действием приложенных внешних и внутренних сил и моментов происходит деформация шины.

Реальная нагрузка приводит к прогибу шины и возникновению площади контакта шины с дорогой – контурной площади контакта.

Величина прогиба  $h=r_0 - r_d$ , где  $r_0$  – радиус колеса, соответствующий радиусу беговой дорожки колеса, свободного от внешней нагрузки.

При небольших величинах  $h$  контурная площадь контакта имеет форму эллипса [2], при больших она близка к прямоугольнику.

Величину прогиба определяют из уравнения [8]

$$h^2 - \alpha_2 \frac{hG_k}{p_w + p_0} - \alpha_1 G_k = 0, \quad (1)$$

где  $p_w$  – внутреннее давление воздуха в шине;  $p_0$  – характеристика собственной жесткости оболочки шины;  $\alpha$  – постоянная величина (для шин грузовых автомобилей  $\alpha_1 \approx 0,0022$  см<sup>2</sup>/кгс, для легковых  $\alpha_1 = 0,0037$  см<sup>2</sup>/кгс);  $\alpha_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{r_0 r_n}}$ ;

здесь  $r_n$  – радиус поперечной кривизны протектора.

При движении автомобиля эпюра напряжений в продольном сечении изменяется, принимая вид трапеции, верхнее основание которой несколько наклонено к нижнему.

Под действием крутящего и тормозного моментов, приложенных к колесу, эпюра нормальных напряжений на контакте изменяется. Однако это изменение, согласно работе [9], незначительно. Поэтому для оценки коэффициента сцепления обычно пользуются средними напряжениями на контакте. Эти напряжения зависят от конструкции шины и давления воздуха в ней. Они могут превышать давление воздуха в шине  $p_w$ , быть равным ему и ниже его [9].

Различают средние нормальные напряжения на контакте (средние давления):

$$p_{cp} = \frac{G_k}{F_0},$$

где  $F_0$  – общая площадь контакта под нагрузкой  $G_k$ ,

и средние действительные напряжения (контурное давление) на контакте;

$$p_c = \frac{G_k}{A_c},$$

где  $A_c$  – площадь контакта шины с дорогой с учетом рисунка протектора.

Форма площади контакта шины с дорогой приближается к прямоугольнику шириной, равной ширине протектора  $B_{\Pi}$ , и длиной

$$l = 2\sqrt{2Rh - h_2} \approx 2\sqrt{2r_0 h},$$

умноженной на коэффициент насыщенности рисунка протектора  $k'$ . Из уравнения (1) следует, что

$$h \approx \frac{\alpha_2 G_k}{2p_w} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_2 G_k}{2p_w}\right)^2 - \alpha_1 G_k}.$$

Следовательно, контурная площадь контакта и среднее контурное давление будут

$$A_c = k'B_n l = 2k'B_n \left\{ r_0 \left[ \frac{\alpha_2 G_k + (\alpha_2^2 G_k^2 - 4\alpha_1 p_w^2 G_k)^{1/2}}{p_w} \right] \right\}^{1/2}; \quad (2)$$

$$p_c = \frac{p_w^{1/2} G_k^{1/2}}{2k'B_n r_0^{1/2} \alpha_2^{1/2} \left[ 1 + \left( 1 - \frac{4\alpha_1 p_w^2}{\alpha_2^2 G_k} \right)^{1/2} \right]^{1/2}}. \quad (3)$$

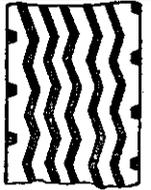
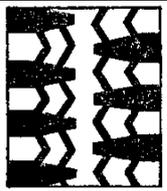
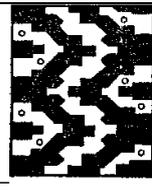
В статике при взаимодействии шины с твердым дорожным покрытием нормальные напряжения на контакте (контурные давления) будут [2; с.86]:

$$p_c = \frac{1}{k'} \left[ p_w \left( 1 - 2 \frac{r'}{B_n} \cos m \alpha \cos \beta \right) + q_u \right],$$

где  $k'$  — коэффициент насыщенности рисунка протектора (табл. 1);  $r'$  — радиус деформированной нити кордного слоя;  $B_n$  — ширина протектора;  $\alpha$  — угол наклона кордной нити к протектору;  $m > 1$  — коэффициент, учитывающий изгибную жесткость резины боковин;  $\beta$  — угол наклона нити кордного слоя к радиусу;  $q_u$  — напряжения на контакте, возникающие от изгиба оболочки шины.

Таблица 1.

Типы рисунков протектора легковых и грузовых автомобилей

Легковой	Грузовой	Коэффициент насыщенности рисунка протектора, %	Применение
Дорожный		65-80	Для дорог с усовершенствованием. обеспечивает хорошие сцепление и устойчивость в продольном и боковом направлениях.
			
Универсальный		55-60	Для дорог с различным твердым покрытием
			
Повышенной проходимости		40-50	В условиях бездорожья и труднопроходимых грунтовых дорог *
			
Зимний		55-60	На скользких и обледенелых дорогах
			
* Применение на дорогах с твердым покрытием сокращает срок их службы и ухудшает устойчивость автомобиля.			

Таким образом, средние контурные давления, как и контурная площадь контакта, будут зависеть от нагрузки на колесо, конструктивных параметров шины (радиуса колеса, ширины и радиуса кривизны протектора, его рисунка, коэффициента  $\alpha_1$ ) и давления воздуха в шине  $p_w$ . По данным НАМИ [2] средние контурные давления у шин грузовых автомобилей при номинальных нагрузках на колесо могут быть ниже, чем давление воздуха в шинах. Соотношение между средним контурным давлением и давлением воздуха в шине будет зависеть от последнего и от нагрузки на колесо. Уменьшение давления в шине и увеличение нагрузки приводит к превышению средних контурных давлений над давлением воздуха в шине. Зависимость среднего давления на контакте (т. е. давления, рассчитанного без учета рисунка протектора) от давления при нормальной нагрузке на колесо для шин различных марок по данным работы [2]. Следует, что среднее давление, как правило, меньше давления воздуха в шине. Однако контурные давления будут превышать средние давления в  $1/k'$  раз, где  $k' < 1$  — коэффициент насыщенности рисунка протектора.

Важное значение, особенно при расчете износа, имеют действующие на контакте касательные напряжения. Эти напряжения обусловлены деформацией шины под действием радиальной нагрузки, передаваемых с помощью шины тормозного и крутящего моментов, боковой силы и сил сопротивления качению, а также сил, вызываемых различными угловыми скоростями элемента шины при качении в зоне контакта и вне ее.

Как и нормальные напряжения, касательные напряжения обычно рассматривают в двух взаимно перпендикулярных сечениях площади контакта — продольном и поперечном. Под касательными напряжениями подразумевают напряжения, действующие на контурной площади контакта, т.е. на вершинах рисунка протектора в контактной зоне.

В продольном сечении контакта касательные напряжения

$$\tau_{np} = \tau_d + \tau_c + \tau_y \pm \Delta \tau_{np}.$$

Эти напряжения возникают в продольном сечении в результате деформации шины  $\tau_d$ ; сопротивления качению  $\tau_c$  на площади контакта и вне ее  $\tau_y$ ; передаваемого крутящего или тормозящего момента  $\Delta \tau_{np}$  (знак «плюс» относится к крутящему моменту, «минус» — к тормозному).

Касательные напряжения, обусловленные силой сопротивления качению при скоростях  $\sim 80$  км/ч, составляют 2—3% от общих касательных напряжений [8]. В дальнейшем эту составляющую касательных напряжений не учитывают.

Величины касательных напряжений  $\tau_d$  и  $\tau_y$  на произвольной элементарной площадке продольного сечения могут быть определены из следующих приближенных выражений:

$$\tau_d = A \left[ \arcsin \left( \cos \frac{\varphi_k}{2} \operatorname{tg} \varphi_n \right) - \varphi_n \right]; \quad \tau_y = 0,5 A \left( \frac{\varphi_n}{\varphi_k} \sin \varphi_k - 0,5 \sin \varphi_n \right),$$

где  $A$  — коэффициент, зависящий от тангенциальной жесткости шины (кгс/см<sup>2</sup>);  $\varphi_k$  — контактный угол шины;  $\varphi_n$  — текущее значение контактного угла.

Величина дополнительных касательных напряжений, возникающих от крутящего или тормозного моментов,

$$\Delta \tau_{np} = \frac{T_m}{A_c} \left( 1 - \frac{2\varphi_n}{\varphi_k} \right),$$

где  $T_m$  — тяговая или тормозная сила. Величина и закономерность распределения результирующих касательных напряжений в поперечном сечении шины зависят от ее конструкции, давления воздуха в ней, радиальной нагрузки, удельных сил сцепления с дорогой. Эти напряжения вызывают местное скольжение элементов протектора относительно поверхности дороги.

Взаимодействие шины с поверхностью дороги обуславливается процессами, протекающими в зонах контакта дорога — шина. Это взаимодействие будет зависеть от распределения материала в поверхностном слое дороги и характеризуется числом неровностей на единице площади, их геометрическим очертанием и распределением по высоте.

Анализ профиллограмм показывает, что микронеровности поверхности имеют приблизительно форму сферических сегментов, расположенных на некотором основании и распределенных по высоте. Поэтому для оценки взаимодействия их с резиной протектора используют сферическую модель микронеровностей. Параметры шероховатости для некоторых видов покрытий дорог приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Характеристика микрогеометрии дорожных покрытий

Покрытие	$R_{\max}$ , мм	$r$ , мм	$b$	$\nu$	$\Delta$
Асфальт	0,26	0,12	3,5	3,8	1,560
Бетон новый	0,31	0,30	2,0	4,4	0,885
Бетон после кратковременной эксплуатации	0,43	0,20	5,0	3,9	1,420
Бетон после длительной эксплуатации	0,24	0,15	3,8	2,7	0,980

Распределение материала в поверхностном слое дороге задается кривой опорной поверхности, начальная часть которой имеет вид

$$t_p = b\varepsilon^v.$$

в зонах контакта дорожного покрытия с поверхностью протектора при контурных давлениях

$$p_{c_n} = \frac{8 \cdot 10^{-2} \Delta^{\frac{1}{2}}}{\Theta(b^{3/2+1} v)^{\frac{2v+1}{2(v-1)}}} \quad (4)$$

имеет место насыщение контакта.

Учитывая, что для типичных дорожных покрытий  $b \approx 3,0$ ;  $v \approx 3$ ;  $\Delta \approx 1,2$ ; модуль упругости резины протектора изменяется в пределах  $E = 30 \div 40$  кгс/см<sup>2</sup> и  $\mu = 0,5$ , получим  $p_{c_n} = 0,9 \div 1,4$  кгс/см<sup>2</sup>.

## 2. Определение силы сцепления шины с опорной поверхностью.

При определении силы сцепления полагаем, что поверхность выступов протектора шины эластичная и гладкая, поверхность дороги жесткая и шероховатая. Вследствие различия в механических характеристиках материалов дорожного покрытия и шины в зонах фактического контакта будет происходить внедрение микронеровностей поверхности дороги в поверхность протектора шины.

В общем случае сила сцепления (сила трения покоя) будет равна сумме двух составляющих. Одна из них обусловлена межмолекулярным взаимодействием на границе раздела шина — дорога в зонах фактического контакта — молекулярная составляющая силы трения  $T_m$ . Другая обусловлена гистерезисными потерями, возникающими при деформировании поверхностного слоя протектора в зоне контакта внедренными в него выступами поверхности дорожного покрытия  $T_d$ .

Таким образом, на единичной неровности  $T = T_m + T_d$ .

Молекулярная составляющая силы трения

$$T_{m_i} = (\tau_0 + \beta p_r) A_{r_i} = (\tau_0 + \beta p_r) \pi r h_i.$$

Фрикционные характеристики  $\tau_0$  и  $\beta$  зависят от состояния поверхности дороги (загрязненности, влажности и т. д.).

Деформационная составляющая силы трения для неровности сферического очертания

$$T_{d_i} = \frac{0,25 \alpha_{\phi} h_i^2}{\Theta},$$

где  $\alpha_{\text{эф}}$  — коэффициент гистерезисных потерь при сложном напряженном состоянии;  $\alpha_{\text{эф}} = 2,5\alpha$  (здесь  $\alpha$  — коэффициент гистерезисных потерь при растяжении-сжатии).

В приведенные выше две формулы входят величины  $h_i$  и  $p_r$ , т.е. для определения силы трения, возникающей на единичной неровности, необходимо знать закономерности деформирования резины, внедряющейся шаровым индентором. По данным Е. Ф. Непомнящего, для описания внедрения шарового индентора в резину до  $\frac{h}{r} = 1,6$  применимо классическое решение Герца.

Общая сила трения протектора с дорогой

$$T = \sum_{i=1}^{n_r} T_i \Delta n_r,$$

где  $\Delta n_r$  — число выступов, имеющих одинаковую величину внедрения в произвольном сечении.

При вычислении силы сцепления взаимным влиянием отдельных неровностей можно пренебречь.

В случае насыщенного контакта сила трения покоя согласно работам будет

$$T = \frac{0,125\alpha_{\text{эф}} A_c \varepsilon_{\text{кр}}^{v-1} b R_{\text{max}} \xi^2}{\pi v \Theta} + \left( \tau_0 + \frac{0,42\beta R_{\text{max}}^{1/2}}{r^{1/2} v^{1/2} \Theta} \xi \right)^{1/2} \frac{A_c}{2v} \xi, \quad (5)$$

где  $\xi = v\varepsilon - (v-1)\varepsilon_{\text{кр}}$ .

Величина  $\xi$  зависит от контурного давления

$$\xi = \frac{0,42\beta R_{\text{max}}^{1/2}}{b^{1/3v} \Delta^{1/3}} (p_c \Theta)^{2/3} \quad (6)$$

Учитывая зависимость (6), удельная сила трения (сцепления) будет

$$\tau_m = \frac{T}{A_c} = \frac{\alpha_{\text{эф}} \Delta^{1/3} p_c^{4/3} \Theta^{1/3}}{\pi b^{3v}} + \left[ \tau_0 + \frac{0,71\beta \Delta^{1/3} b^{1/3v} p_c^{1/3}}{\Theta^{2/3}} \right] \frac{1,45 p_c^{2/3} \Theta^{2/3}}{\Delta^{1/3} b^{1/3v}}. \quad (7)$$

Для наиболее типичных видов дорожных покрытий при  $b=3,0$ ,  $v=3$ , для резины  $\mu = 0,5$  получим

$$\tau = \frac{0,13\alpha_{\text{эф}} \Delta^{1/3} p_c^{4/3}}{E^{1/3}} + \left[ \tau_0 + \beta \Delta^{1/3} E^{2/3} p_c^{1/3} \right] \frac{p_c^{2/3}}{E^{2/3} \Delta^{1/3}}. \quad (8)$$

Из формул (3) и (7) следует, что удельная сила сцепления (удельная сила трения покоя) зависит как от характеристик шины, от их конструкции ( $B_{\text{п}}$ ,  $r_0$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_1$ ,  $k$ ), давления воздуха в ней ( $p_w$ ) и нагрузки на колесо ( $G_{\text{к}}$ ), механических характеристик резины протектора ( $\mu$ ,  $E$ ,  $\alpha_{\text{эф}}$ ), так и от микротопографии поверхности дороги ( $b$ ,  $v$ ,  $\Delta$ ), состояния (загрязненности) ее поверхности ( $\tau_0$ ,  $\beta$ ).

### 3. Определение коэффициента сцепления (трения покоя) пневматической шины с поверхностью дорожного покрытия.

Коэффициент сцепления  $\psi$  — отношение неполной силы трения покоя к нормальной составляющей внешних сил, действующих на поверхности тела или отношение максимальной реакции  $T_{\max}$  в зоне контакта к нормальной реакции  $N$ , действующей на колесо:

$$\psi = \frac{T_{\max}}{N} = \frac{M_{\psi}}{r_d N},$$

где  $M_{\psi}$  — момент по сцеплению колеса с дорогой;  $r$  — динамический радиус (расстояние от оси колеса до горизонтальной плоскости, проходящей через равнодействующую касательных реакций в зоне контакта).

Для вычисления коэффициента сцепления необходимо знать силу трения покоя между шиной и дорогой, а также нагрузку на шину. В данном случае сила трения покоя зависит, от характеристик шероховатости и волнистости поверхности дороги, ее состояния (тип покрытия, загрязненность, влажность и т. п.), физико-механических характеристик материала протектора (модуль упругости, коэффициент гистерезисных потерь в резине) и его рисунка, а также от конструкции шины.

Рисунок протектора играет чрезвычайно важную роль в работе автомобильной шины. Его главное назначение — удалять влагу из зоны фактического контакта шашек протектора и дорожного покрытия и тем самым увеличивать молекулярную составляющую силы сцепления колеса с дорогой.

Все эти факторы влияют на фактическое давление в зонах микроконтактов, которое является функцией контурного давления.

Анализ взаимодействия шины с дорогой показывает, что максимальный коэффициент сцепления в основном зависит от типа дорожного покрытия, конструкции шины, давления в ней, материала протектора и его рисунка, а также от скорости движения экипажа. Коэффициенты сцепления автомобильных шин в зависимости от типа и состояния дорожного покрытия приведены в табл. 3 [2].

Таблица 3

Коэффициенты сцепления шин в зависимости от типа  
состояния дорожного покрытия

Дорожное покрытие		Коэффициент сцепления для шин		
Наименование	Состояние	Высокого давления	Низкого давления	Высокой проходимости
Асфальтобетонное	Сухое	0,50-0,70	0,70-0,80	0,70-0,80
	Мокрое	0,35-0,45	0,45-0,55	0,50-0,60
Булыжное	Покрытое грязью	0,25-0,45	0,25-0,40	0,25-0,45
	Сухое	0,40-0,50	0,50-0,55	0,60-0,70
Щебеночное	Сухое	0,50-0,70	0,60-0,70	0,60-0,70
	Мокрое	0,30-0,40	0,40-0,50	0,40-0,55
Деревянные торцы	Сухие			
	Мокрые			
Грунтовая дорога	Сухая			
	Увлажненная дождем			
	В период распутицы			
Целина летом: песок суглинок	Сухой	0,20-0,30	0,22-0,40	0,20-0,30
	Влажный	0,35-0,40	0,40-0,50	0,40-0,50
	Сухой	0,40-0,50	0,45-0,55	0,40-0,50
	Увлажненный до пластического состояния	0,20-0,40	0,25-0,40	0,30-0,45
	Увлажненный до текучего состояния	0,15-0,20	0,15-0,25	0,15-0,25
Целина зимой: снег	Рыхлый	0,20-0,30	0,20-0,40	0,20-0,40
	Укатанный (укатанная дорога)	0,15-0,20	0,20-0,25	0,30-0,50
Обледенелая дорога и гладкий лед	Температура воздуха ниже 0°С	0,08-0,15	0,10-0,20	0,05-0,10

Коэффициент сцепления, равный коэффициенту внешнего трения покоя при  $G_k = N_3$ .

$$\psi = \frac{T}{N} = \frac{\tau}{p_c} = \frac{0,13\alpha_{\phi}\Delta^{1/3}p_c^{4/3}}{E^{1/3}} + \frac{p_c^{2/3}}{\Delta^{1/3}E^{2/3}} \quad (9)$$

Подставляя из формулы (3) значение  $p_c$ , получим

$$\psi = \frac{2^{1/3}\tau k^{1/3}B_n^{1/3}r_0^{1/6}\alpha_0^{1/6}g^{1/6}}{\Delta^{1/3}E^{2/3}p_w^{1/6}G_k^{1/6}} + \beta + \frac{0,13\alpha_{\phi}\Delta^{1/3}p_w^{1/6}G_k^{1/6}}{2^{1/3}E^{1/3}k^{1/3}B_n^{1/3}r_0^{1/6}\alpha_2^{1/6}g^{1/6}}, \quad (10)$$

где  $g = 1 + \left(1 - \frac{4\alpha_1 p_w^2}{\alpha_2^2 G_k}\right)^{1/2}$ ;  $g \approx 2.3$

Таким образом, приведенная закономерность учитывает основные характеристики дорожного покрытия, конструктивные параметры шины материала протектора и внешние условия (нагрузку на колесо).

Первые два слагаемых коэффициента сцепления обусловлены межмолекулярными взаимодействиями между дорогой и шиной в зонах фактического контакта. Третий член в формуле (10) зависит от гистерезисных потерь, возникающих при деформировании в случае скольжения протектора резины по неровностям поверхности дорожного покрытия.

Таким образом, коэффициент сцепления значительно зависит от состояния поверхности дороги в зоне контакта (фрикционные параметры  $\tau_0$  и  $\beta$ ), резины протектора (модуль упругости  $E$ , коэффициент гистерезисных потерь  $\alpha_{эф}$ ), менее существенно зависит от геометрических параметров шины ( $B_p$ ,  $r_0$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_1$ ), давления воздуха в ней, нагрузки на колесо и шероховатости поверхности дороги.

#### 4. Определение шероховатость поверхности (в теории трения - текстура) дорожного покрытия

Шероховатость поверхности (в теории трения - текстура) дорожного покрытия представляет собой совокупность неровностей, не вызывающих низкочастотных колебаний автомобиля на подвеске и не влияющих на работу его двигателя. Шероховатость делят на две группы: макро и микрошероховатость. К макрошероховатости относят неровности длиной более 2-3 мм и высотой более 0,2-0,3 мм, обычно формируемые частицами (зернами) щебня, используемого при строительстве покрытий дороги или в результате специальной его обработки. К микрошероховатости относят меньшие неровности, как правило, обусловленные собственной шероховатостью поверхности зерен щебня. По степени шероховатости поверхности дорожные покрытия разделяют на (по Л.Г. Паниной, Л.Г. Марьяхину, А.Я. Эрастову, А.П. Васильеву) на семь групп (табл. 4) [10].

Таблица 4

#### Классификация дорожных покрытий по шероховатости поверхности

Тип шероховатых покрытий	Параметры шероховатости, мм	
	Средняя высота выступов	Средняя глубина впадин
Гладкие	0,1-0,5	0,02-0,25
мелкошероховатые	0,5-3,0	0,25-2,5
среднешероховатые	3,0-6,0	1,0-5,0
крупношероховатые	6,0-9,0	2,0-7,0
На мелко-, средне- и крупношероховатых покрытиях выделяют:		
мелкошипованные	0,5-3,0	1,5-2,5
среднешипованные	3,0-6,0	3,0-5,0
крупношипованные	6,0-9,0	4,5-7,0

Шероховатость поверхности асфальтобетонных покрытий создается путем строительства шероховатых слоев износа или строительства покрытий из многощепенистых асфальтобетонных смесей. На цементобетонных покрытиях шероховатость создается в процессе строительства путём соответствующей обработки поверхности свежееуложенного бетона.

В процессе эксплуатации покрытия происходит уменьшение - износ шероховатости его поверхности. Износ проявляется в уменьшении высоты и шлифовке неровностей шероховатости. На характер и интенсивность этого процесса влияют: интенсивность движения автомобилей и состав транспортного потока; размер щебня, использованного для строительства слоя износа; содержание щебня в асфальтобетонной смеси, погодно-климатические условия. Уменьшение макрошероховатости покрытия вызвано воздействием колёс проходящих автомобилей и протекает в два этапа. На асфальтобетонных покрытиях после открытия движения транспорта макрошероховатость быстро уменьшается в результате погружения щебня, формирующего неровности макрошероховатости. Ввиду небольшой продолжительности первого этапа эффект шлифовки не успевает проявиться в должной мере. На втором этапе, характеризующемся замедлением, а затем и прекращением погружения щебня, основной причиной уменьшения шероховатости покрытия становится шлифовка неровностей макрошероховатости, в результате которой объём выступающей части зерен щебня постепенно уменьшается, а сами они приобретают окатанную форму. Общая закономерность уменьшения макрошероховатости асфальтобетонного покрытия описывается уравнением [10]:

$$R_{cp} = a \cdot e^{-bM} + c,$$

где  $R_{cp}$  - осредненная глубина неровностей макрошероховатости, мм;  $M$  - количество прошедших автомобилей;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  - коэффициенты, зависящие от размера щебня, твердости покрытия и состава транспортного потока.

##### 5. Определение интенсивности износа протектора автомобильных шин.

Причинами износа протектора являются наличие сил трения между элементами протектора и дорожным покрытием и «утомляемости» поверхностного слоя, которые, в свою очередь, зависят от физико-механических свойств материалов шины, механических и тепловых нагрузок, воспринимаемых при работе.

Износ резины имеет преимущественно усталостный характер. Отделение частиц износа происходит при упругом отеснении материала в результате многократных деформаций единичных неровностей дорожного покрытия [11]. Может также происходить механический износ в результате однократного взаимодействия резины о дорожное покрытие. Абразивный износ происходит

при высоких скоростях скольжения и повышенной температуре. Если выступы неровностей покрытия гладкие, то истирание происходит в результате «скатывания», т.е. образования скаток (так называемый рисунок Шалламаха).

Как отмечалось выше, шины обычно работают в области насыщенного контакта. Оценку износа следует производить используя понятие о его линейной интенсивности:

$$I = i_h \frac{P_a}{P_r}. \quad (11)$$

Объем, отделяющийся за один цикл взаимодействия:  $V_o = \frac{U_v}{n}$ ,

где  $U_v$  — деформируемый объем;  $n$  — число циклов до отделения частицы износа.

Проведем расчет величины интенсивности изнашивания беговой поверхности при несвободном качении исходя из интенсивностей изнашивания в условиях скольжения при упругом насыщенном контакте на базе усталостной теории износа.

Согласно Е. Ф. Непомнящему, предположим:

при свободном качении полностью отсутствуют проскальзывание и касательные напряжения в зоне контакта;

касательная нагрузка в зоне контакта невелика по сравнению с пределом сцепления;

поверхность шашки протектора упругая и гладкая;

поверхность опоры жесткая и шероховатая.

Если принять, что в поперечном направлении длины контакта нормальные и касательные напряжения распределены равномерно, то интенсивность изнашивания при качении связана с износом при скольжении зависимостью

$$I_k = \frac{1}{l} \int_0^{S_m} I dS \quad (12)$$

где  $I_k$  — интенсивность изнашивания при качении;  $I_h$  — интенсивность изнашивания при скольжении;  $l$  — длина контакта (при малых проскальзываниях примерно равна пути качения при повороте колеса на угол контакта);  $S_m$  — путь скольжения точки на поверхности качения колеса относительно точки встречи на опорной поверхности за время прохождения зоны контакта. При упругом насыщенном контакте

$$U_v = \sum_{i=1}^{n_c} U_{v_i} \approx \sum_{i=1}^{n_c} cK\pi r h_i \Delta n r,$$

где  $c$  – коэффициент, зависящий от напряженного состояния в зоне контакта; в данном случае  $c = 0,25$ ;  $K > 1$  – коэффициент, учитывающий реально деформируемый объем;  $\Delta n_r$  – число неровностей, имеющих одинаковое внедрение. Вычисления показывают, что

$$U_v = \frac{cKbA_c R_{\max} \varepsilon_{kp}^{v+1}}{2(v+1)} \left[ v(v-1) - 2(v^2-1) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{kp}} + v(v+1) \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon_{kp}^2} \right]. \quad (13)$$

Тогда удельная линейная интенсивность изнашивания

$$I_h = \frac{cKR_{\max}^{1/2} \varepsilon_{kp}}{2(v+1)nr^{1/2} \varepsilon^{1/2}} \left[ \frac{\varepsilon_{kp} v(v-1) - 2(v^2-1)\varepsilon + v(v+1) \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon_{kp}^2}}{v\varepsilon + \varepsilon_{kp} - v\varepsilon_{kp}} \right]. \quad (14)$$

При  $\varepsilon < \varepsilon_{kp}$  формула (5) переходит в ранее установленную формулу для  $I_h$  в зоне ненасыщенного контакта, т. е. формула (5) является более общей, частный случай которой известная формула

$$I_h = \frac{cKR_{\max}^{1/2} \varepsilon_{1/2}}{2(v+1)nr^{1/2}} \quad (15)$$

В приближенных расчетах целесообразнее пользоваться упрощенной формулой,

$$U_v = Uv_{i_{cp}} n_c. \quad (16)$$

Для определения  $Uv_{i_{cp}}$  необходимо знать величину среднего сближения

$$h_{cp} = \frac{A_{r_{cp}}}{\pi r}, \quad (17)$$

где  $A_{r_{cp}}$  - среднее значение площади контакта отдельной неровности;

$$A_{r_{cp}} = \frac{A_r}{n_c} = \frac{\pi r R_{\max} \varepsilon_{kp}}{v} \left( \frac{v\varepsilon}{\varepsilon_{kp}} + 1 - v \right). \quad (18)$$

Выражая из (17) и (18)  $h_{cp}$  и подставляя в (16), получим

$$U_v = \frac{cKA_c b R_{\max} \varepsilon_{kp}^{v+1}}{2v} \left( \frac{v\varepsilon}{\varepsilon_{kp}} + 1 - v \right). \quad (19)$$

и удельную линейную интенсивность изнашивания

$$I_{h_{np}} = \frac{m c K R_{\max}^{1/2} \varepsilon_{kp}^{1/2}}{2v^{1/2} r^{1/2} n} \left( \frac{v\varepsilon}{\varepsilon_{kp}} + 1 - v \right)^{1/2}, \quad (20)$$

где  $m$  — коэффициент, зависящий от  $v$ . При  $v = 2$   $m = 1$ ; при  $v = 3$   $m = 0,8$ .

В зоне сближения  $1 \leq \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{кр}} \leq 3$  расхождение между формулами (14) и (20) незначительное. Поэтому формулой (20) для вычисления  $i_h$  можно удовлетворительно пользоваться до  $\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{кр}} \leq 3$ . Интегральную линейную интенсивность изнашивания получим, подставляя в выражение (11) значения (20), учитывая, что

$$\left( \frac{\nu\varepsilon}{\varepsilon_{кр}} + 1 - \nu \right) = \left[ \frac{5p_c \Theta \nu^{1/2} r^{1/2}}{b\varepsilon_{кр}^\nu R_{\max}^{1/2}} \right]^{2/3}; \quad A_c = lBn;$$

$$A_a = 2\pi r_0 B_n; \quad b = 3; \quad \nu = 3; \quad n = \left( \frac{\sigma_0}{\tau} \right)^t.$$

Таким образом, имеем

$$I = \frac{0,48mcK\Delta^{1/6} p_c^{2/3} \Theta^{2/3} \tau^t l}{2\pi r_0 \sigma_0^t}; \quad (21)$$

полагая  $m = 0,8$ ;  $c = 0,25$ ;  $K \approx 1$ , получим

$$I = \frac{0,1\Delta^{1/6} p_c^{2/3} \Theta^{2/3} \tau^t l}{2\pi r_0 \sigma_0^t}; \quad (22)$$

В приближенных расчетах для наиболее распространенных протекторных резин можно принять  $t = 3 \div 4$ ;  $\sigma_0 = 1500 \div 2000$  кгс/см<sup>2</sup>;  $\tau = 200 \div 270$  кгс/см<sup>2</sup> (для сухих дорожных покрытий).

Подставляя формулу (22) в (12) и интегрируя, получим

$$I_k = \frac{0,1K\Delta^{1/6} p_c^{2/3}}{2\pi\sigma_0 r_0} \int_0^{S_m} \tau^t dS = \frac{0,1K\Delta^{1/6} p_c^{2/3} \Theta^{2/3} \tau_m^t \tau_m}{2\pi r_0 \sigma_0^t (t+1)}. \quad (23)$$

Формула (23) является общим выражением для вычисления износа, когда касательная сила, действующая на шину, имеет произвольное направление. В частных случаях существуют определенные соотношения между  $\tau_m$ ,  $S_m$  и конструктивными параметрами шины.

Если шина нагружена боковой силой, то согласно [2]

$$\tau_m = \frac{\chi_w p_w \alpha l}{H}, \quad S_m = \psi' \alpha l,$$

где  $\chi_w$  и  $\psi'$  - коэффициенты, зависящие от конструкции шины;  $\alpha$  — угол бокового увода;  $H$  — высота профиля шины.

Подставляя в формулу значение  $p_c$ ,  $\tau_m$ , и  $S_m$ , получим в данном случае

$$I_k = \frac{1 \cdot 10^{-2} \Delta^{1/6} \Theta^{2/3} \chi_w^t (\alpha l)^{t+1} \psi' G_k^{1/3} p_w^{t+1/3}}{\sigma_0^t r_0^{4/3} (t+1) k^{2/3} B_n^{2/3} \alpha_2^{1/3} g^{1/3}}.$$

Таким образом, износ протектора существенно зависит от давления воздуха в шине, материала протектора и конструктивных параметров шины.

Если колесо нагружено крутящим или тормозящим моментом  $M$ , то согласно

$$\tau_m = \frac{2M}{B_n l r_0}; \quad S_m = \psi_x \frac{2M}{k_x l r_0},$$

где  $\psi_x, k_x$  – коэффициенты, зависящие от конструкции шины.

Тогда

$$I_k = \frac{1 \cdot 10^{-2} \cdot 2^{t+1} \Delta^{1/6} \Theta^{2/3} M^{t+1} \psi_x}{\sigma_0^t (t+1) k^{t/3} r_0^{t+7/3} l^{t+1} B_n^{t+2/3} \alpha_2^{1/3} g^{1/3} k_x}.$$

В этом случае износ существенно зависит от величины приложенного момента (вращающего или тормозящего) и конструктивных параметров шины.

#### б. Определение пробега автомобильных шин.

При известном значении интенсивности износа шин можно определить пробег по формуле:

$$L = \left( \frac{h_{pr}}{I} \right),$$

где  $h_{pr}$  – износ протектора, мм.

Таким образом, предложена общая методика определения интенсивности износа и пробег шин специализированных транспортных средств с учетом характеристик шины, их конструкции, давления воздуха в ней, нагрузки на колесо, механических характеристик резины протектора, шероховатости дорожного покрытия причем считается, износ резины имеет преимущественно усталостный характер.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бродский Г.И., Евстратов В.Ф., Сахновский М.Л., Слюдиков Л.Д. Истирание резин. - М.: Химия, 1975. - 240 с.
2. Кнороз В.И., Клеников Е.В., Петров И.П., Шелухин А.С., Юрьев Ю.М. Работа автомобильной шины. М., «Транспорт», 1976. 238 с.
3. Захаров Н.С. Влияние условий эксплуатации на долговечность автомобильных шин. — Тюмень: ТюмГНГУ, 1997. - 139 с.
4. Непомнящий Е.Ф. Износ эластичного колеса при качении с проскальзыванием. Роль спектра нагрузок. — М.: Химия, 1967, JST» 3 - С. 58-72.
5. Петров А.И. Влияние условий эксплуатации на долговечность и безотказность автомобильных шин: Днс... канд. техн. наук. - Тюмень, 1999.-222 с.

6. Устаров, Р. М. Прогнозирование пробега автомобильных шин, эксплуатируемых в условиях переменного рельефа местности: дис. канд. техн. наук: 05.22.10: защищена 20.04.12 /Устаров Рамазан Магомедярагиевич. –Волгоград, 2012. – 190 с.
7. Тарновский В.Н., Гудков В.А., Третьяков О.Б.. Автомобильные шины: Устройство, работа, эксплуатация, ремонт. - М.: Транспорт, 1990. - 272 с. <http://motorzlib.ru/books/item/f00/s00/z0000030/st045.shtml>
8. Бидерман В.Л. Автомобильные шины. М., Госхимиздат, 1963. 383 с.
9. Новольский В.И., Непомнящий Е.Ф. О взаимодействии протектора в автомобильной дорожной резины. – В сб.: Фрикционный износ резины. М. – Л., «Химия», 1964, с. 250-261.
10. Справочная энциклопедия дорожника. II том. Ремонт и содержание автомобильных дорог. /Под редакцией д-ра техн. наук, проф. А.П. Васильева. Москва. 2004. – 1129 с.
11. Бродский Г.И., Резниковский М.М., Сизиков Н.Н., Оценка износостойкости протектора шин по данным лабораторных испытаний резины. – В сб.: Резина – конструкционный материал современного машиностроения. М., «Химия», 1967, с. 118-124.
12. Холдаров, Ф. Э. Ё. (2022). Махсус транспорт воситалар тизимида инновацион интеллектуал ёндашув. *Academic research in educational sciences*, 3(TSTU Conference 1), 124-129.
13. Shermukhamedov, A., Ergashev, N., & Azizov, A. (2021). Substantiating parameters brake system of the tractor trailer. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 264, p. 04019). EDP Sciences.
14. Shermukhamedov, A., Azizov, A., Ergashev, N., Shermukhamedov, Y., & Abdukhamidovich, A. K. (2022, June). Substantiation of the parameters of the wheel propeller tread lugs. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2432, No. 1, p. 030089). AIP Publishing LLC.
15. Ubaydullaev, G., Riskaliev, D., Ergashev, N., Rashidov, A., & Shadiey, S. (2021). Determination of installation bases of parts during their mechanical processing. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 264, p. 05046). EDP Sciences.