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)

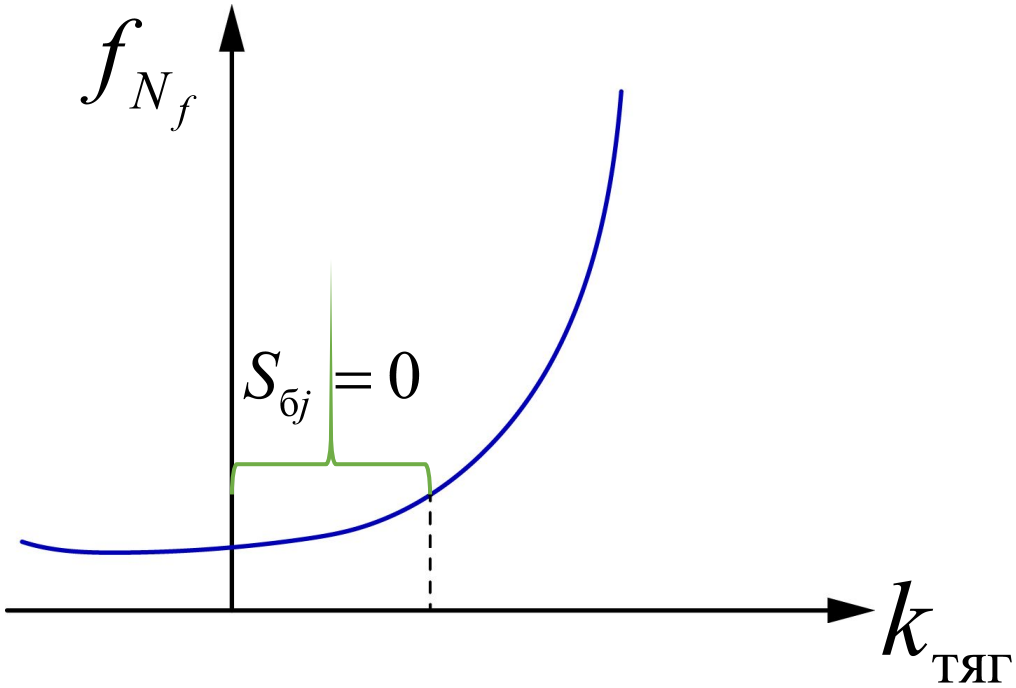
Вызванными межмолекулярным трением в резине и корде, механическим трением между шиной и камерой, шиной и ободом, резиной и кордом.

При малых продольных нагрузках ($\boldsymbol{P_x} \approx 0$) и скорости ($\boldsymbol{v_{кx}} \approx 0$) 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 $\boldsymbol{P_x}$ и крутящего момента $\boldsymbol{M_к}$ но при отсутствии относительного скольжения ($\boldsymbol{S_{бj}}$ = 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:

$M_{f\text{ш}}$ - момент сопротивления качению

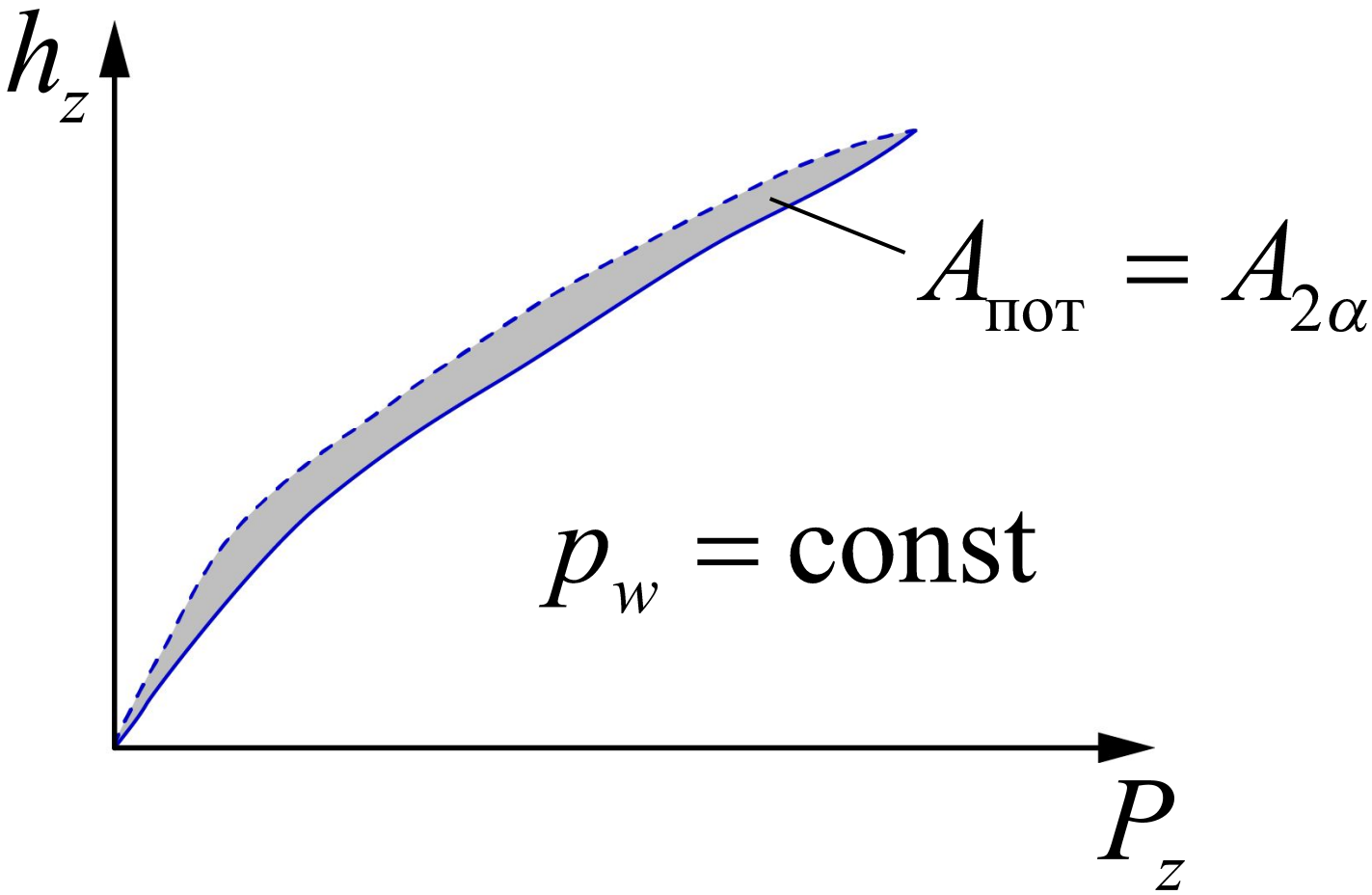
$P_{f\text{ш}}$ - сила сопротивления качению

$f_{\text{ш}}$ - коэффициент сопротивления качению

f_{N_f} - коэффициент мощности сопротивления

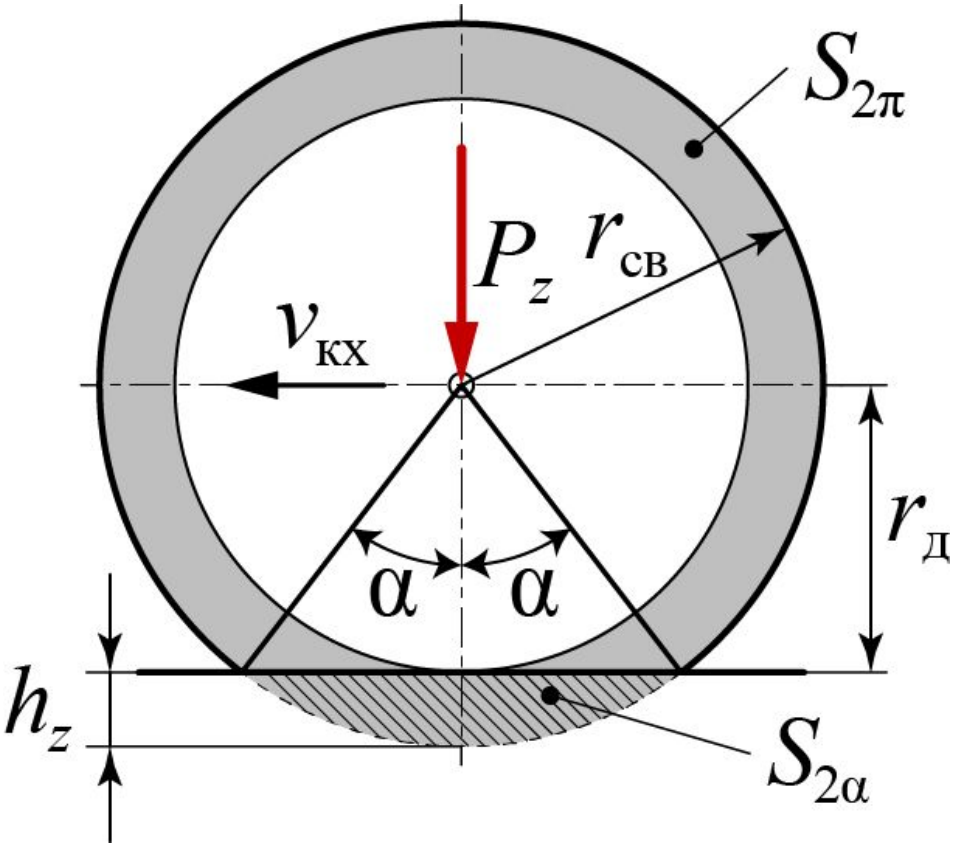
Сопротивление качению колеса

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 $A_{2\alpha} = A_{пот}$ до нормальной деформации h_z во столько раз, во сколько раз площадь $S_{2\pi}$ кольца деформации с радиусами $r_{св}$ и $r_д$ больше площади сегмента $S_{2\alpha}$.



Сопротивление качению колеса

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

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

$$A_{2\pi\text{в}} = P_{f\text{в}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{к}}$$

Тогда

$$P_{f\text{ш в}} = A_{2\pi} \big/ \left(2 \cdot \pi \cdot r_{\text{к}}\right) \; ; \quad f_{\text{ш в}} = P_{f\text{ш в}} \big/ P_z$$

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

Сопротивление качению колеса

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

1. <u>Опорная поверхность.</u>

ОП определяет коэффициент сопротивления качению, характеризующийся шероховатостью поверхности и микропрофилем. Коэффициент $\boldsymbol{k_{f\text{оп}}}$ позволяет учесть влияние изменения характеристик опорной поверхности.

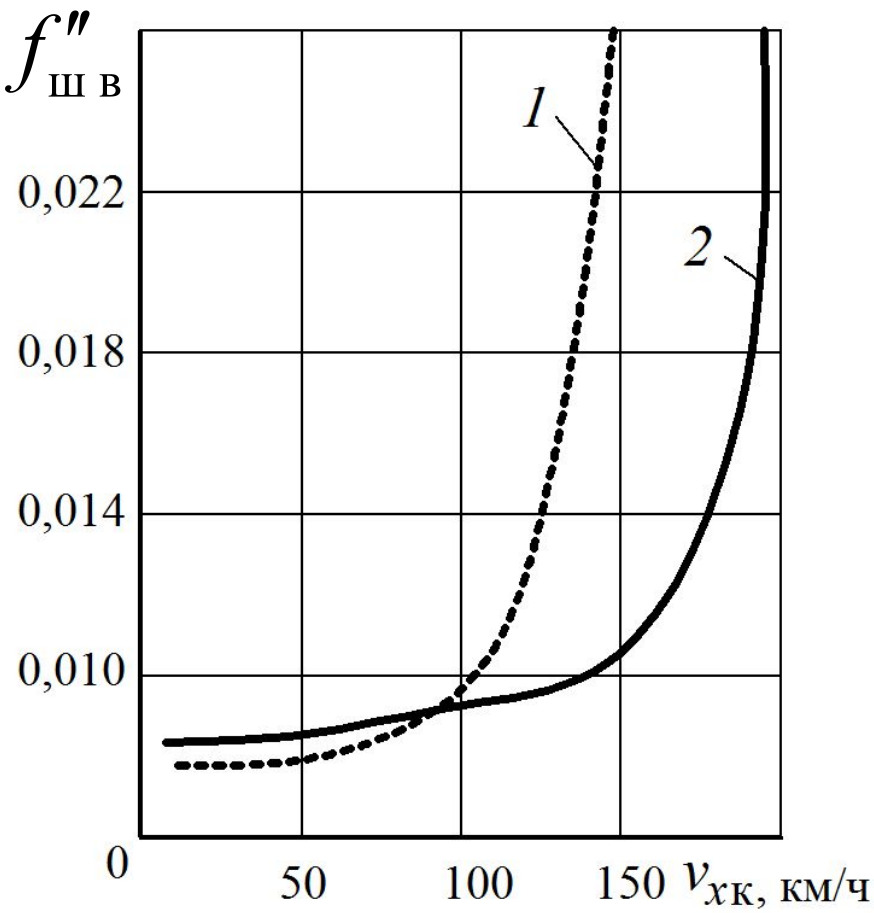
$$f'_{\text{ш в}} = k_{f\text{оп}} \cdot f_{\text{ш в}}$$

Сопротивление качению колеса

Тип покрытия	$f'_{шв}$	$k_{fоп}$
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 $\boldsymbol{P_x}$, а так же при отсутствии скольжения и линейно изменяющегося радиуса чистого качения, дополнительные потери (обусловленные тангенциальными деформациями и скольжением) возрастают от квадрата момента:

$$f_{\text{ш}\,M} = f_{\text{ш в}} \cdot \left(\frac{r_{\text{к в}}}{r_{\text{к0}}} - 1 \right) + \lambda_M \cdot M_{\text{к}}^2 \Big/ \left(P_z \cdot r_{\text{к в}} \cdot r_{\text{к0}} \right)$$

Сопротивление качению колеса

4. Температура шины.

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

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

Температура:

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

Сцепление колеса с опорной поверхностью

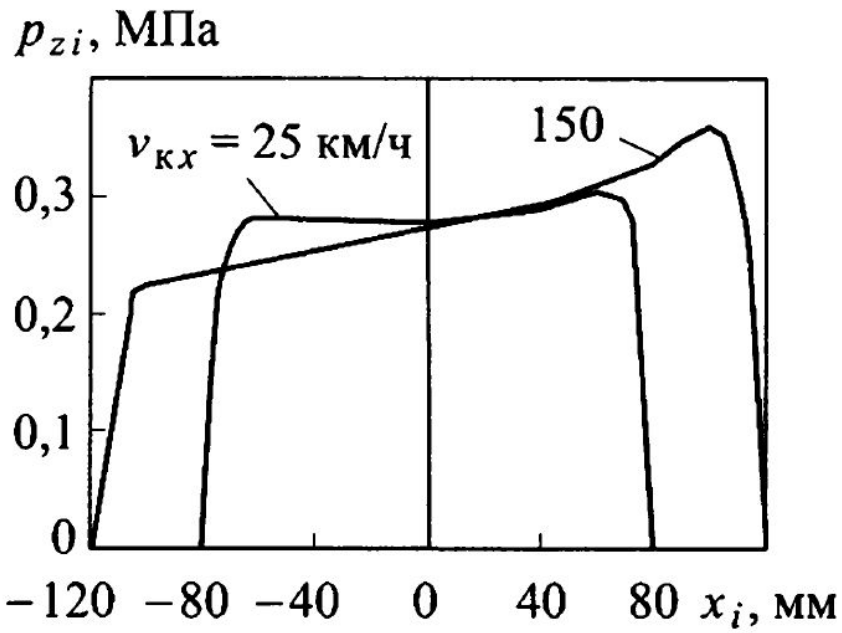
Продольная реакция $\boldsymbol{R_x}$ в плоскости контакта определяется суммой элементарных продольных реакций $\boldsymbol{dR_x}$, которые на недеформируемой ОП являются силами трения покоя в передней части контакта и трения скольжения в задней.

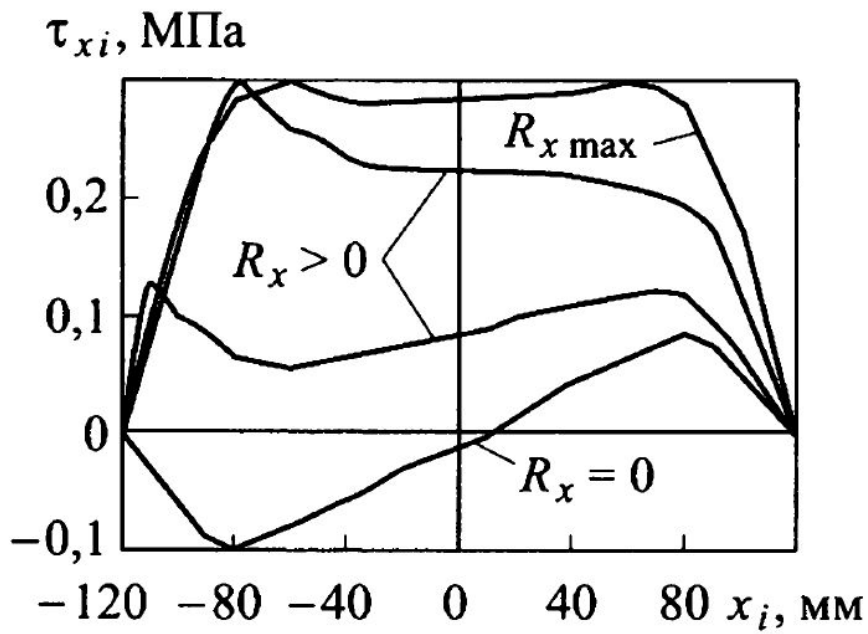
Элементарная реакция трения покоя $\boldsymbol{dR_{x\text{пок}}}$ равна вызывающей ее внешней силе и с возрастанием последней увеличивается до тех пор, пока не превысит произведение $\boldsymbol{\mu_{\text{пок}} \cdot dR_z}$, где $\boldsymbol{\mu_{\text{пок}}}$ – коэф. трения покоя.

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

Сцепление колеса с опорной поверхностью

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





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

Сцепление колеса с опорной поверхностью

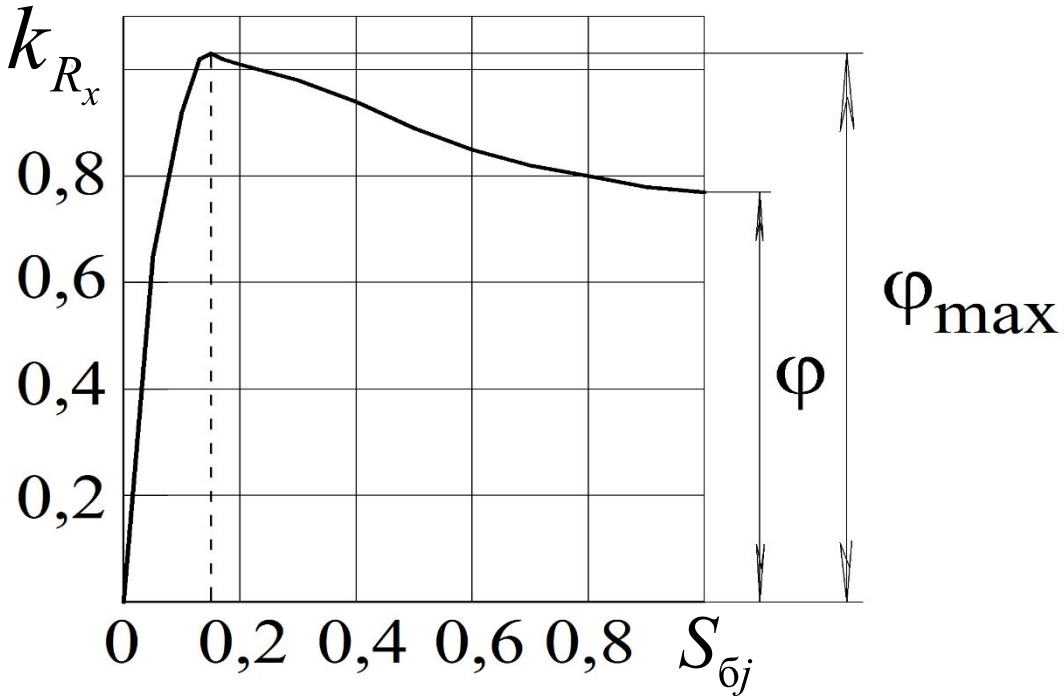
Чем больше передаваемый колесом момент, тем больше элементов шины начинают скользить относительно ОП, увеличивая реакцию $\boldsymbol{R_x}$. Поскольку коэф. трения покоя $\boldsymbol{\mu_{пок}}$ больше коэф. трения скольжения $\boldsymbol{\mu_{ск}}$, а последний уменьшается с увеличением скорости скольжения,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

При дальнейшем увеличении скольжения зона трения покоя исчезает и реакция $\boldsymbol{R_x}$, определяемая только трением скольжения, уменьшается.

Сцепление колеса с опорной поверхностью

Процесс скольжения колеса относительно ОП оценивается коэф. продольного скольжения $S_{бj}$.

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



Сцепление колеса с опорной поверхностью

Наибольшее значение коэф. $\boldsymbol{k_{R\max}}$ называется максимальным коэффициентом сцепления $\boldsymbol{\varphi_{\max}}$ (ему соответствует $S_{бj}$ = 0,1…0,18), а при полном скольжении ($S_{бj}$ = 1) величина $\boldsymbol{k_{Rx}}$ называется коэффициентом сцепления $\boldsymbol{\varphi}$. Для большинства твердых ОП $\boldsymbol{\varphi}$ = (0,75...0,8) $\boldsymbol{\varphi_{\max}}$.

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;

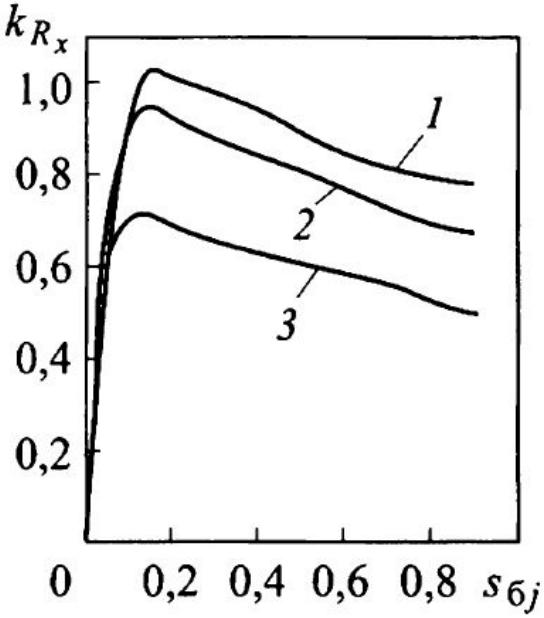
6) характера движения (скольжение или буксование);

7) температурных условий.

Сцепление колеса с опорной поверхностью

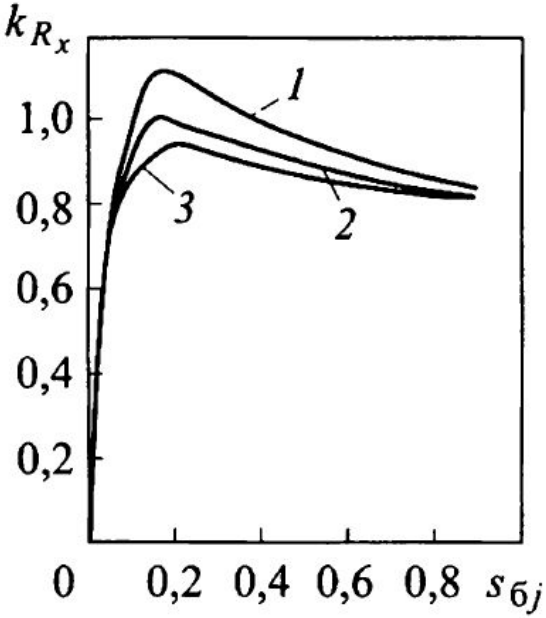
Изменение коэффициента продольного скольжения на различных ОП при разных скоростях

$v_{мx}$ = 32 км/ч (1)



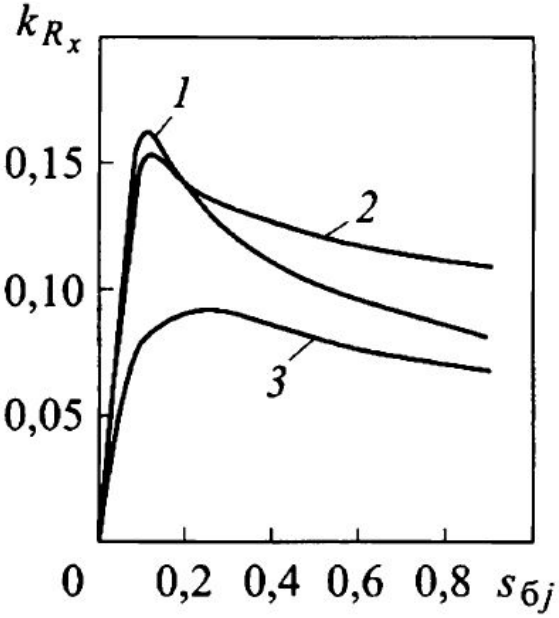
Сухой асфальтобетон

$v_{мx}$ = 64 км/ч (2)



Сухой цементобетон

$v_{мx}$ = 96 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 $\boldsymbol{k_{Rx}}$ от коэффициента продольного скольжения $\boldsymbol{S_{бj}}$:

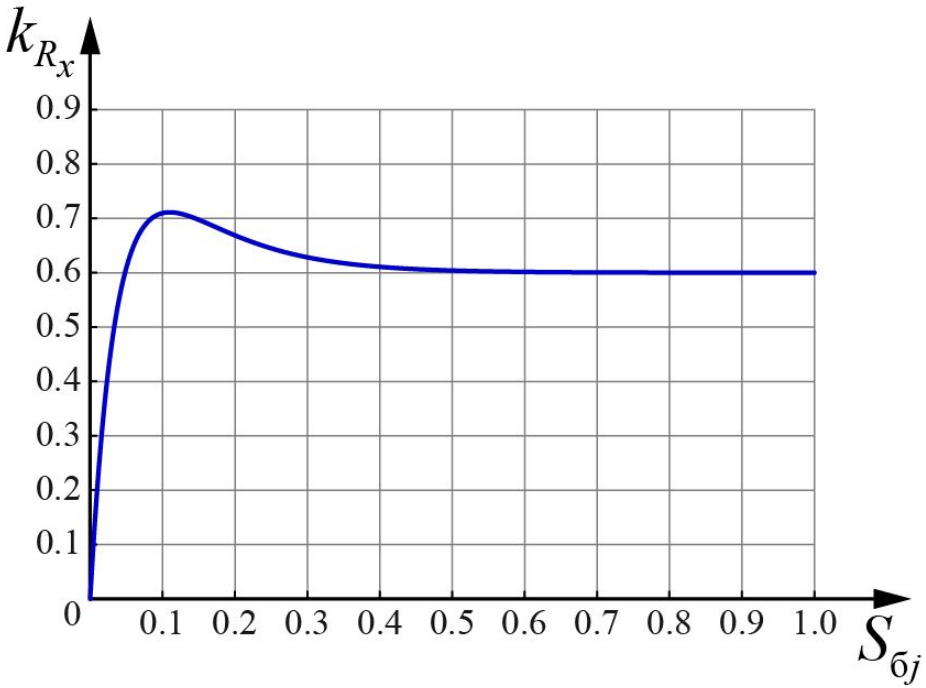
$$k_{R_x} = \varphi \cdot \left(1 - e^{-\frac{S_{бj}}{S_0}}\right) \cdot \left(1 + e^{-\frac{S_{бj}}{S_1}}\right)$$

$$k_{R_x} = \varphi \cdot \left(1 - e^{-\frac{S_{бj}}{S_0}}\right) + a_{ш\text{-}оп} \cdot e^{\frac{-\left(S_{бj} - S_{max}\right)^2}{a}}$$

$$k_{R_x} = \varphi_{бmax} \cdot \left(1 - e^{-C_1 \cdot S_j}\right) - C_2 \cdot S_j$$

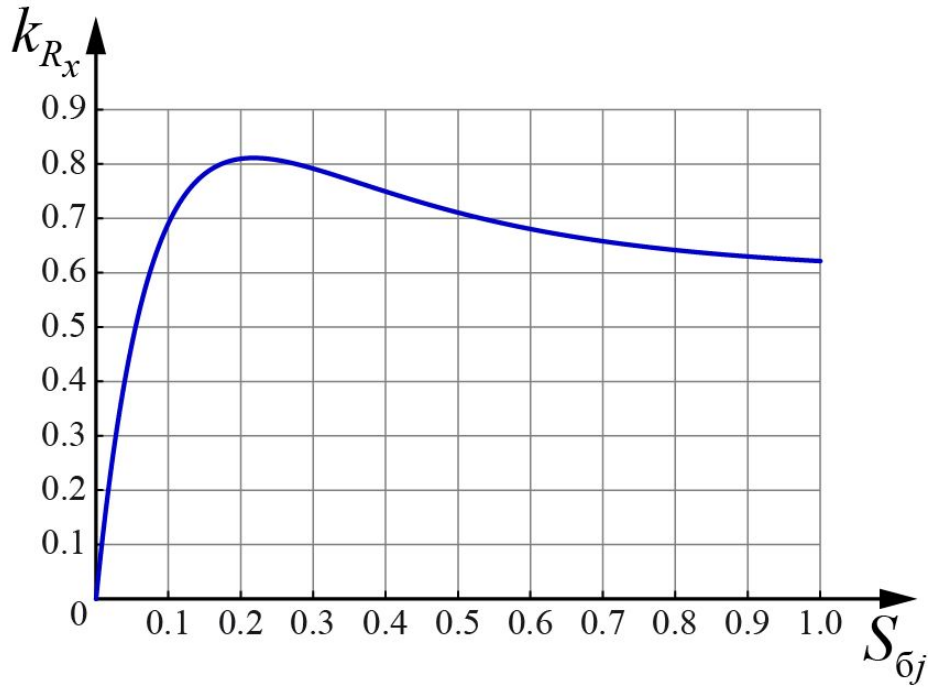
Сцепление колеса с опорной поверхностью

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



$\varphi = 0{,}6;$

$S_0 = 0{,}05;\ S_1 = 0{,}1$

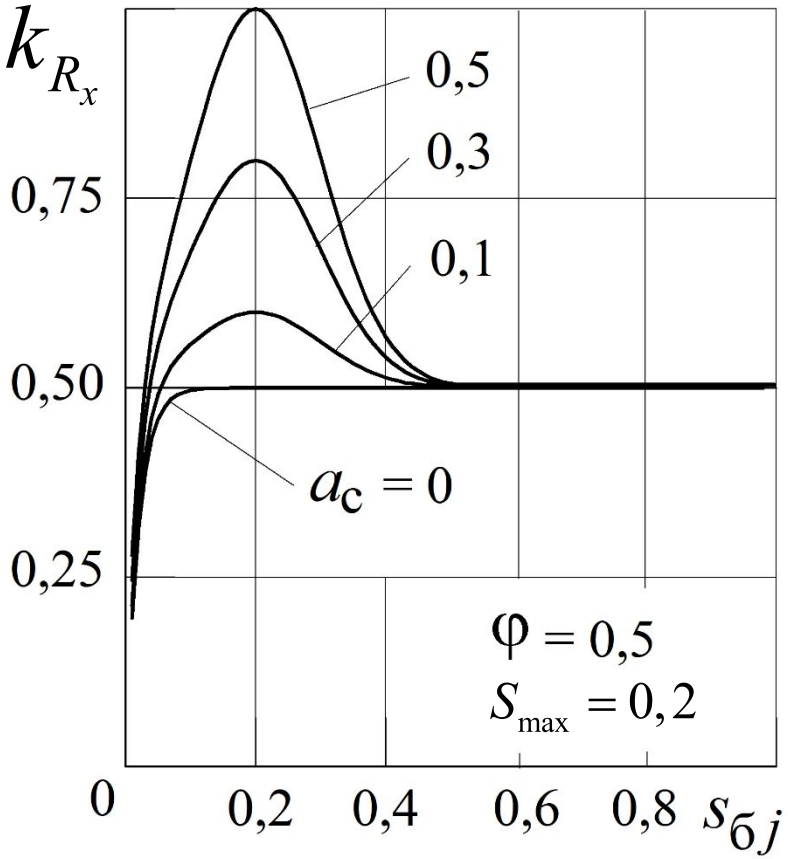


$\varphi = 0{,}6;$

$S_0 = 0{,}09;\ S_1 = 0{,}3$

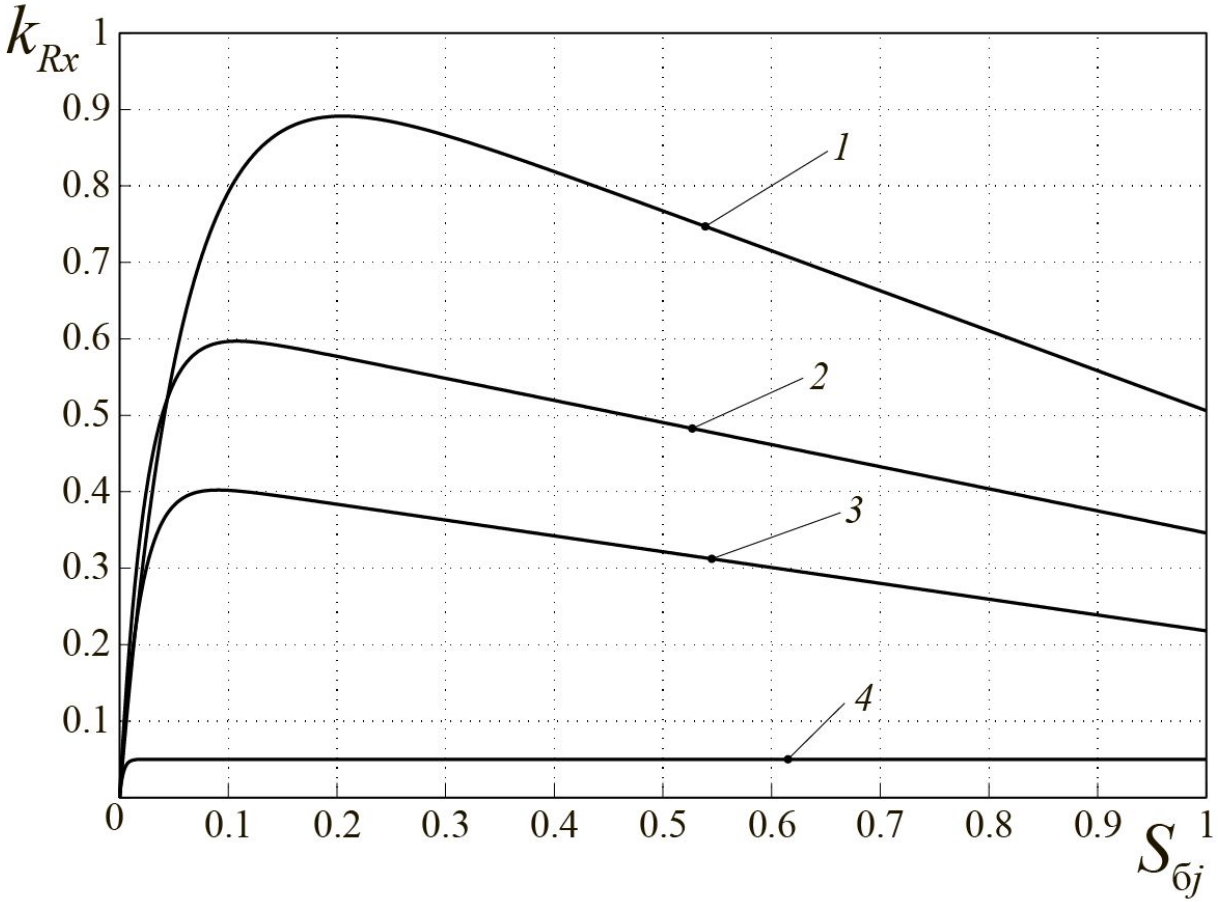
Сцепление колеса с опорной поверхностью

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



Сцепление колеса с опорной поверхностью

$$k_{R_x} = \varphi_{б\max} \cdot \left(1 - e^{-C_1 \cdot S_{бj}}\right) - C_2 \cdot S_{бj}$$



№	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