

**С.И. Вахрушев**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Россия

## **БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ БОЛЬШЕГРУЗНЫХ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Рассматривается проблема повышения пропускной способности автомобильных дорог России при обеспечении безопасности дорожного движения большегрузного автомобильного транспорта на криволинейных участках дорог с малыми радиусами. Даются рекомендации относительно допустимых скоростей движения в условиях отсутствия заноса и опрокидывания в зависимости от дорожно-климатических условий. Предлагается вводить ограничения скорости движения автомобильного транспорта с учетом сезона года.

**Ключевые слова:** ветровая нагрузка, занос, запас устойчивости, опрокидывание, угол крена, силы инерции.

Улучшение количественных и качественных характеристик автомобильного транспорта в России существенно влияет на безопасность дорожного движения. Статистика дорожно-транспортных происшествий за последние три года свидетельствует о том, что общее количество погибших при ДТП не уменьшается и составляет: в 2010 г. – 26 567 чел.; в 2011 г. – 27 953 чел.; в 2012 г. – 25 695 человек. Самые тяжелые последствия ДТП происходят с участием большегрузных автотранспортных средств (БАС) и связаны с превышением скорости движения, заносом и опрокидыванием.

Подразделения ГИБДД, ответственные за безопасность движения автомобильного транспорта на закрепленных участках дорог, необоснованно, без предварительных расчетов, устанавливают ограничения по скорости движения. Как правило, они делаются интуитивно, с большим запасом в сторону их уменьшения вне зависимости от категорий дорог и дорожно-климатических условий. Это приводит к задержке движения большегрузного автомобильного транспорта, особенно на дорогах I–III категорий.

Наблюдается противоречие между разрешенными ограничениями скоростей движения на криволинейных участках дорог с малыми радиусами и желанием водителей преодолеть эти участки, не создавая заторов.

Определяющей особенностью многоосных автомобилей и автопоездов-полуприцепов является то, что эти машины имеют высокую проходимость и грузоподъемность, оснащены мощными силовыми приводами, способны развивать большие скорости движения. Высокие динамические свойства, в свою очередь, значительно влияют на устойчивость БАС при движении в разнообразных дорожно-климатических условиях и снижение вероятности опрокидывания и скольжения (заноса).

Безопасность движения БАС по условиям устойчивости и предотвращению заноса оценивается предельно допустимыми скоростями движения на криволинейных участках дорог с малыми радиусами, которые определяются расчетным путем. Однако при расчетах используют либо упрощенные эмпирические уравнения [1], либо расчетные зависимости, которые не учитывают угол крена подрессоренной части БАС, угловые жесткости подвесок, боковую и радиальную жесткости шин, а также действие ветровых нагрузок [2].

Актуальность статьи заключается в научном исследовании и оценке совместного влияния запасов устойчивости по опрокидыванию и заносу на безопасность дорожного движения БАС, зависящую от следующих параметров: допустимых скоростей движения на криволинейных участках дорог с малыми радиусами, дорожно-климатических условий и конструктивно-компоновочных решений большегрузных автотранспортных средств.

Транспортные агрегаты принято оценивать по их статической и динамической устойчивости. Статическая устойчивость характеризует отсутствие опрокидывания или сползания автомобиля при медленном его движении по дороге с поперечным уклоном или при стоянке на косогоре и оценивается углом статической устойчивости  $\alpha_{ст}$ . Угол статической устойчивости рассчитывается только по статическим силам и моментам от силы тяжести автомобиля с учетом или без учета деформации подвесок и шин, поэтому он является вспомогательным показателем устойчивости. Как показывают испытания, фактический допустимый угол крена автомобиля при движении на повороте примерно в 2 раза меньше, чем угол статической устойчивости  $\alpha_{ст}$  [3].

Динамическая устойчивость характеризует отсутствие опрокидывания или заноса автомобиля при его движении в различных дорожно-климатических условиях. Основным показателем динамической устойчивости является коэффициент запаса поперечной устойчивости

(КЗПУ). Он определяется как отношение суммарного восстанавливающего момента, создаваемого весом всех частей автомобиля относительно оси опрокидывания, к суммарному опрокидывающему моменту, создаваемому боковыми силами, которые действуют на автомобиль в процессе эксплуатации и стремятся опрокинуть его относительно той же оси опрокидывания:

$$K = \frac{M_B}{M_O} \geq 1,2,$$

где  $M_B$  и  $M_O$  – суммарные восстанавливающий и опрокидывающий моменты, методика определения которых рассмотрена ниже.

При расчете КЗПУ были учтены все нагрузки, действующие на большегрузный автомобильный транспорт (БАТ) в условиях движения: суммарная масса БАТ и перевозимого груза; инерционные нагрузки, обусловленные поперечно-угловыми колебаниями, вызванными воздействием дорожных неровностей и изменением траектории движения; суммарная составляющая ветровых нагрузок, действующая перпендикулярно к боковой поверхности большегрузного автомобильного транспорта.

С точки зрения безопасности дорожного движения динамическая устойчивость БАТ дополнительно должна оцениваться предельно допустимой скоростью движения на криволинейном участке дороги с малым радиусом, при котором полностью исключается опрокидывание или занос большегрузного автомобильного транспорта.

Оценка устойчивости по критической скорости движения строительных и дорожных машин на повороте с поперечным уклоном дороги [2] позволяет сформулировать вывод о том, что критическая скорость движения машины на повороте должна быть тем меньше, чем больше угол поперечного уклона и меньше радиус поворота, так как массо-геометрические характеристики машины остаются неизменными.

В ходе дальнейших исследований автором были построены графики зависимостей критических скоростей движения самоходных стреловых кранов при различных углах поперечного уклона и радиусах поворота дороги и даны рекомендации по совершенствованию организации движения [4].

Однако выполненные научные исследования не учитывали угол крена подрессоренной части БАТ, угловые жесткости подвесок, боковую и радиальную жесткости шин.

В связи с этим дополнительные исследования динамической устойчивости БАТ при движении на криволинейных участках дорог с малыми радиусами выполнены в два этапа:

- по условию отсутствия бокового опрокидывания;
- по условию отсутствия заноса или сдвига колес при движении на повороте с учетом поперечного уклона дороги.

Расчет КЗПУ был проведен при наиболее неблагоприятном сочетании расчетных нагрузок, когда поперечные силы, действующие на автомобиль или автопоезд-полуприцеп, направлены в сторону опрокидывания. Расчетная схема построена для случая движения на криволинейном участке дороги, имеющей уклон в сторону поворота, и при действии боковой ветровой нагрузки, направленной в ту же сторону (рис. 1).

Расчетные радиусы поворота  $R$  и углы поперечного уклона дорог  $\alpha$  были определены в соответствии со строительными нормами и правилами СНиП 2.05.02–85\* «Автомобильные дороги». Для дорог I–III категорий принят радиус  $R = 250$  м. Для участков пересеченной местности радиусы криволинейных участков составляли:  $R = 125$  м – дороги IV категории;  $R = 30...60$  м – дороги V категории. Ветровая нагрузка была определена для БАТ с большими массово-габаритными характеристиками в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 92-9249–80 «Агрегаты специального назначения. Методика расчета ветровых нагрузок».

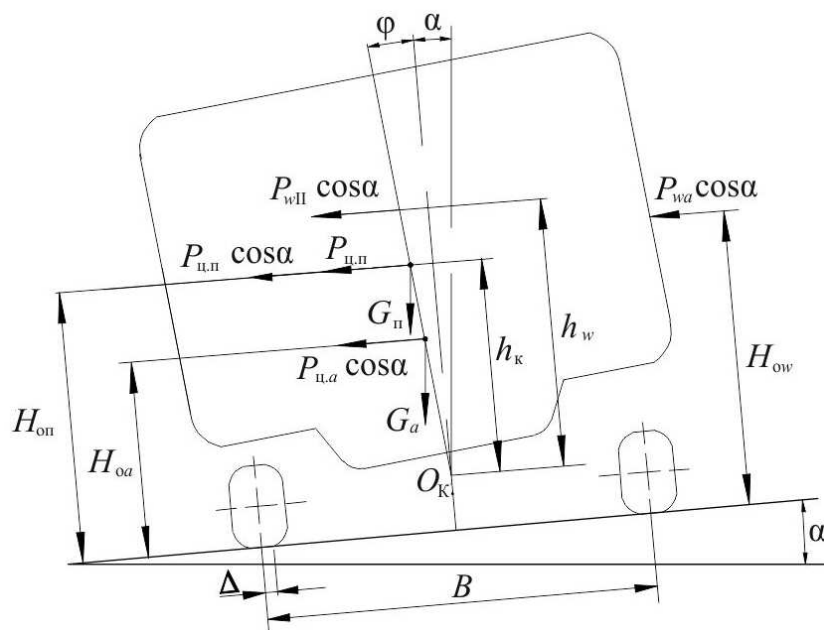


Рис. 1. Расчетная схема для определения коэффициента запаса поперечной устойчивости

Угол крена поддрессоренной части БАС определен из условия равновесия

$$M_{\text{ВП}} = M_{\text{ОП}},$$

где  $M_{\text{ВП}}$  и  $M_{\text{ОП}}$  – восстанавливающий и опрокидывающий моменты, действующие на поддрессоренную часть автомобиля или автопоезда-полуприцепа относительно оси крена  $O_k$ .

Восстанавливающий момент, создаваемый подвесками БАС,

$$M_{\text{в.п}} = C_{\varphi} \varphi - G_{\text{п}} \cos \alpha h_{\text{к}} \varphi = \varphi (C_{\varphi} - G_{\text{п}} h_{\text{к}} \cos \alpha), \quad (1)$$

где  $C_{\varphi}$  – угловая жесткость подвески и шин;  $h_{\text{к}}$  – плечо крена поддрессоренной части;  $G_{\text{п}}$  – масса поддрессоренной части.

Опрокидывающий момент, действующий на поддрессоренную часть БАС,

$$M_{\text{о.п}} = M_{\text{и.п}} + M_{\text{ц.п}} + M_{\text{вп}} \pm M_{G_{\text{п}}}, \quad (2)$$

где  $M_{\text{и.п}}$  – момент, создаваемый силой инерции  $P_{\text{и.п}}$ , обусловленной ускорениями при поперечно-угловых колебаниях под воздействием неровности дороги,

$$M_{\text{и.п}} = P_{\text{и.п}} h_{\text{к}} = \frac{G_{\text{п}}}{g} \sigma_z h_{\text{к}},$$

где  $\sigma_z$  – среднеквадратичное значение боковых ускорений центра масс поддрессоренной части при движении в заданных дорожных условиях. Для приближенной оценки КЗПУ среднеквадратичные значения боковых ускорений заданы следующие: автомобиль с моношасси ( $\sigma_z = 0,8 \dots 0,9$ ); автопоезд-полуприцеп ( $\sigma_z = 0,6 \dots 0,7$ );  $M_{\text{ц.п}}$  – момент, создаваемый центробежной силой  $P_{\text{ц.п}}$ , поддрессоренной части БАС при движении с радиусом поворота  $R$  и скоростью  $v$ ,

$$M_{\text{ц.п}} = P_{\text{ц.п}} h_{\text{к}} \cos \alpha = \frac{G_{\text{п}} v^2}{12,96 g R} h_{\text{к}} \cos \alpha,$$

$M_{\text{вп}}$  – момент, создаваемый ветровой нагрузкой  $P_{\text{вп}}$ , действующей на поддрессоренную часть БАС и имеющей плечо  $h_{\text{к}}$  относительно оси крена. Методика расчета ветровой нагрузки приведена в [5].

$$M_{\text{вп}} = P_{\text{вп}} h_w \cos \alpha,$$

$M_{G_{\text{п}}}$  – момент, создаваемый составляющей массы подрессоренной части БАТ за счет угла поперечного уклона  $\alpha$ :

$$M_{G_{\text{п}}} = G_{\text{п}} h_{\text{к}} \sin \alpha.$$

Угол крена подрессоренной части  $\varphi$  БАС определен из условия равновесия правых частей уравнений (1) и (2), рад:

$$\varphi = \frac{M_{\text{и.п}} + M_{\text{ц.п}} + M_{\text{вп}} \pm M_{G_{\text{п}}}}{C_{\varphi} - G_{\text{п}} h_{\text{к}} \cos \alpha}.$$

С учетом вышеизложенных расчетных зависимостей определены восстанавливающий  $M_{\text{в}}$  и опрокидывающий  $M_{\text{о}}$  моменты, действующие в целом на подрессоренную и неподрессоренную массы БАС относительно оси опрокидывания. Оси опрокидывания проходят по-разному для автомобиля и автопоезда-полуприцепа.

Восстанавливающий момент, создаваемый всей массой БАС  $G_{\text{а}}$ , с учетом влияния углов поперечного уклона дороги  $\alpha$  и крена  $\varphi$  примет значение

$$M_{\text{в}} = G_{\text{а}} \cos \alpha (0,5B - \Delta) - G_{\text{п}} \cos \alpha h_{\text{к}} \sin \varphi = [G_{\text{а}} (0,5B - \Delta) - G_{\text{п}} h_{\text{к}} \sin \varphi] \cos \alpha,$$

где  $\Delta$  – смещение плеча силы  $G_{\text{а}} \cos \alpha$  за счет боковой деформации шин,

$$\Delta = \frac{P_{\text{и.п}} + P_{\text{ц.а}} \cos \alpha + P_{\text{ва}} + G_{\text{а}} \sin \alpha}{\sum_1^n C_{\text{ш.}\delta i}},$$

где  $C_{\text{ш}\delta i}$  – боковая жесткость шины;  $i$  – число шин;  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ .

Боковая жесткость шины определена через радиальную жесткость зависимостью

$$C_{\text{ш.}\delta} = 0,6 C_{\text{ш}},$$

где  $C_{\text{ш}}$  – радиальная жесткость шины,

$$C_{\text{ш}} = p_{\text{ш}} \pi \sqrt{DB_{\text{ш}}}.$$

Опрокидывающий момент, действующий на БАС,

$$M_{\text{о}} = M_{\text{и.а}} + M_{\text{ц.а}} + M_{\text{ва}} \pm M_{G_{\text{а}}},$$

где  $M_{и.а}$  – момент, создаваемый силой инерции  $P_{и.а}$  относительно оси опрокидывания,

$$M_{и.а} = P_{и.п} H_{о.п} = G_{п} \sigma_z H_{о.п} \frac{1}{g},$$

$H_{о.п}$  – расстояние от центра масс подрессоренной части БАС до опорной поверхности;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $M_{ц.а}$  – момент, создаваемый центробежной силой  $P_{ц.а}$ , действующей на БАС при движении с радиусом поворота  $R$  и скоростью  $v$ ,

$$M_{ц.а} = P_{ц.а} H_{о.а} \cos\alpha = \frac{G_a \vartheta_a^2 H_{о.а} \cos\alpha}{12,96gR}, \quad (3)$$

$H_{о.а}$  – расстояние от общего центра масс БАС до опорной поверхности;  $M_{ва}$  – момент, создаваемый ветровой нагрузкой  $P_{ва}$ , действующей на БАС и имеющей плечо  $H_{о.в}$  относительно оси опрокидывания,

$$M_{ва} = P_{ва} H_{ов} \cos\alpha,$$

$M_{Ga}$  – момент, создаваемый составляющей массы БАС за счет угла поперечного уклона дороги  $\alpha$

$$K = \frac{M_B}{M_o} = \frac{[G_a(0,5B - \Delta) - G_{п} h_k \sin\varphi] \cos\alpha}{M_{и.а} + M_{ц.а} + M_{ва} \pm M_{Ga}}.$$

Полученные значения моментов  $M_o$  и  $M_B$  использованы для определения коэффициента запаса поперечной устойчивости БАС:

$$K = \frac{M_B}{M_o} = \frac{[G_a(0,5B - \Delta) - G_{п} h_k \sin\varphi] \cos\alpha}{M_{и.а} + M_{ц.а} + M_{ва} \pm M_{Ga}}. \quad (4)$$

Из полученного уравнения (4) определена допустимая скорость движения БАС по условию устойчивости к опрокидыванию. Величина момента  $M_{ц.а}$ , создаваемого центробежной силой, определена по формуле (3):

$$\vartheta_{а.о} = \sqrt{\frac{12,96gR}{KG_a H_{о.а} \cos\alpha} \left\{ [G_a(0,5B - \Delta) - G_{п} h_k \sin\varphi] \cos\alpha - K(M_{и.а} + M_{ва} \pm M_{Ga}) \right\}}.$$

Критическая скорость движения БАС по опрокидыванию  $v_{к.о}$  получена из условия, что в уравнении допустимой скорости движения принято значение КЗПУ  $K = 1,0$ .

Устойчивость БАС по условию отсутствия заноса (сдвига) колес при движении на криволинейном участке дороги с малым радиусом оценивается коэффициентом запаса устойчивости по заносу (сдвигу)  $K_{y.з}$ .

Коэффициент  $K_{y.з}$  определен как отношение удерживающей от заноса силы сцепления колес с дорогой  $N_{сц}$  к суммарной сдвигающей силе:

$$K_{y.з} = \frac{N_{сц}}{N_{сд}} \geq [K_{y.з}],$$

где  $[K_{y.з}]$  – минимально допустимый запас устойчивости по заносу,  $[K_{y.з}] = 1,15 \dots 1,265$ .

При расчете коэффициента  $K_{y.з}$  радиус поворота  $R$  и угол поперечного уклона дороги  $\alpha$  принимаются в соответствии с заданными в ТЗ дорожными условиями или специальными требованиями (для внедорожных автомобилей). Заносу в наибольшей степени подвержены задние колесные ходы автомобилей и полуприцепов [6].

Сдвигающая сила  $N_{сд}$  равна сумме составляющих центробежной силы  $P_{ц.а} \cos \alpha$ , силы тяжести  $G_a \sin \alpha$ , силы инерции  $P_{и.а}$  и силы бокового ветра  $P_{ва} \cos \alpha$ , приходящихся на задний колесный ход:

$$N_{сд} = \left( \frac{G_a \vartheta_a^2 \cos \alpha}{12,96 g R} + G_a \sin \alpha + \frac{G_{п} \sigma_z}{g} \right) K_{з.х} + K_{в.з} P_{ва} \cos \alpha,$$

где  $K_{з.х}$  – коэффициент загрузки заднего колесного хода силой тяжести,  $K_{з.х} = \frac{L-l}{L}$ ;  $K_{в.з}$  – коэффициент загрузки заднего колесного хода ветровой нагрузкой,  $K_{в.з} = \frac{L-l_w}{L}$ ;  $L$  – база автомобиля или полуприцепа;  $l$ ,  $l_w$  – расстояние от заднего колесного хода до центра масс и центра ветрового давления автомобиля.

Удерживающая от заноса сила сцепления

$$N_{сц} = \varphi_{сц} G_a \cos \alpha K_{з.х},$$

где  $\varphi_{сц}$  – коэффициент сцепления шин с дорогой.



Допустимая скорость движения автомобиля на повороте по заносу определена из равенства сдвигающей силы  $N_{сд}$  и удерживающей силы  $N_{сц}$ , уменьшенной на коэффициент запаса устойчивости по заносу  $K_{y.з}$ :

$$v_{a.з} = \sqrt{12,96 gR \left( \frac{\varphi_{сц}}{K_{y.з}} - \tan \alpha - \frac{G_{п} \sigma_{\ddot{z}}}{g G_a \cos \alpha} - \frac{K_{в.з} P_{ва}}{K_{з.х} G_a} \right)}.$$

Критическая скорость по заносу автомобиля  $v_{к.з}$  может быть получена, если в уравнении допустимой скорости движения принять значение КЗПУ  $K_{y.з} = 1,0$ .

По результатам исследований построены графики зависимости предельной скорости движения на повороте по заносу от коэффициента сцепления шин с дорогой и радиуса закругления дороги (рис. 2), а также графики зависимости КЗПУ, угла крена подрессоренной части БАТ и других параметров от скорости движения при различных дорожно-климатических условиях (рис. 3, а, б).

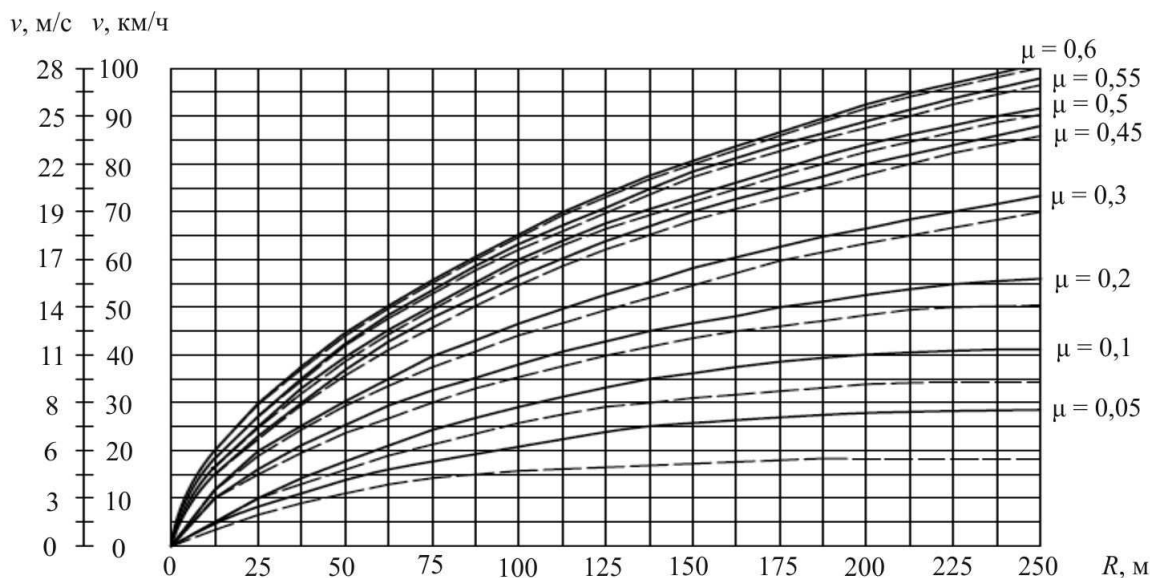
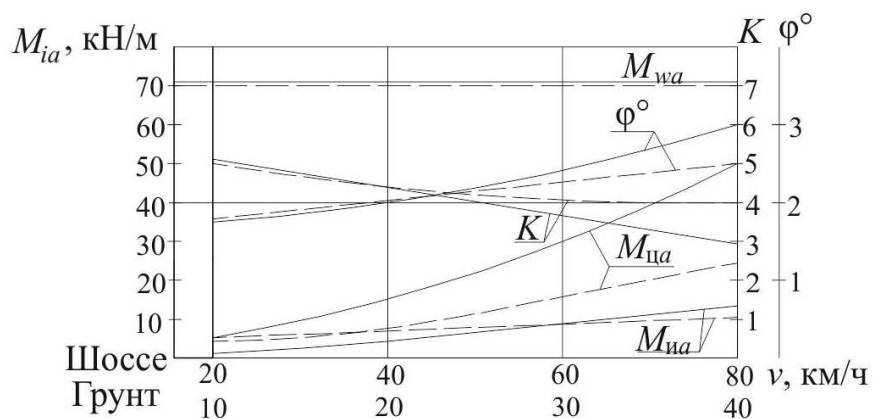
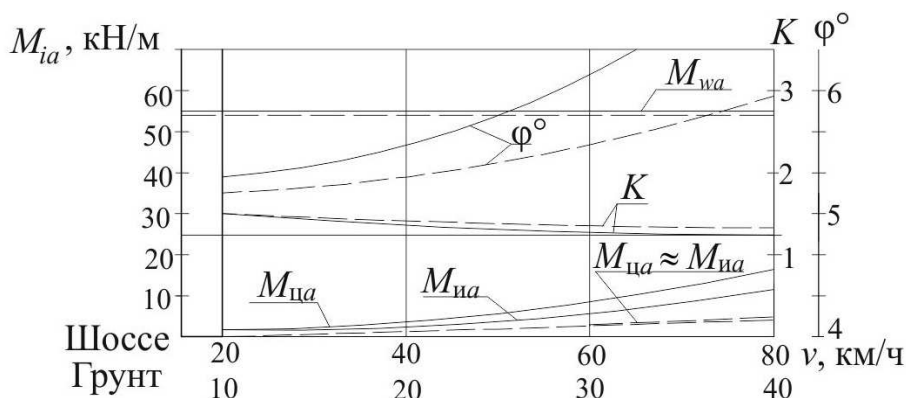


Рис. 2. Зависимость предельной скорости движения БАТ по заносу на криволинейных участках дорог с малыми радиусами от коэффициента сцепления шин с дорогой и радиуса закругления:

- — без учета ветровых нагрузок;
- — с учетом ветровых нагрузок



а



б

Рис. 3. Зависимость КЗПУ, угла крена подрессоренной части БАТ и других параметров от скорости движения при различных дорожно-климатических условиях: а – большегрузный автомобиль (моношасси); б – автопоезд-полуприцеп; — — — — при движении по асфальтобетонным дорогам I–II категорий; - - - - - при движении по щебеночно-гравийным дорогам IV–V категорий

Расчеты коэффициентов запаса поперечной устойчивости и коэффициентов запаса по заносу проводились для разных скоростей движения БАС на криволинейных участках дороги с малыми радиусами. При этом массы автомобиля или автопоезда-полуприцепа были приняты постоянными. Расчетные радиусы поворота  $R$  и углы поперечного уклона дорог  $\alpha$  принимались в соответствии с требованиями [7].

### Список литературы

1. Комментарий к Правилам дорожного движения Российской Федерации. – М.: За рулем, 1998. – 217 с.
2. Гоберман Л.А. Основы теории, расчета и проектирования строительных и дорожных машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 464 с.

3. Аксенов П.В. Многоосные автомобили. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Машиностроение, 1989. – 320 с.

4. Вахрушев С.И. Безопасность движения стреловых самоходных кранов // Вестник ПГТУ. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – Пермь, 2010. – № 2. – С. 123–128.

5. ОСТ 92-9249–80. Агрегаты специального назначения. Методика расчета ветровых нагрузок (с изм. 2010 г.). – М.: Изд-во стандартов, 2010. – 66 с.

6. Самусенко М.Ф. Конструирование и расчет большегрузных транспортных средств. Подвижность и устойчивость. – М.: Изд-во МАДИ, 1983. – 129 с.

7. СНИП 2.05.02–85\*. Автомобильные дороги / Минрегион России. – М., 2012.

Получено 6.03.2013

**S.I. Vahrushev**

## **ROAD SAFETY OF HEAVY VEHICLES**

The problem of increasing road capacity of Russia to road safety of heavy road transport on curved road sections with small radii. Provides recommendations for speed limit on conditions no skidding and rollover, depending on road and climate conditions. It is proposed to place restrictions on the speed of the motor transport, depending on the season.

**Keywords:** wind load, skid, stability margin, rollover, roll angle, the forces of inertia.

***Вахрушев Сергей Иванович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: spstf@pstu.ac.ru).*

***Vahrushev Sergey Ivanovich** (Perm, Russia) – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russia, e-mail: spstf@pstu.ac.ru).*