

Шаршембиев Ж.С.

**ОБОСНОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ  
КОЛЕСНЫХ МАШИН ПО БОКОВОМУ СКОЛЬЖЕНИЮ НА ОПАСНЫХ  
ПОВОРОТАХ ГОРНЫХ ДОРОГ**

Zh.S. Sharshembiev

**SUBSTANTIATION OF THE CRITICAL VELOCITY  
OF MOTION OF THE WHEEL OF CARS ON THE SIDE SLIP ON DANGEROUS  
BENDS MOUNTAIN ROADS**

УДК:629.016: 625.032.37 (23)

*В статье предложены зависимости по определению критической скорости движения колесных машин на опасных поворотах горных дорог с продольными и поперечными уклонами.*

*The article offered depending on the definition of the critical velocity of motion of the wheel machines in hazardous turns mountain roads with longitudinal and transverse slopes.*

При изучении устойчивости колесных машин на опасных поворотах горных дорог нужно рассматривать условия устойчивости движения по боковому скольжению и поперечному опрокидыванию.

Неустойчивость по угловой скорости поворота происходит из-за боковых деформаций шин, скольжением ведомых и ведущих колес.

Особенно на крутых поворотах горных дорог могут возникнуть опрокидывание колесной машины или боковое скольжение, которые зависят от критической скорости движения.

По результатам аналитического обзора специальных литератур выявлено, что до настоящего времени практически отсутствует общепринятая система оценки устойчивости колесных машин на опасных поворотах горных дорог. На таких участках в качестве показателями устойчивости можно принимать критические параметры движения и положения колесной машины.

К критическим параметрам оценки устойчивости движения колесных машин можно отнести [1,2,3,4,5]:

- 1) критические скорости движения колесной машины по боковому скольжению и по боковому опрокидыванию;
- 2) критические углы поперечного уклона дороги по боковому скольжению и по боковому опрокидыванию;
- 3) коэффициент поперечной устойчивости колесной машины.

Если колесная машина движется по прямой дороге с постоянной скоростью, то благодаря наличию у него определенного количества кинетической энергии будет продолжаться ее прямолинейное движение. При появлении поворота, к колесной машине нужно приложить радиальную силу направленную к центру кривой, известную под названием центробежной силы. Центробежная сила на повороте горных дорог  $F_{цб}$  можно вычислить по следующей формуле

$$F_{цб} = m_{клг} v^2 / R \quad (1)$$

где  $m_{клг}$  – масса колесной машины,  $v$  – скорость движения,  $R$  – радиус кривой на повороте.

Скорость движения колесных машин по кривой ограничивается, так как при высоких скоростях происходит занос колесной машины к наружному краю дороги. Для каждой кривой существует критическая скорость, при которой колесные машины заносит из-за действующей на них центробежной силы. Профессиональный водитель может преодолеть закругление со скоростью, превышающей критическую, используя боковой увод шин, или так называемый «контролируемый занос», в результате которого на любом дорожном покрытии с достаточно высоким коэффициентом сцепления остаются хорошо видимые следы проскальзывания шин.

При эксплуатации колесных машин в горных условиях, по маршруту движения встречаются множество поворотов с поперечными уклонами и без. В начале рассмотрим процесс поворота колесной машины на горной дороге без поперечного уклона.

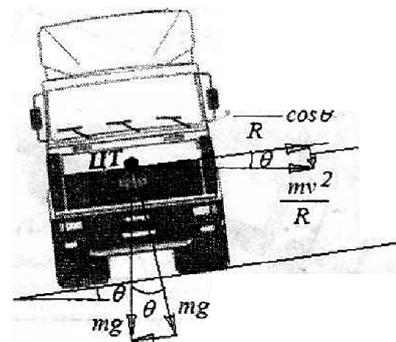
При движении на повороте колесная машина начинает скользить, когда центробежная сила стремящаяся сдвинуть ее к обочине, превосходит силу сцепления  $F_{сц}$  между шинами и дорогой, удерживающую колесную машину на ее траектории (рис.1).

Следовательно, на критической скорости центробежная сила, параллельная поверхности дороги, равна силе сцепления между шиной и дорогой, т.е.

$$m_{км} v^2 / R = \varphi m_{км} g \quad (2)$$

Из условия (424) находим критическую скорость движения колесной машины на опасных поворотах горных дорог без поперечного уклона

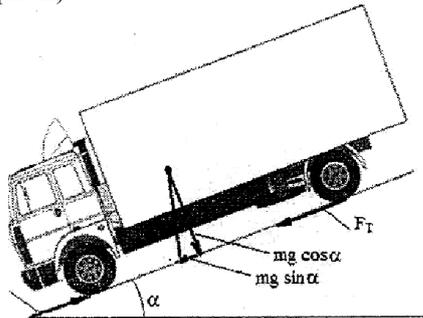
$$v_{кр} = \sqrt{\varphi g R} \quad (3)$$



**Рис.1.** Схема сил, возникающих при движении по кривой с горизонтальной поверхностью горной дороги:  $F_{цб} = m_{км} v^2 / R$  – центробежная сила;  $F_{сц} = m_{км} g \varphi = G_{км} \varphi$  – сила сцепления шины с дорогой.

Однако, при движении колесной машины на спуск с сочетанием поворота водитель в целях пре-

дотвращения бокового скольжения колес, сохранения поперечной устойчивости и обеспечения безопасности движения применяет служебное торможение (рис.2).



**Рис.2.** Схема сил, возникающих при движении по кривой на спуске горной дороги с горизонтальной поверхностью:  $F_T = ma$ - движущая сила, сила тяги на ведущих колесах;  $F_f = \varphi mg \cos \alpha$ - сила сопротивления качению;  $mg \sin \alpha$  - составляющая силы тяжести колесной машины.

Коэффициент сцепления для случая служебного торможения колесной машины на спуске и подъеме как показано на рис. 2, силы, способствующие движению колесной машины  $F_T = ma$  и  $mg \sin \alpha$ . Сила, противодействующая движению,  $F_f = \varphi mg \cos \alpha$ .

Указанные силы взаимно уравниваются:

$$\varphi mg \cos \alpha = ma + mg \sin \alpha; \text{ отсюда}$$

$$\varphi = \frac{ma + mg \sin \alpha}{mg \cos \alpha} = \frac{a}{g \cos \alpha} + \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}$$

Подставляя  $v^2/2Sg$  вместо  $a$  и имея в виду, что  $\sin \alpha / \cos \alpha = \operatorname{tg} \alpha$ , получим:

$$\varphi = \frac{v^2}{2Sg \cos \alpha} + \operatorname{tg} \alpha; \varphi - \operatorname{tg} \alpha = \frac{v^2}{2Sg \cos \alpha};$$

$\cos \alpha$  имеет значение, близкое к единице и, следовательно, может не приниматься во внимание. Поэтому

$$\varphi - \operatorname{tg} \alpha \approx \frac{v^2}{2Sg}$$

Но на горизонтальной дороге  $\varphi = v^2/2Sg$ . и поэтому эффективный коэффициент сцепления для случая движения под углом на спуск  $\varphi_{\text{спуск}} \approx \varphi - \operatorname{tg} \alpha$ . Он может быть использован в вычислениях так же, как и для случая движения по горизонтальной дороге.

Подобно этому эффективный коэффициент сцепления для случая движения на подъем  $\varphi_{\text{подъем}} = (\varphi + \operatorname{tg} \alpha)$ . Доказательство такое же, как в случае движения на спуск.

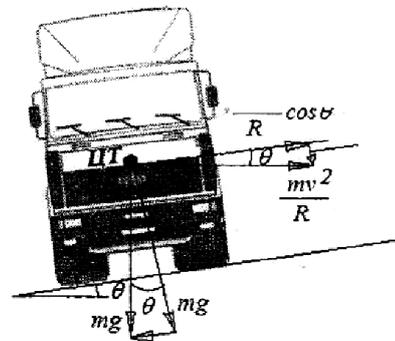
Таким образом, подставляя значение  $\varphi$  в формулу (3) находим критическую скорость движения колесной машины на спуске опасных поворотах горных дорог без поперечного уклона

$$v_{\text{кр}} = \sqrt{(\varphi - \operatorname{tg} \alpha) g R} \quad (4)$$

на подъеме опасных поворотах горных дорог без поперечного уклона

$$v_{\text{кр}} = \sqrt{(\varphi + \operatorname{tg} \alpha) g R} \quad (5)$$

Теперь рассмотрим движение колесной машины на поворотах горных дорог с поперечным уклоном (рис.3).



**Рис.3.** Схема сил, возникающих при движении по кривой с поперечным уклоном горной дороги или виражом:  $\theta$  - угол поперечного уклона горной дороги.

Как видно из рис.3  $mg \cos \theta$  - составляющая силы тяжести, действующей на колесную машину, перпендикулярная к поверхности дороги;  $mg \sin \theta$  - составляющая силы тяжести, параллельная поверхности дороги;  $mv^2/R$  - центробежная сила, действующая на колесную машину;  $(mv^2/R) \cos \theta$  - составляющая центробежной силы тяжести, действующая на колесную машину параллельно поверхности дороги;  $(mv^2/R) \sin \theta$  - составляющая центробежной силы тяжести, действующая перпендикулярно к поверхности дороги.

Уравнивающие друг друга силы, действующие параллельно поверхности дороги:

$$\frac{mv^2}{R} \cos \theta - mg \sin \theta = \varphi mg \cos \theta + \frac{\varphi mv^2}{R} \sin \theta;$$

$$\frac{mv^2}{R} \cos \theta - \frac{\varphi mv^2}{R} \sin \theta = \varphi mg \cos \theta + mg \sin \theta;$$

$$\frac{mv^2}{R} (\cos \theta - \varphi \sin \theta) = mg (\varphi \cos \theta + \sin \theta).$$

Для упрощения обе части равенства разделим на  $\cos \theta$ :

$$\frac{mv^2}{R} \left( \frac{\cos \theta}{\cos \theta} - \frac{\varphi \sin \theta}{\cos \theta} \right) = mg \left( \frac{\varphi \cos \theta}{\cos \theta} + \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \right);$$

$$\frac{mv^2}{R} (1 - \varphi \operatorname{tg} \theta) = mg (\varphi + \operatorname{tg} \theta).$$

Решая относительно скорости движения получим

$$v^2 = \frac{mgR (\varphi + \operatorname{tg} \theta)}{m(1 - \varphi \operatorname{tg} \theta)}; \text{ тогда } v_{\text{кр}} = \sqrt{Rg \frac{\varphi + \operatorname{tg} \theta}{1 - \varphi \operatorname{tg} \theta}}.$$

Подставляя значения  $\varphi$  на спуске в формулу (6) находим критическую скорость движения колесной машины на спуске опасных поворотах горных дорог с поперечным уклоном:

$$v_{\text{кр}} = \sqrt{Rg \frac{(\varphi - \operatorname{tg} \alpha) + \operatorname{tg} \theta}{1 - (\varphi - \operatorname{tg} \alpha) \operatorname{tg} \theta}}.$$

Аналогично, подставив значения  $\varphi$  на подъеме в формулу (6) находим критическую скорость движения колесной машины на подъеме опасных поворотах горных дорог с поперечным уклоном:

$$v_{\text{кр}} = \sqrt{Rg \frac{(\varphi + \operatorname{tg} \alpha) + \operatorname{tg} \theta}{1 - (\varphi + \operatorname{tg} \alpha) \operatorname{tg} \theta}}.$$

Для определения радиуса кривой или поворота применяем метод хорды. С помощью рулетки измеряется расстояние хорды AC, отмечается положение срединной точки D, определяется и записывается длина  $a$  отрезка AD. Затем измеряется и записывается

ся длина  $h$  отрезка BD. Радиус кривой ABC подсчитывается по формуле:

$$R = (a^2 + h^2) / 2h$$

При измерениях на месте и вычислениях должны быть приняты во внимание такие факторы, как езда по своей стороне или поворот по всей ширине дороги.

Используя формулы (4), (5), (7) и (8) для различных значений радиусов поворотов горных автомобильных дорог поперечным уклоном или без уклона можно

определить критические скорости движения колесных машин по условиям их поперечной устойчивости.

В табл.1 приведены результаты расчета по определению критической скорости движения колесных машин на спуске и подъеме по условиям их поперечной устойчивости на опасных поворотах горной автомобильной дороги Бишкек-Туя-Ашуу- Суусамыр-Отмек-Талас для разных числовых значений радиусов кривых.

Таблица 1

Результаты расчета по определению критической скорости движения колесных машин на спуске с продольным уклоном 5° по условиям их поперечной устойчивости (боковое скольжение) на опасных поворотах горной дороги Бишкек-Туя-Ашуу-Суусамыр-Отмек-Талас

без поперечного уклона			с поперечным уклоном									
R, м	□	км/ч	v <sub>крит</sub> , км/ч	□	км/ч	□	v <sub>кп</sub> , км/ч	0.°	v <sub>кп</sub> , км/ч	□	v <sub>кп</sub> , км/ч	
150	0,8	117	5	127	Q	134	10	139	12	144	15	152
	0,6	99		109		116		120		125		131
	0,4	77		89		95		99		104		110
	0,2	46		62		70		75		80		86
125	0,8	106	5	116	Q	123	10	127	12	132	15	139
	0,6	90		100		106		110		114		120
	0,4	70		81		87		91		94		100
	0,2	42		57		64		68		73		79
100	0,8	95	5	104	O	110	10	114	12	118	15	124
	0,6	81		89		95		98		102		107
	0,4	63		72		78		81		85		90
	0,2	38		51		57		61		65		71
80	0,8	85	5	93	8	98	10	102	12	105	15	111
	0,6	72		80		85		88		91		96
	0,4	56		65		69		72		76		80
	0,2	34		45		51		55		58		63
60	0,8	74	5	81	o	85	10	88	12	91	15	96
	0,6	62		69		73		76		79		83
	0,4	49		56		60		63		65		69
	0,2	29		39		44		47		50		55
50	0,8	67	5	74	o	78	10	80	12	83	15	88
	0,6	57		63		67		69		72		76
	0,4	45		51		55		57		60		63
	0,2	27		36		40		43		46		50
40	0,8	60	5	66	8	69	10	72	12	74	15	78
	0,6	51		56		60		62		64		68
	0,4	40		46		49		51		53		57
	0,2	24		32		36		39		41		45
30	0,8	52	5	57	o	60	10	62	12	64	15	68
	0,6	44		49		52		54		56		59
	0,4	35		40		42		44		46		49
	0,2	21		28		31		34		36		39

Примечание: R - радиус поворота, □□□ коэффициент сцепления, v<sub>крит</sub> - критическая скорость движения колесной машины, □ □ □ поперечный уклон дороги.

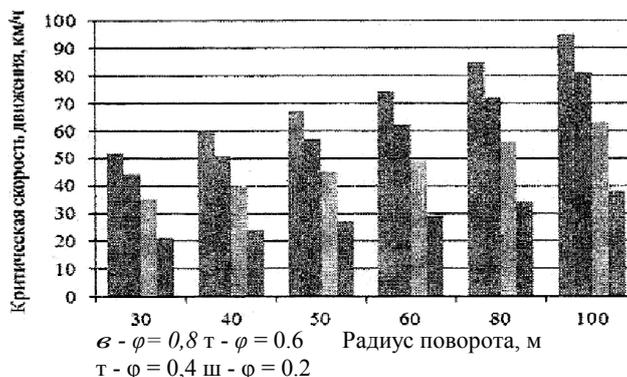


Рис. 4. Динамика ограничения скорости движения колесных машин на спуске с продольным уклоном 5° на опасных поворотах горной дороги Бишкек - Туя-Ашуу- Суусамыр - Отмек -Талас без поперечного уклона в зависимости от радиуса поворота и коэффициента сцепления шин с дорогой

Как видно из диаграммы показанной на рис.4, на опасных поворотах с малыми радиусами с уменьшением радиуса поворота также снижается скорость ограничения движения колесных машин на спуске с продольным уклоном  $5^\circ$  на опасных поворотах горных автомобильных дорог. Тип и состояние горной дороги характеризует коэффициент сцепления шин с дорогой. Например, при  $\phi = 0,8$ , т.е. сухой асфальто-бетонной дороге ограничение скорости движения колесной машины на спуске с продольным уклоном  $5^\circ$  на повороте с радиусом кривизны 30 м составляет 52 км/ч, при  $\phi = 0,6$ , т.е. мокрой асфальто-бетонной дороге ограничение скорости движения составляет 44 км/ч, при  $\phi = 0,4$ , т.е. заснеженной асфальто-бетонной дороге ограничение скорости составляет 35 км/ч, при  $\phi = 0,2$ , т.е. на гололеде ограничение скорости движения колесной машины составляет 21 км/ч.

Данные табл. 1 и диаграммы (рис.4) можно на практике успешно применять в целях обеспечения безопасности дорожного движения на опасных поворотах с малым числовым значением с установкой дорожных знаков ограничения соответствующей скорости движения.

#### Литература:

1. Гришкевич А.И. Автомобили. Теория. Мн.: Высшая школа, 1986. -208 с.
2. Тарасик В.П. Теория движения автомобиля. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. -478с.
3. Литвинов А.С. Автомобиль. Теория эксплуатационных свойств. - М.Машиностроение, 1989. -240 с.
4. Г.Б. Безбородова, В.Г.Галушко. Моделирование движения автомобиля. Киев: Вища школа, 1978, 168с.
5. Вонг. Дж. Теория наземных транспортных средств. Перев. С английского. М., Машиностроение, 1982. -282 с.

Рецензент: д.т.н., профессор Маткеримов Т.Ы.