

Слайды к лекциям по курсу

**ТЕОРИЯ ДВИЖЕНИЯ
ВОЕННЫХ КОЛЕСНЫХ МАШИН**

Лекция 4

Сопротивление качению колеса

Рассматриваются необратимые потери при качении колеса по твердой опорной поверхности, обусловленные:

1. Внутренними потерями в шине (гистерезисными)

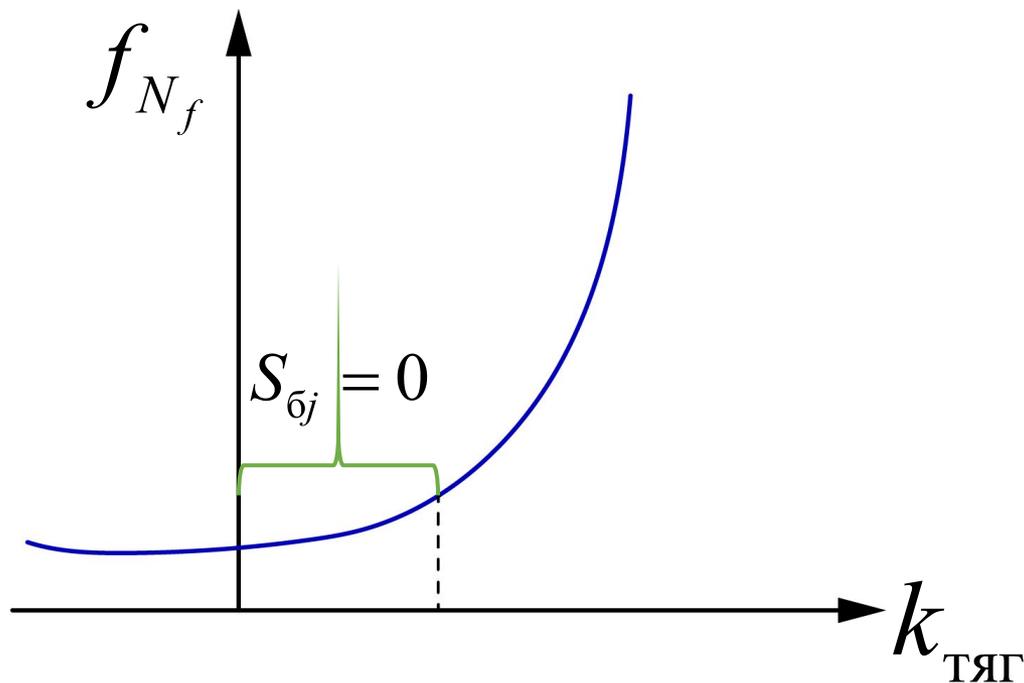
Вызванными межмолекулярным трением в резине и корде, механическим трением между шиной и камерой, шиной и ободом, резиной и кордом.

При малых продольных нагрузках ($P_x \approx 0$) и скорости ($v_{кx} \approx 0$) общие потери состоят из двух составляющих:

- около 95 % обусловлены упругой петлей гистерезиса;
- около 5 % связаны с окружной деформацией шины.

Сопротивление качению колеса

С увеличением продольной силы P_x и крутящего момента M_k но при отсутствии относительного скольжения ($S_{\sigma j} = 0$) возникают дополнительные потери на деформацию шины в продольном и окружном направлении.



Сопротивление качению колеса

2. Непосредственным скольжением

Резкое возрастание потерь связано с характером изменения f_{Nf} . Характер изменения зависит от сцепных характеристик системы опорной поверхности и шины.

3. Присасыванием беговой дорожки к опорной поверхности

Возникают при наличии на ней замкнутых полостей, из которых при нагрузке (входе в контакт) выдавливается воздух или вода. При выходе из контакта требуется дополнительная энергия на их отрыв от опорной поверхности.

Сопротивление качению колеса

4. Аэродинамическим сопротивлением

Обусловлено циркуляцией воздуха в шине, лобовым сопротивлением воздуха и вентиляторным эффектом вращающегося колеса.

Сопротивление качению колеса

Существуют следующие показатели, характеризующие сопротивление качению:

$M_{fш}$ - момент сопротивления качению

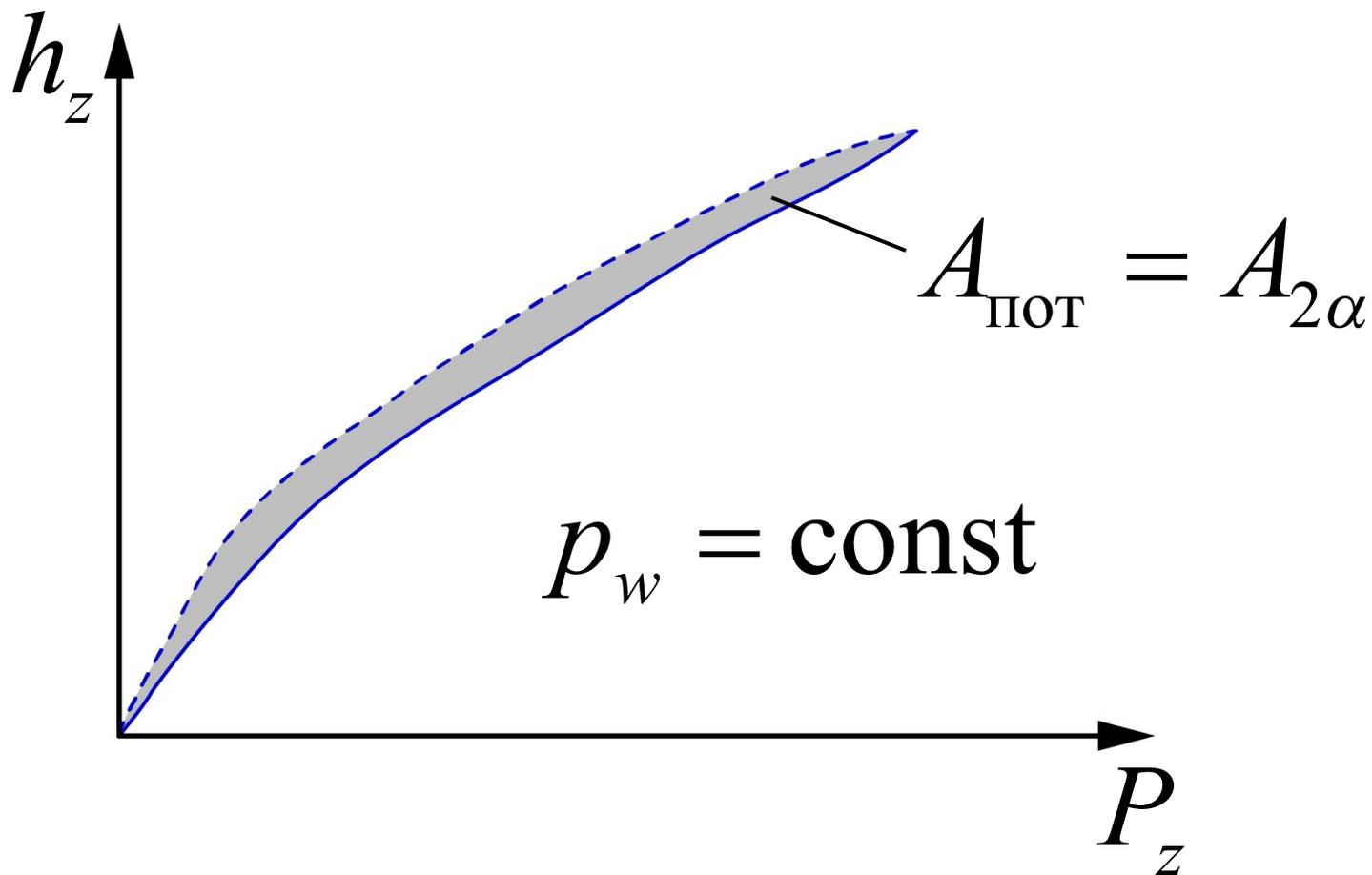
$P_{fш}$ - сила сопротивления качению

$f_{ш}$ - коэффициент сопротивления качению

f_{N_f} - коэффициент мощности сопротивления

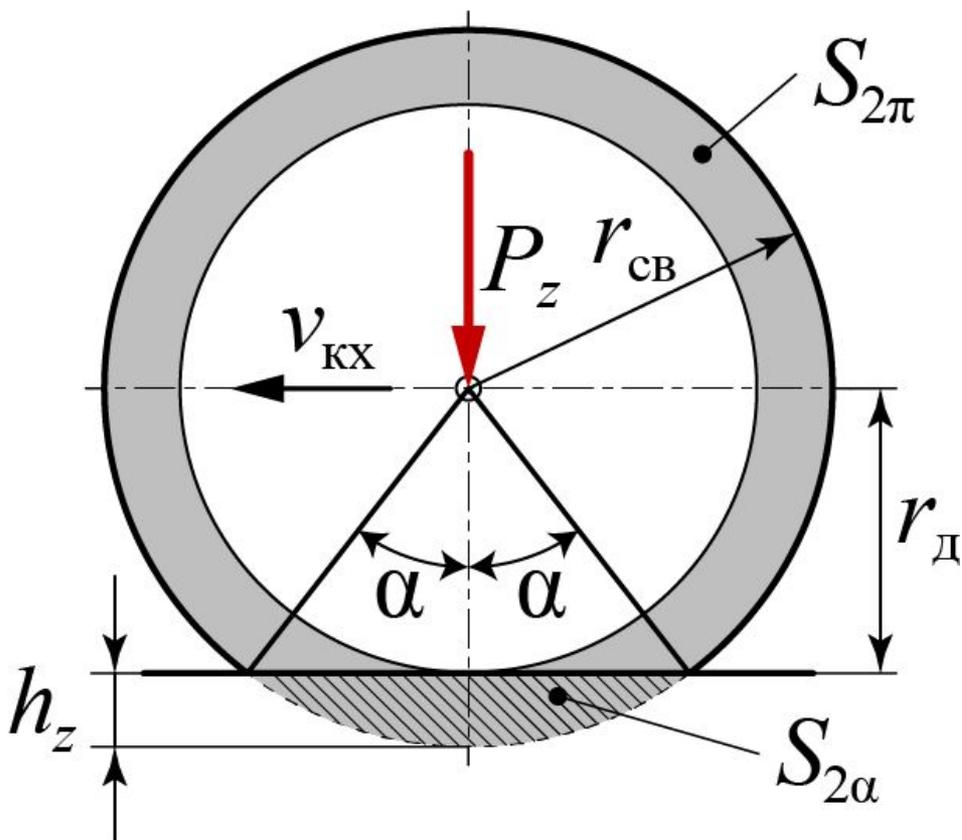
Сопротивление качению колеса

Исходная характеристика определяется при движении по ровной гладкой опорной поверхности и малых скоростях движения.



Сопротивление качению колеса

Принято допущение, что работа на деформацию за один оборот колеса $A_{2\pi}$ больше работы при однократном цикле «нагрузка-разгрузка» неподвижного колеса $A_{2\alpha} = A_{\text{пот}}$ до нормальной деформации h_z во столько раз, во сколько раз площадь $S_{2\pi}$ кольца деформации с радиусами $r_{\text{св}}$ и $r_{\text{д}}$ больше площади сегмента $S_{2\alpha}$.



Сопротивление качению колеса

$$A_{2\pi} = \frac{A_{\text{в}\alpha} \cdot S_{2\pi}}{S_{\text{в}\alpha}} = \frac{A_{2\alpha} \cdot \pi \cdot h_z \cdot (2 \cdot r_c - h_z)}{r_{\text{свс}}^2 \cdot \alpha_{\text{св}} - r \cdot (r - h_z) \cdot \sin \alpha}$$

При равномерном движении и без учета сопротивления воздуха эту работу можно записать так:

$$A_{\text{шв}} = P_f \cdot 2 \cdot \pi \cdot r$$

Тогда

$$P_{f\text{шв}} = A_{2\pi} / (2 \cdot \pi \cdot r_{\text{к}}) ; \quad f_{\text{шв}} = P_{f\text{шв}} / P_z$$

При определении $f_{\text{шв}}$ такой метод обеспечивает точность 90...95%.

Сопротивление качению колеса

На сопротивление качению оказывают влияние следующие параметры, которые необходимо учитывать в обязательном порядке:

1. Опорная поверхность.

ОП определяет коэффициент сопротивления качению, характеризующийся шероховатостью поверхности и микропрофилем. Коэффициент $k_{fоп}$ позволяет учесть влияние изменения характеристик опорной поверхности.

$$f'_{ш в} = k_{fоп} \cdot f_{ш в}$$

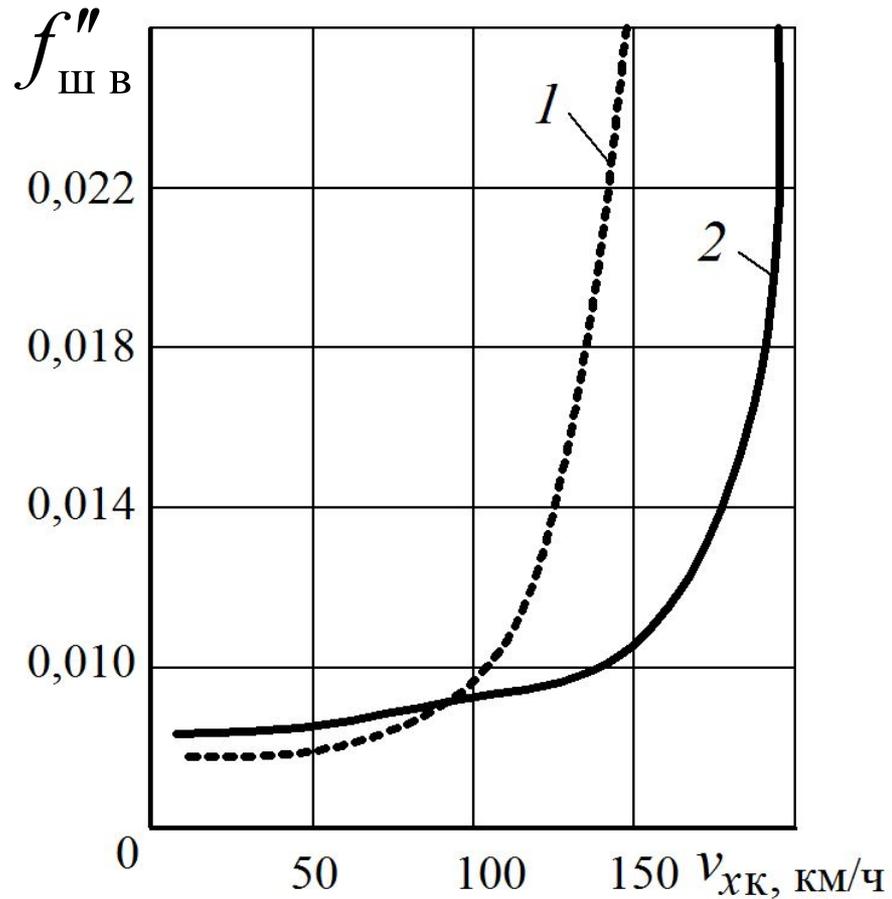
Сопротивление качению колеса

Тип покрытия	$f'_{\text{шв}}$	$k_{f_{\text{оп}}}$
Асфальтобетонное в хорошем состоянии	0,008 – 0,015	1,05
Гравийное в хорошем состоянии	0,020 – 0,025	1,33
Грунтовое после дождя	0,050 – 0,150	3,33
Снежное укатанное	0,030 – 0,050	2,00
Обледенелое	0,015 – 0,030	1,05

Сопротивление качению колеса

2. Скорость движения ТС.

На ровной ОП до скорости 100 км/ч значение коэф. сопротивления качению изменяется не значительно, а при большей скорости – резко возрастает. Интенсивность роста зависит от конструкции шины, изношенности протектора и давления воздуха в шине.



1 – диагональные
2 – радиальные

Сопротивление качению колеса

3. Подводимый крутящий момент.

При условии подведения крутящего момента и росте P_x , а так же при отсутствии скольжения и линейно изменяющегося радиуса чистого качения, дополнительные потери (обусловленные тангенциальными деформациями и скольжением) возрастают от квадрата момента:

$$f_{\text{ш } M} = f_{\text{ш } B} \cdot \left(\frac{r_{\text{KB}}}{r_{\text{K0}}} - 1 \right) + \lambda_M \cdot M_K^2 / (P_z \cdot r_{\text{KB}} \cdot r_{\text{K0}})$$

Сопротивление качению колеса

4. Температура шины.

Оптимальной температурой по условию обеспечения наименьшего значения коэффициента сопротивления качению является температура в пределах от 70 до 75°C.

При снижении температуры ниже 0°C сопротивление качению может увеличиваться более чем в три раза.

Температура:

- 100°C – допустимая эксплуатационная температура;
- 120°C – критическая температура;
- более 120°C – опасная для эксплуатации температура.

Сцепление колеса с опорной поверхностью

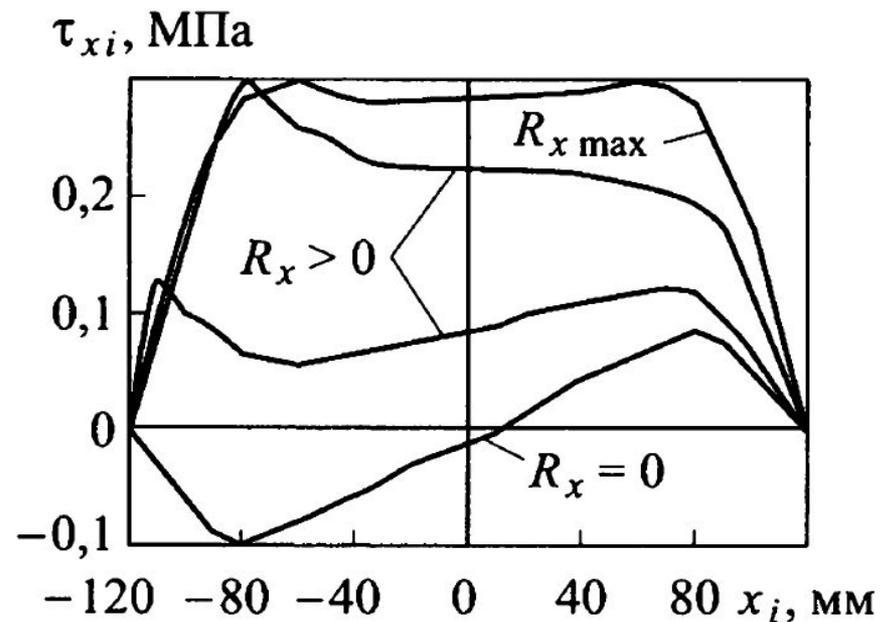
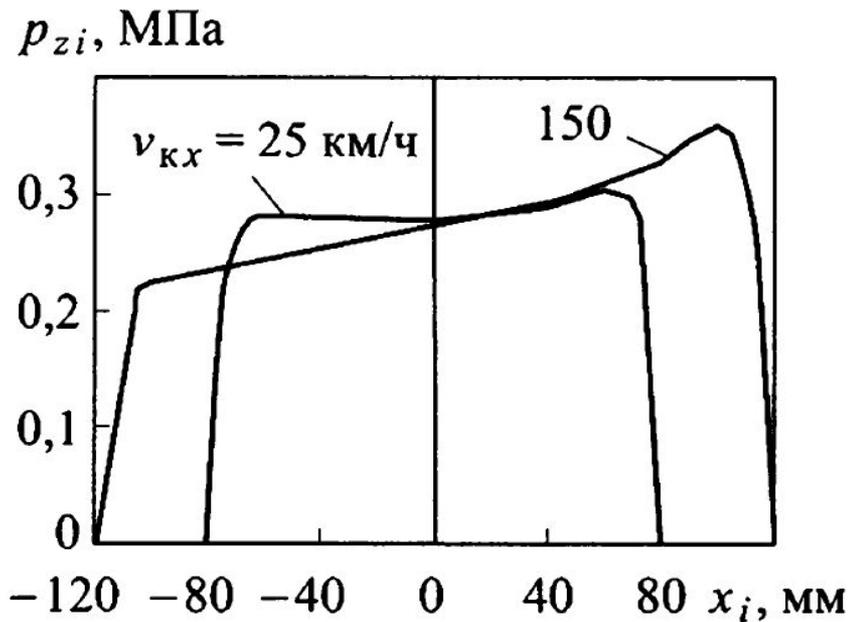
Продольная реакция R_x в плоскости контакта определяется суммой элементарных продольных реакций dR_x , которые на недеформируемой ОП являются силами трения покоя в передней части контакта и трения скольжения в задней.

Элементарная реакция трения покоя $dR_{x\text{пок}}$ равна вызывающей ее внешней силе и с возрастанием последней увеличивается до тех пор, пока не превысит произведение $\mu_{\text{пок}} \cdot dR_z$, где $\mu_{\text{пок}}$ – коэф. трения покоя.

Элементарная реакция трения скольжения $dR_{x\text{ск}} = \mu_{\text{ск}} \cdot dR_z$, где $\mu_{\text{ск}}$ – коэф. трения скольжения.

Сцепление колеса с опорной поверхностью

При изменении подводимого момента (или продольной силы) в зоне контакта происходит изменение элементарных реакций dR_z и dR_x .



Изменение нормального давления p_{zi} и касательного напряжения τ_{xi} по длине контакта.

Сцепление колеса с опорной поверхностью

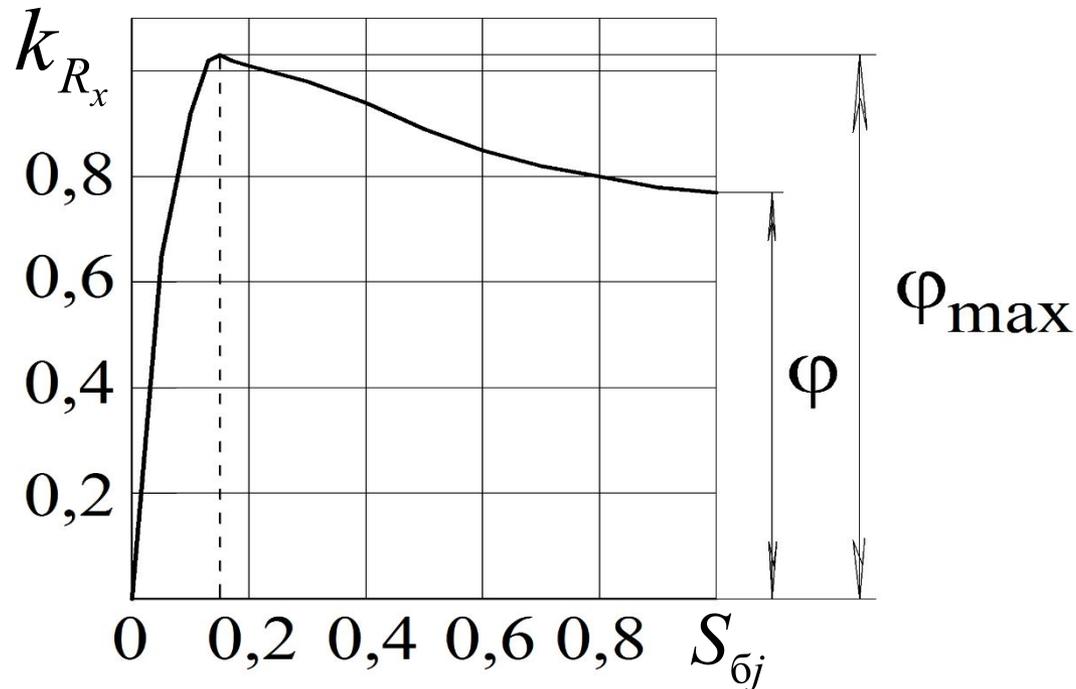
Чем больше передаваемый колесом момент, тем больше элементов шины начинают скользить относительно ОП, увеличивая реакцию R_x . Поскольку коэф. трения покоя $\mu_{\text{пок}}$ больше коэф. трения скольжения $\mu_{\text{ск}}$, а последний уменьшается с увеличением скорости скольжения, то результирующая реакция R_x достигает максимального значения, когда в зоне контакта еще имеются нескользящие элементы.

При дальнейшем увеличении скольжения зона трения покоя исчезает и реакция R_x , определяемая только трением скольжения, уменьшается.

Сцепление колеса с опорной поверхностью

Процесс скольжения колеса относительно ОП оценивается коэф. продольного скольжения $S_{\bar{b}j}$.

Вид кривой, отображающей зависимость коэф. продольной реакции от скольжения $k_{Rx}(S_{\bar{b}j})$, определяется материалом и конструкцией шины, типом ОП и скоростью движения колеса.



Сцепление колеса с опорной поверхностью

Наибольшее значение коэф. $k_{R_{\max}}$ называется максимальным коэффициентом сцепления φ_{\max} (ему соответствует $S_{\bar{\sigma}j} = 0,1 \dots 0,18$), а при полном скольжении ($S_{\bar{\sigma}j} = 1$) величина k_{R_x} называется коэффициентом сцепления φ . Для большинства твердых ОП $\varphi = (0,75 \dots 0,8) \varphi_{\max}$.

Сцепление колеса с опорной поверхностью

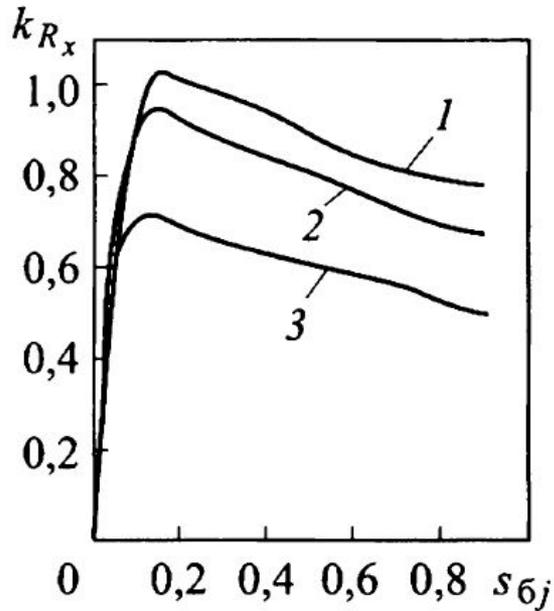
Коэффициент сцепления ϕ зависит от большого числа различных параметров:

- 1) от типа покрытия и состояния дороги (последнее является определяющим);
- 2) конструкции и материала шины;
- 3) давления воздуха в шине;
- 4) нормальной нагрузки;
- 5) скорости;
- 6) характера движения (скольжение или буксование);
- 7) температурных условий.

Сцепление колеса с опорной поверхностью

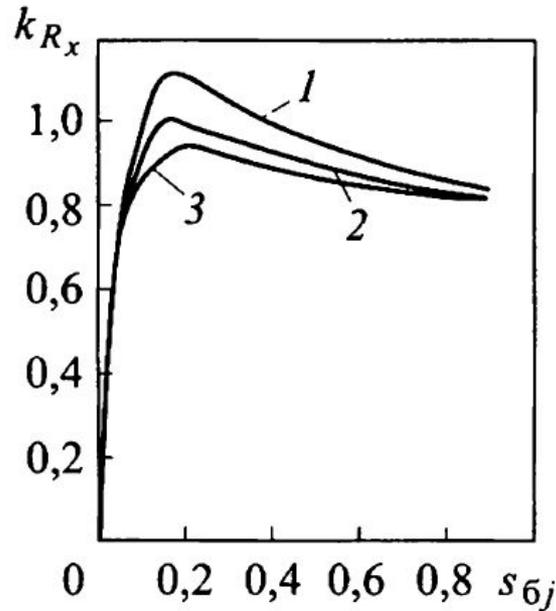
Изменение коэффициента продольного скольжения на различных ОП при разных скоростях

$$v_{MX} = 32 \text{ км/ч (1)}$$



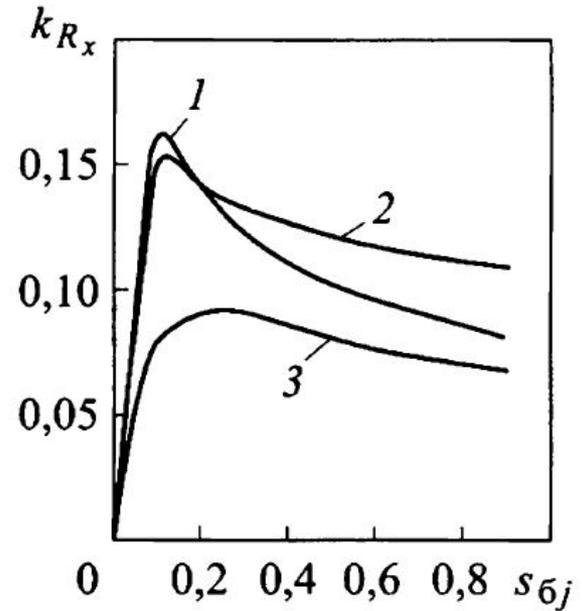
Сухой
асфальтобетон

$$v_{MX} = 64 \text{ км/ч (2)}$$



Сухой
цементобетон

$$v_{MX} = 96 \text{ км/ч (3)}$$



Заснеженная и
обледенелая
дорога

Сцепление колеса с опорной поверхностью

Тип покрытия	φ
Асфальтобетонное сухое	0,50 – 0,70
Асфальтобетонное мокрое	0,35 – 0,45
Гравийное сухое	0,50 – 0,60
Грунтовое мокрое	0,20 – 0,40
Снежное укатанное	0,15 – 0,20
Обледенелое	0,08 – 0,15

Сцепление колеса с опорной поверхностью

Приближенные зависимости, описывающие изменение коэффициента продольной реакции k_{R_x} от коэффициента продольного скольжения $S_{\sigma j}$:

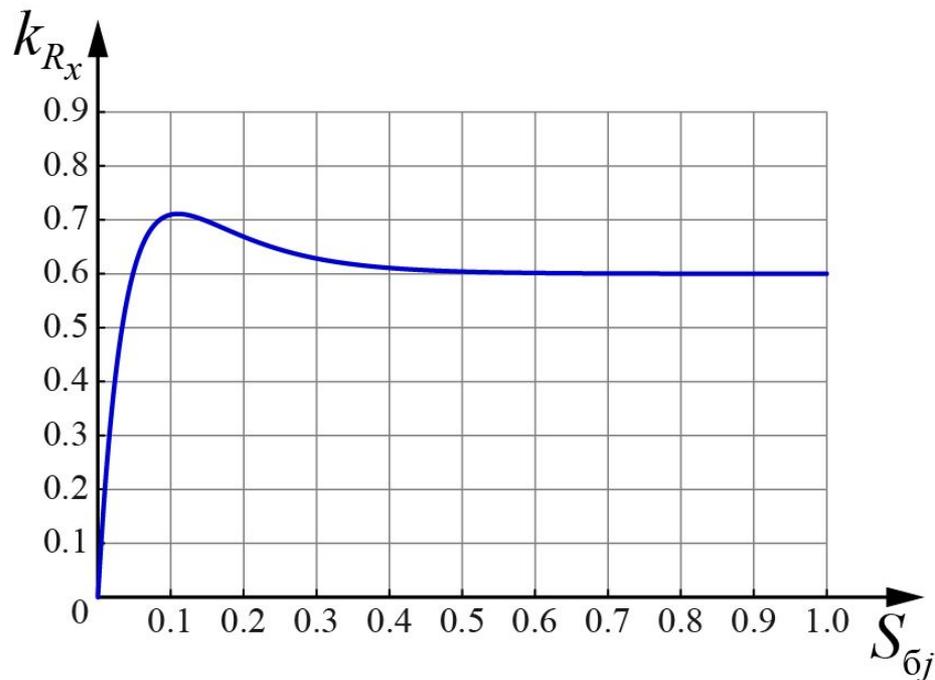
$$k_{R_x} = \varphi \cdot \left(1 - e^{-\frac{S_{\sigma j}}{S_0}}\right) \cdot \left(1 + e^{-\frac{S_{\sigma j}}{S_1}}\right)$$

$$k_{R_x} = \varphi \cdot \left(1 - e^{-\frac{S_{\sigma j}}{S_{\theta}}}\right) + a_{\text{ш-оп}} \cdot e^{\frac{-(S_{\sigma j} - S_{\max})^2}{a}}$$

$$k_{R_x} = \varphi_{\max} \cdot \left(1 - e^{-C_{\Phi} \cdot S_j}\right) - C_2 \cdot S_j$$

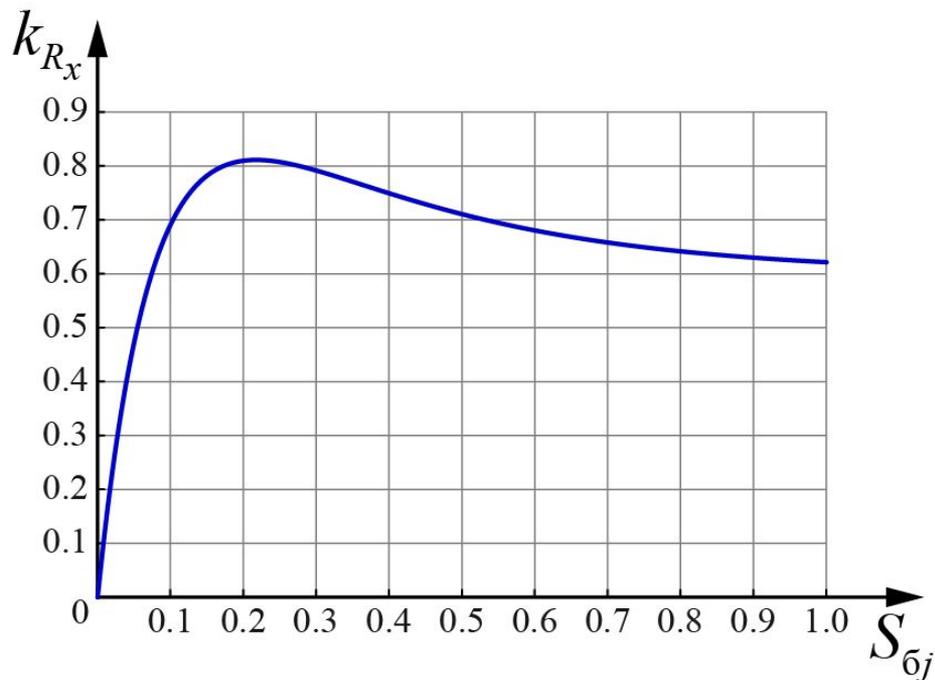
Сцепление колеса с опорной поверхностью

$$k_{R_x} = \varphi \cdot \left(1 - e^{-\frac{S_{\sigma j}}{S_0}}\right) \cdot \left(1 + e^{-\frac{S_{\sigma j}}{S_1}}\right)$$



$$\varphi = 0,6;$$

$$S_0 = 0,05; S_1 = 0,1$$

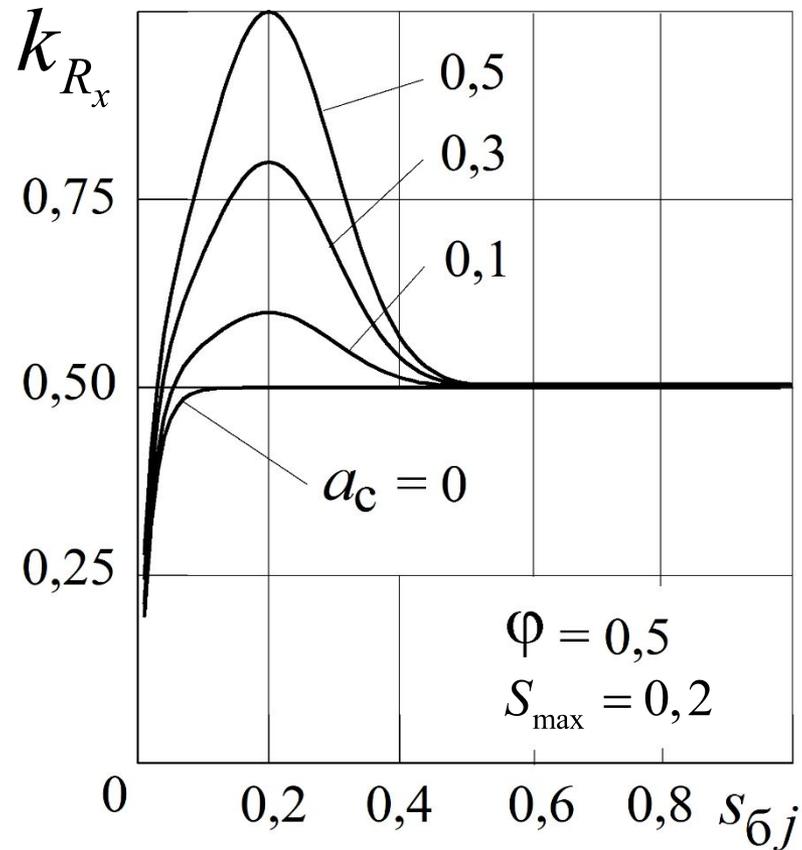


$$\varphi = 0,6;$$

$$S_0 = 0,09; S_1 = 0,3$$

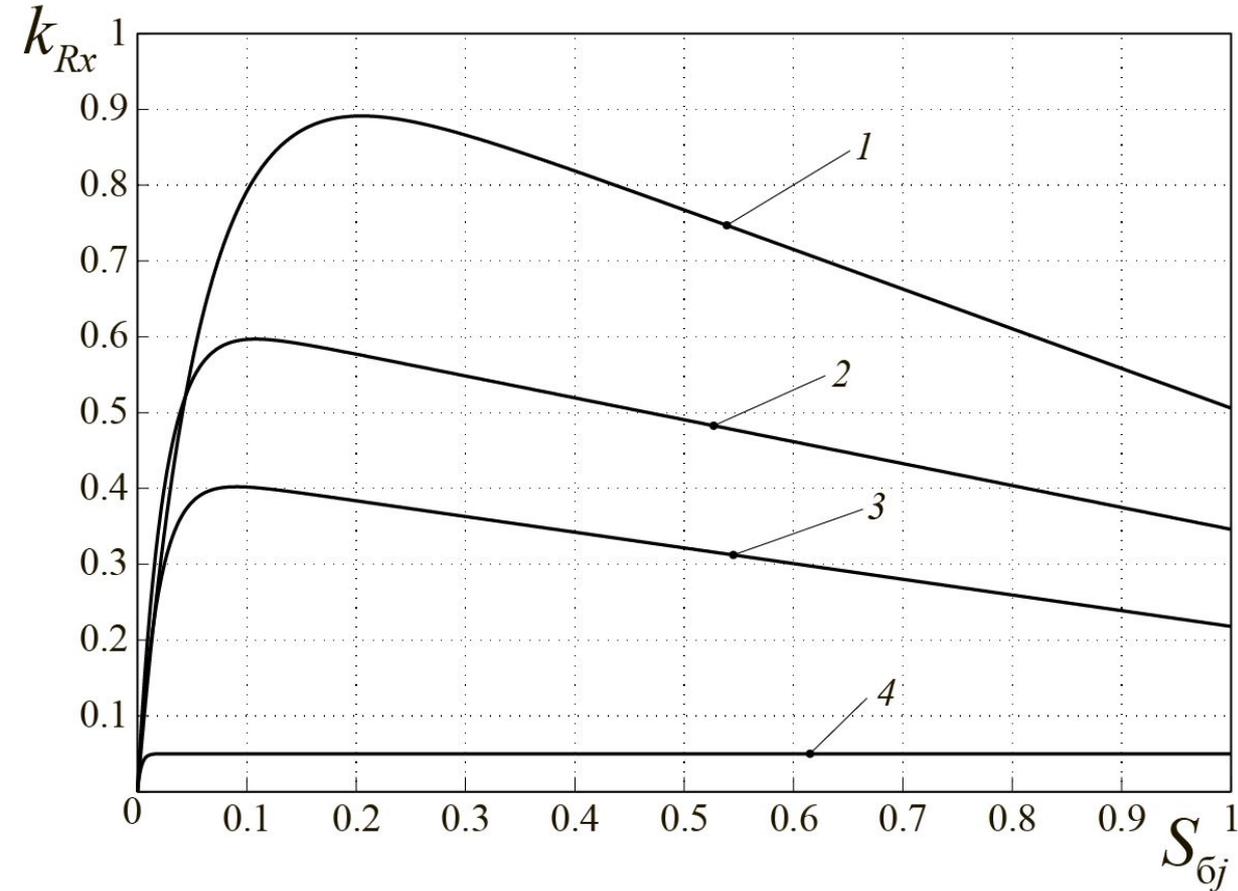
Сцепление колеса с опорной поверхностью

$$k_{R_x} = \varphi \cdot \left(1 - e^{-\frac{S_{\sigma j}}{S_{\theta}}} \right) + a_c \cdot e^{-\frac{(S_{\sigma j} - S_{\max})^2}{a}}$$



Сцепление колеса с опорной поверхностью

$$k_{R_x} = \varphi_{\max} \cdot (1 - e^{-C_{\phi} \cdot S_j}) - C_2 \cdot S_j$$



№	φ_{\max}	C_1	C_2
1	1,029	17,16	0,523
2	0,635	41,915	0,289
3	0,425	51,348	0,207
4	0,05	306,39	0