



# Курс «Транспортная инфраструктура»

---

## Автомобильные дороги и городские улицы

Лекция 4

Пектор

Александр Иванович Солодкий



# Проектирование автомобильных дорог

Категория дороги назначается по СНиП в зависимости от перспективной (на 20 лет) расчетной интенсивности движения.

За расчетную интенсивность движения принимают полученную на основе данных экономических обследований среднегодовую суточную интенсивность движения, суммарную в обоих направлениях, приведенную к легковому автомобилю.

$$N_{\text{пр}} = \sum N_i K_i$$

где  $K_i$  – коэффициенты приведения к легковому автомобилю,  
 $N_i$  – интенсивность движения  $i$ -го типа автомобилей в физ. ед.

Расчетная интенсивность движения назначается на перспективу 20 лет. За начальный год расчетного периода принимают год завершения разработки проекта дороги.



# Проектирование автомобильных дорог

## Коэффициенты приведения к легковому автомобилю

| Типы транспортных средств                 | Коэффициент приведения |
|-------------------------------------------|------------------------|
| Легковые автомобили                       | 1                      |
| Мотоциклы с коляской                      | 0,75                   |
| Мотоциклы и мопеды                        | 0,5                    |
| Грузовые автомобили грузоподъемностью, т: |                        |
| 2                                         | 1,5                    |
| 6                                         | 2                      |
| 8                                         | 2,5                    |
| 14                                        | 3                      |
| св. 14                                    | 3,5                    |
| Автопоезда грузоподъемностью, т:          |                        |
| 12                                        | 3,5                    |
| 20                                        | 4                      |
| 30                                        | 5                      |
| св. 30                                    | 6                      |

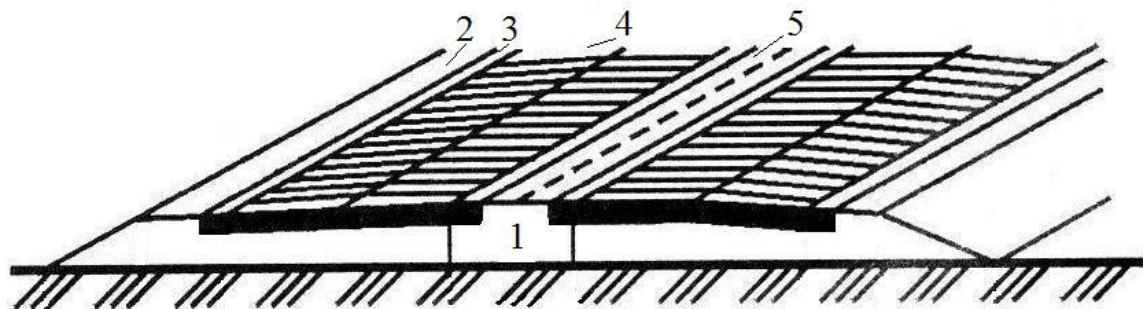
При промежуточных значениях грузоподъемности транспортных средств коэффициенты приведения следует определять интерполяцией.



# Проектирование автомобильных дорог

## Основные элементы дороги

Элементы дороги размещают в пределах полосы местности, которую называют полосой отвода. На поперечном профиле дороги могут быть выделены следующие элементы: полосу поверхности дороги, в пределах которой происходит движение автомобилей, называют проезжей частью.



Элементы поперечного профиля автомобильной дороги с двумя проезжими частями и разделительной полосой:  
1 – земляное полотно; 2 – обочина; 3 – краевая полоса;  
4 – проезжая часть; 5 – разделительная полоса



# Проектирование автомобильных дорог

## Требования, предъявляемые автомобилем к дороге

Дорогу в плане и продольном профиле надлежит проектировать из условия наименьшего ограничения и изменения скорости, обеспечения безопасности и удобства движения.

При назначении элементов плана и продольного профиля в качестве основных параметров следует принимать:

- *продольные уклоны* – не более 30 ‰;
- *расстояние видимости для остановки автомобиля* – не менее 450 м;
- *радиусы кривых в плане* – не менее 3000 м;
- *радиусы выпуклых вертикальных кривых* – не менее 70000 м;
- *радиусы вогнутых вертикальных кривых* – не менее 8000 м;

Если по условиям местности не представляется возможным выполнить эти требования или выполнение их связано со значительными объемами работ и стоимостью строительства дороги, то при проектировании допускается снижать нормы на основе технико-экономического сопоставления вариантов.



# Проектирование автомобильных дорог

---

## Требования, предъявляемые автомобилем к дороге

Наиболее важные факторы, влияющие на режим движения автомобиля:

- динамические качества автомобиля;
- дорожные условия, обеспечивающие возможность развить ту или иную скорость;
- индивидуальные психофизиологические особенности восприятия дорожной обстановки водителем.

На стадии проектирования для обеспечения возможности безопасного проезда с расчетными скоростями необходим комплексный учет указанных факторов.



# Проектирование автомобильных дорог

## Требования, предъявляемые автомобилем к дороге

*Автомобилем к дороге предъявляются следующие требования:*

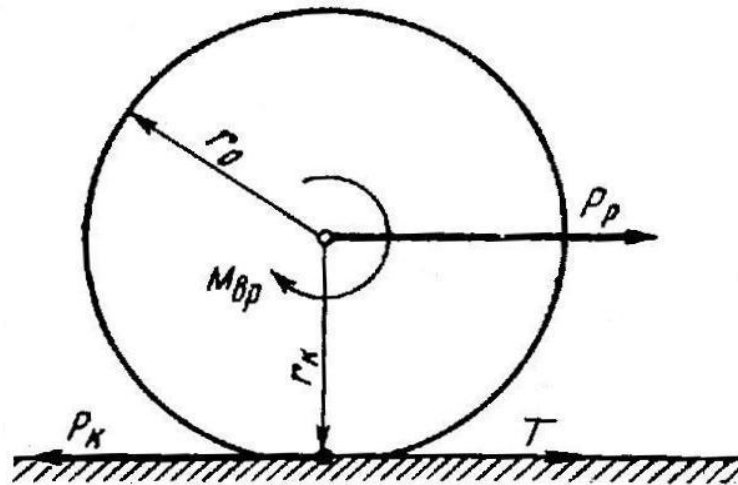
- обеспечение возможности безопасного движения автомобилей с расчетными скоростями;
- обеспечение пропуска заданной перспективной интенсивности движения;
- обеспечение пропуска автомобилей заданной грузоподъемности без накопления пластических деформаций и разрушения дорожной одежды в пределах срока службы покрытия.
- обеспечение комфорта движения для водителей и пассажиров;
- дорога должна гармонично вписываться пейзаж, просматриваться по ходу движения, не имея провалов, на расстояние не менее расстояния видимости автомобиля;
- окружающая дорожная обстановка должна нести оптимум информации, не перегружая сознания водителей, но и не давая ему возможности впасть в заторможенное состояние.



# Проектирование автомобильных дорог

## Основы теории движения автомобиля

Вращающий момент на коленчатом валу двигателя через сцепление и коробку передач передается коленчатому валу и далее на ведущие колеса автомобиля и вызывает появление пары сил.



Первая – окружная сила  $P_k$ , передаваясь на покрытие, направлена в сторону обратную движению,

вторая – сила тяги автомобиля  $P_p$ , направлена в сторону движения и вызывает вращение колес автомобиля



# Проектирование автомобильных дорог

## Основы теории движения автомобиля

Окружная сила  $P_k$ , передаваясь на покрытие, направлена в сторону обратную движению, вторая – сила тяги автомобиля  $P_p$ , направлена в сторону движения и вызывает вращение колес автомобиля

$$P_k = P_p = M_{вр} / r_k$$

где  $M_{вр}$  – крутящий момент на ведущих колесах,

$r_k$  – радиус ведущего колеса с учетом деформации шины ( $r_k = 0,93-0,97)r$ ).

При достаточном сцеплении колеса автомобиля с дорогой в плоскости контакта действует сила реакции дороги  $T$ , равная силе тяги и направленная в сторону движения. Только при выполнении условия  $T \geq P_k$  возможно поступательное движение автомобиля без проскальзывания и пробуксовки колес.



# Проектирование автомобильных дорог

## Основы теории движения автомобиля

Тяговое усилие затрачивается на преодоление сил сопротивления движению.

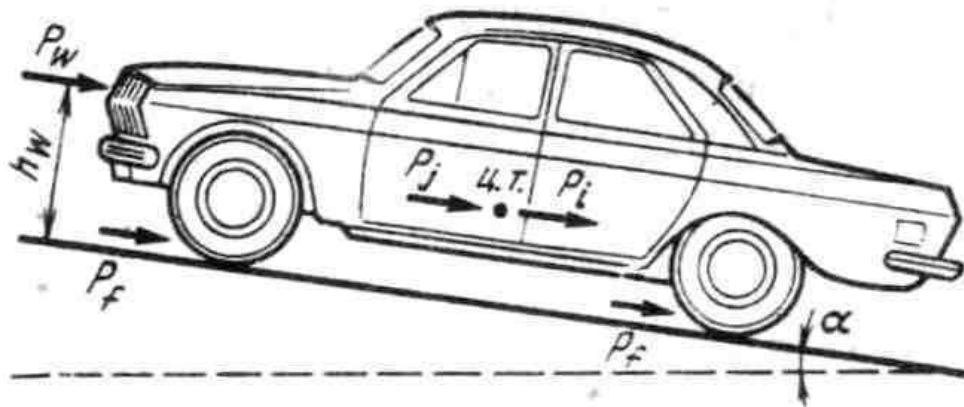
В общем случае при движении автомобиль преодолевает следующие различные сопротивления:

сопротивление качения  $P_f$ ;

сопротивление воздушной среды  $P_w$ ;

сопротивление при движении на подъем  $P_i$ ;

сопротивление инерции при переменной скорости движения  $P_j$ .





# Проектирование автомобильных дорог

## Основы теории движения автомобиля

Сопротивление качению  $P_f$  вызывается затратой мощности двигателя на деформацию покрытия и шины, на преодоление трения между шиной и поверхностью покрытия и потерями мощности, при ударах колес о неровности дороги

$$P_f = fG,$$

где  $f$  – коэффициент сопротивления качению зависит от состояния поверхности покрытия, давления воздуха в шинах и скорости движения.

Коэффициент сопротивления качению уменьшается с увеличением жесткости покрытия и давления воздуха в шине. Неровности поверхности покрытия увеличивают сопротивление качению, поскольку при наезде колеса на выступы и при падении его во впадины покрытия происходят удары, вызывающие потерю кинетической энергии, пропорционально квадрату скорости.



# Проектирование автомобильных дорог

## *Основы теории движения автомобиля*

### Коэффициенты качения в зависимости от типа покрытия

| Тип покрытия                         | Коэффициент качения $f$ |
|--------------------------------------|-------------------------|
| Цементобетонные и асфальтобетонные   | 0,01 – 0,02             |
| Черные щебеночные и черные гравийные | 0,02 – 0,025            |
| Щебеночные                           | 0,03 – 0,05             |
| Грунтовые ровные и сухие             | 0,04 – 0,05             |
| Грунтовые неровные увлажненные       | 0,07 – 0,15             |
| Сыпучие пески                        | 0,15 – 0,30             |

Неровности поверхности покрытия увеличивают сопротивление качению, поскольку при наезде колеса на выступы и при падении его во впадины покрытия происходят удары, вызывающие потерю кинетической энергии, пропорционально квадрату скорости.



# Проектирование автомобильных дорог

## Основы теории движения автомобиля

Сопротивление воздушной среды  $P_w$  вызывается затратой энергии двигателя на перемещение частиц воздуха. При движении автомобиль встречает противодействие встречного воздуха на переднюю часть (лобовое сопротивление), энергия затрачивается на трение воздуха о боковые поверхности, сопротивление создается выступающими частями автомобиля.

Наличие попутного ветра уменьшает, а встречного увеличивает сопротивление воздуха.

Сила сопротивления воздушной среды определяется по формуле,

$$P_w = \frac{\kappa \cdot F \cdot V^2}{13}$$

где  $V$  – скорость в км/ч;

13 – коэффициент для перехода размерности ( $3,6^2 \approx 13$ );

$F$  – лобовая проекция кузова, на плоскость перпендикулярную направлению движения  $F = 0,8BH$  ( $B$  и  $H$  – габаритные размеры автомобиля);

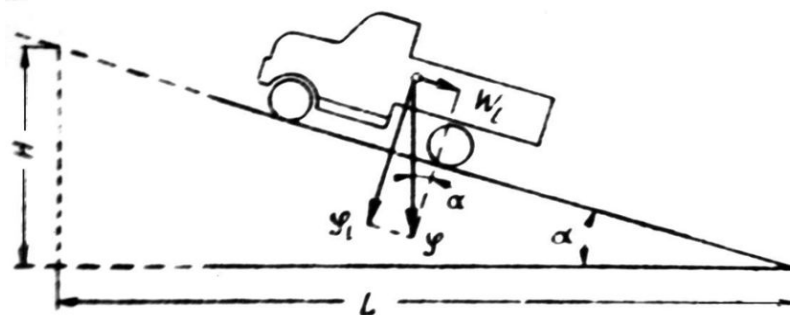
$\kappa$  – коэффициент сопротивления воздушной среды, учитывающий упругость воздуха и обтекаемость кузова



# Проектирование автомобильных дорог

## Основы теории движения автомобиля

Сопротивление движению на подъеме  $P_i$  возникает при движении автомобиля вверх по наклонной плоскости, поскольку необходимо выполнить дополнительную работу по подъему автомобиля на высоту  $H$ . При движении на уклонах силу тяжести веса автомобиля раскладывают на две силы: перпендикулярную направлению движения (давление автомобиля на покрытие) и параллельную направлению поверхности дороги, направленную в сторону, противоположную подъему.



При движении вверх по уклону автомобилю сопротивление движения равно

$$P_i = G \sin a \approx G \operatorname{tg} a \approx G i,$$

поскольку при малых углах  $\sin a \approx \operatorname{tg} a \approx i$ .



# Проектирование автомобильных дорог

## Основы теории движения автомобиля

Инерционное сопротивление возникает при трогании автомобиля с места и при ускоренном или замедленном движении (разгоне или торможении) за счет действия инерционных сил, препятствующих изменению первоначального состояния автомобиля (1 закон Ньютона). Сопротивление инерционных сил складывается из силы инерции поступательного движения автомобиля и инерции его вращающихся частей.

$$P_j = \delta m \frac{dv}{dt} = \delta \frac{G}{g} \frac{dv}{dt} = \delta \cdot G \cdot j,$$

где  $m = \frac{G}{g}$  – масса автомобиля;

$j = \frac{1}{g} \frac{dv}{dt}$  – относительное ускорение;

$\delta$  – коэффициент, учитывающий влияние инерции вращающихся масс автомобиля, равный 1,03 – 1,07 – для прямой передачи и 1,6 – 2,0 – для низких передач.

При замедлении движения ускорение изменяет знак, то есть инерционные силы будут способствовать движению.



# Проектирование автомобильных дорог

## Основы теории движения автомобиля

В общем случае движение возможно, если тяговое усилие больше всех сил сопротивления движению.

Уравнение движения, характеризующее равенство внешних и внутренних сил, имеет вид:

$$P_P = P_f + P_w \pm P_i \pm P_j = G \cdot f + \frac{\kappa \cdot V^2 \cdot F}{13} \pm G \cdot i \pm \delta \cdot G \cdot j$$

Это уравнение иначе называют уравнением тягового баланса автомобиля.

В левой его части активная сила – тяговое усилие, в правой части пассивные силы – сопротивления движению.

Первое и второе слагаемые всегда входят в уравнение со знаком «+», третье и четвертое могут иметь разные знаки или отсутствовать в зависимости от режима движения автомобиля и направления движения по продольному уклону дороги (вверх или вниз).



# Проектирование автомобильных дорог

## Сцепление колес автомобиля с поверхностью дороги

Движение автомобиля по дороге будет происходить без проскальзывания и буксования, если сила тяги будет равна или меньше силы трения (сцепления) между ведущими колесами и поверхностью дороги  $T$ . Максимальная сила сцепления (или реакции дороги)  $T$  пропорциональна нагрузке на ведущие колеса автомобиля

$$T_{max} = \varphi G_{сц},$$

где  $\varphi$  – коэффициент сцепления колеса с дорогой.

Условие движения автомобиля без проскальзывания и буксования имеет вид:

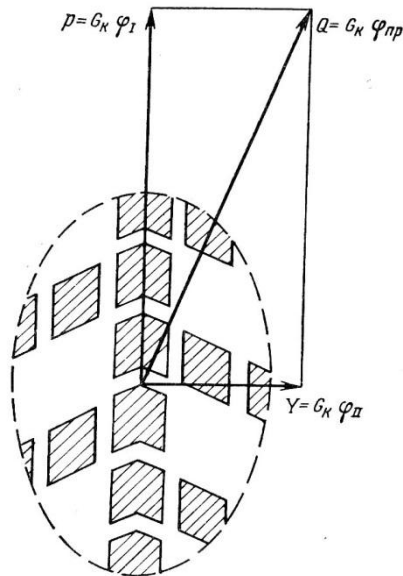
$$P_k = P_p \leq T_{max} = \varphi G_{сц}.$$



# Проектирование автомобильных дорог

Различают два вида коэффициента сцепления при движении автомобиля на кривой в плане:

- коэффициент продольного сцепления  $\varphi_1$ , соответствующий началу пробуксовывания колеса при его качении в плоскости движения без боковой силы;
- коэффициент поперечного сцепления  $\varphi_2$ , при движении колеса под углом к плоскости движения, когда колеса одновременно вращаются и скользят вбок то есть автомобиль движется по криволинейной траектории.



Силы, действующие на автомобиль в плоскости дороги при движении по криволинейной траектории



# Проектирование автомобильных дорог

## Сцепление колес автомобиля с поверхностью дороги

От величины продольного коэффициента сцепления  $\varphi_1$  зависит безопасность движения при торможении автомобиля, от величины поперечного коэффициента сцепления  $\varphi_2$  безопасность от заноса в бок. Величина коэффициента сцепления зависит от типа и состояния поверхности покрытия.

Минимальные значения коэффициентов сцепления на дорогах I – III категорий при увлажненной поверхности покрытия и скорости движения 60 км/ч не должны быть менее:

- для легких условий движения ( $R > 1000$  м,  $i < 30$  ‰) – 0,45;
- для затрудненных условий ( $250 < R < 1000$  м,  $30$  ‰  $< i < 60$  ‰) – 0,5 – 0,45;
- для опасных условий движения (участки с видимостью меньшей, чем расчетная, с уклонами более допустимых, в зоне пересечения в одном уровне) – 0,6.

Для возможности **безопасного движения** необходимо и достаточно, чтобы выполнялись два условия:

- Сила тяги должна быть больше или равна всех сил сопротивления движению  $P_p > \Sigma P_i$ ;
- Сила тяги должна быть меньше или равна максимально возможной силе сцепления  $P_p \leq T = \varphi G_{сц.}$



# Проектирование автомобильных дорог

## Сцепление колес автомобиля с поверхностью дороги

### Коэффициент сцепления $\varphi$

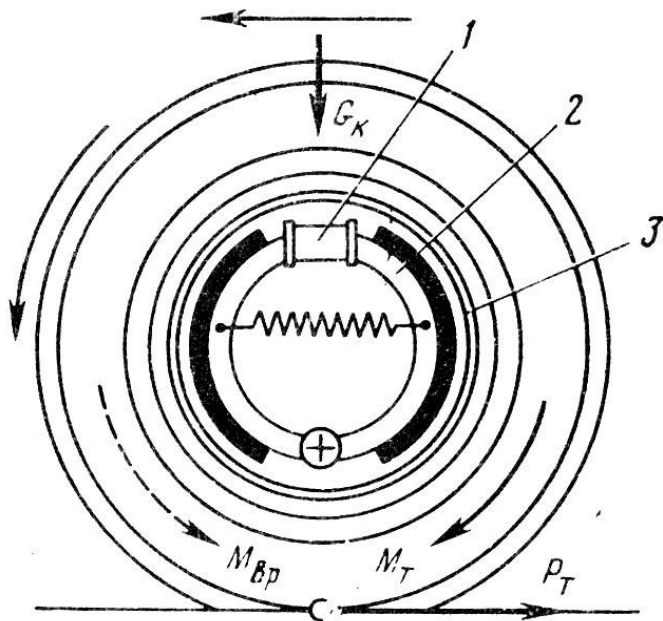
| Покрытие                                        | Состояние покрытия |           |           |             |
|-------------------------------------------------|--------------------|-----------|-----------|-------------|
|                                                 | Сухое              | Влажное   | Мокрое    | Обледенелое |
| Асфальтобетонное, цементобетонное               | 0,6 – 0,7          | 0,4 – 0,3 | 0,3 – 0,2 | 0,1 – 0,05  |
| Щебеночное, обработанное органическими вяжущими | 0,7 – 0,8          | 0,6       | 0,5       | 0,1 – 0,05  |
| Щебеночное и гравийное                          | 0,6 – 0,7          | 0,4 – 0,3 | 0,3       | 0,1 – 0,05  |
| Грунтовое                                       | 0,5 – 0,6          | 0,4 – 0,3 | 0,3       | 0,1 – 0,05  |



# Проектирование автомобильных дорог

## Торможение автомобиля

В процессе торможения автомобиля вместо вращающего момента на ведущие колеса автомобиля подается тормозной момент



Силы, действующие на колесо при торможении:

1 – тормозные цилиндры, прижимающие тормозные колодки к барабану;

2 – тормозная колодка;

3 – тормозной барабан;

$M_{вp}$  – крутящий момент;

$P_T$  – тормозная сила;

$M_T$  – тормозной момент;

$G_k$  – вес автомобиля, приходящийся на колесо



# Проектирование автомобильных дорог

Уравнение движения при торможении имеет вид:

$$-P_T = P_f + P_w \pm P_i - P_j$$

Величина тормозной силы определяется из выражения:

$$P_T = \gamma_T G,$$

где  $\gamma_T$  – коэффициент удельной тормозной силы, равный отношению суммы тормозных сил, возникающих на всех тормозных колесах, к весу автомобиля.

Решим уравнение движения относительно отрицательного ускорения  $j$ :

$$j = \frac{1}{\delta} \left( \frac{P_w}{G} + \gamma_T \pm i + f \right).$$

В современных автомобилях с тормозами на всех колесах при аварийном торможении, предельная величина  $\gamma_T$  равна коэффициенту сцепления шины с покрытием  $\phi$  при движении по прямолинейному участку дороги и  $\phi_1$  – при движении по кривой в плане.

Поскольку при торможении скорость автомобиля резко снижается сопротивлением воздуха можно пренебречь, тогда при  $\delta = 1$  (прямая передача)

$$j = (\phi \pm i + f).$$



# Проектирование автомобильных дорог

При назначении геометрических элементов дорог нормируется величина пути, на которой водитель может остановить автомобиль, движущийся с расчетной скоростью. Путь полного торможения можно найти по формуле равнозамедленного движения

$$v = \sqrt{2aS_m}$$

где  $a$  – абсолютное отрицательное ускорение, м/с<sup>2</sup>

$$a = gj = g(\varphi \pm i + f).$$

Итак, тормозной путь при  $v$  в м/с

$$S_m = \frac{v^2 \cdot K_9}{2g(\varphi \pm f \pm i)}$$

где  $K_9$  – коэффициент эффективности торможения, учитывающий эксплуатационное состояние тормозов, равен 1,2 для легковых автомобилей и 1,3 – 1,4 для грузовых автомобилей.



# Проектирование автомобильных дорог

---

## Заключение

Технические параметры и геометрические элементы дороги ( $\varphi$ ,  $f$ ,  $i$ ) должны назначаться с учетом динамических особенностей движения автомобиля по дороге. Только в этом случае может быть обеспечена минимальная себестоимость перевозок, безопасность и комфорт движения автомобилей по дороге.



**СПАСИБО  
ЗА ВНИМАНИЕ!**



# Проектирование автомобильных дорог

Везде, где это не вызывает существенного удорожания работ, следует трассировать дорогу с радиусами более 3000 м, причем тем большими, чем меньше угол поворота.

Условия движения автомобиля по кривым радиуса  $R \geq 3000$  м не отличается от условий движения по прямым участкам.

Радиусы порядка 3000–2000 м обеспечивают хорошие условия движения скорости с учетом перспективного развития транспортных средств.

Радиусы от 2000 до 600 м удовлетворительны для современного движения, но требуют устройства дополнительных мероприятий для повышения устойчивости автомобиля: переходных кривых и виража.

Радиусы от 600 до 200 м допустимы на дорогах только II – III категорий в сложных условиях.

Радиусы менее 250–200 м применимы в исключительных случаях в пересеченной и горной местности.