

УДК 629.113.073/075

УПРАВЛЯЕМОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ АВТОМОБИЛЕЙ МНОГОЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В.Г. Челноков / ОАО «Автомобильный завод «Урал»
Г.З. Лукьянов, к.т.н. / ФГУ «21 НИИИ МО РФ»

ВВЕДЕНИЕ

До вступления в силу технического регламента о безопасности колесных транспортных средств в Российской Федерации действовали два нормативных документа, устанавливающих требования к управляемости и устойчивости транспортных средств: ГОСТ Р 52302 и Правила ЕЭК ООН № 111 [4; 5]. Оба документа входили в перечень обязательных требований Правил по проведению работ в Системе сертификации механических транспортных средств и прицепов. ГОСТ Р 52302 был разработан на основе ОСТ 37.001.471, ОСТ 37.001.487, РД 37.001.005 и РД 37.001.005 [1-3] и практически полностью вообрал в себя эти документы с некоторыми уточнениями и корректировками, не изменив их по существу. Правила ЕЭК ООН № 111 распространяются только на автоцистерны и устанавливают более жесткие требования в отношении статической устойчивости. В техническом регламенте требования к управляемости и устойчивости транспортных средств практически не изменились по отношению к требованиям ГОСТ Р 52302.

В представленной работе не рассматривается весь комплекс технических требований к управляемости и устойчивости, регламентированный упомянутыми документами. Объектом анализа выбраны требования к автомобилям многоцелевого назначения в части статической устойчивости против опрокидывания и движения в нештатных режимах. Выбор обусловлен тем, что этот тип транспортных средств имеет двойное применение. Автомобили многоцелевого назначения и спецтехника на их базе широко используются как в Министерстве обороны и других силовых структурах, так и в гражданском секторе экономики, поэтому к ним предъявляются общие требования технического регламента и дополнительные требования заказчика.

ТРЕБОВАНИЯ К АВТОМОБИЛЯМ МНОГОЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В техническом регламенте о безопасности колесных транспортных средств, также как и в ГОСТ Р 52302, устанавливаются два показателя статической устойчивости транспортного средства:

- 1) угол $\alpha_{СТ}$ наклона опорной площадки в момент начала опрокидывания (далее — угол статической устойчивости);
- 2) угол $\varphi_{СТ}$ крена подрессоренных масс.

Для целей сертификации транспортных средств гражданского назначения нормативные значения этих показателей установлены в зависимости от коэффициента q_s поперечной устойчивости транспортного средства (отношение половины колеи b к высоте центра масс h) и определяются индивидуально для каждого объекта испытаний. Минимально допустимый угол статической устойчивости равен 21° .

Требования к автомобилям многоцелевого назначения значительно жестче. Угол статической устойчивости должен быть не ниже 33° . Практика показывает, что требования к статической устойчивости для таких автомобилей технически выполнимы, но без какого-либо запаса. Увеличению угла статической устойчивости препятствуют ограничения по конструктивным параметрам, основными из которых являются:

- большой дорожный просвет и применение шин большого диаметра по условиям проходимости;
- размещение груза в геометрическом центре платформы с учетом надставных бортов;
- высокие требования к подвижности и плавности хода по пересеченной местности.

Управляемость в нештатных режимах для целей сертификации транспортных средств гражданского назначе-

ния оценивается по скорости V выполнения маневров «Вход в поворот радиусом 35 м» (далее «Поворот R35»), и «Переставка». Нормативные значения скоростей выполнения маневров установлены в зависимости от категории транспортных средств, но без учета особенностей конструкции (колеи, высоты центра масс и т.п.). Для специальных и специализированных транспортных средств нормативные скорости снижены на 5%. Кроме того, допускается дополнительное снижение нормативных значений скорости на 10% с возможным, но необязательным ограничением максимальной скорости по усмотрению испытательной лаборатории. Многолетний опыт испытаний в испытательном центре ОАО «АЗ Урал» показывает, что требования, предъявляемые к управляемости и устойчивости в нештатных режимах, в большинстве случаев технически достижимы.

Для оценки управляемости и устойчивости автомобилей многоцелевого назначения в нештатных режимах применяются другие показатели: требования и методика выполнения маневра «Переставка» остаются такими же, но вместо маневра «Поворот R35» применяется маневр «Поворот R25». Скорость прохождения маневра должна быть не ниже 45 км/ч без каких-либо оговорок. Практика показывает, что уровень требований к выполнению маневра «Поворот R25» значительно выше требований к другим показателям управляемости и устойчивости. Как правило, автомобили многоцелевого назначения при выполнении этого маневра не достигают скорости 45 км/ч (см. таблицу).

Несоответствие автомобилей требованиям к скорости выполнения маневра «Поворот R25» можно отнести на многие причины: конструктивное несовершенство,

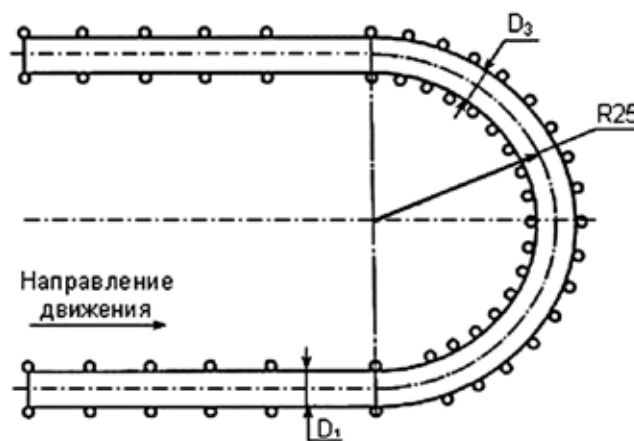


Рисунок 1. Разметка участка дороги для испытаний

условия испытаний, человеческий фактор и т.п. Нельзя исключить и более простое объяснения сложившейся ситуации: нормативные требования к скорости выполнения маневра «Поворот R25» завышены и не всегда достижимы на практике. Можно с достаточно высокой вероятностью предположить, что последнее ближе к истине, поскольку несоответствия носят систематический характер.

Результаты испытаний показывают (см. таблицу), что скорость 45 км/ч при выполнении маневра «Поворот R25» не достигается даже на автомобилях, у которых угол статической устойчивости равен или выше нормативного значения (33–36°). Это говорит о том, что нормативные требования к скорости выполнения маневра «Поворот R25» и к показателям статической устойчивости не гармонизированы.

Таблица. Типичные результаты испытаний многоцелевых автомобилей на устойчивость и управляемость

Автомобиль		Показатели статической устойчивости		Показатель маневра «Поворот R25», V, км/ч
Полная масса, кг	Колесная формула	$\alpha_{СТ}$, град.	$\varphi_{СТ}$, град.	
22070	8x8	26,9	7,4	33,7
25710	8x8	30,6	8,6	38,0
11130	4x4	31,5	-	37,7
11130	4x4	32,3	-	39,6
15680	6x6	33,5	6,0	44,5
20720	6x6	33,9	6,8	40,0
22100	8x8	34,0	7,1	44,8
15165	6x6	34,8	5,1	39,2
11900	4x4	35,0	6,3	45,0
16705	6x6	35,2	7,9	43,6
6700	4x4	36,0	8,2	46,3
15680	6x6	36,0	5,2	46,2
15985	6x6	36,5	6,0	43,9
11540	4x4	36,8	6,4	44,3
6400	4x4	36,9	7,7	48,0
10750	6x6	38,8	4,9	43,7
10630	4x4	39,3	4,2	46,2

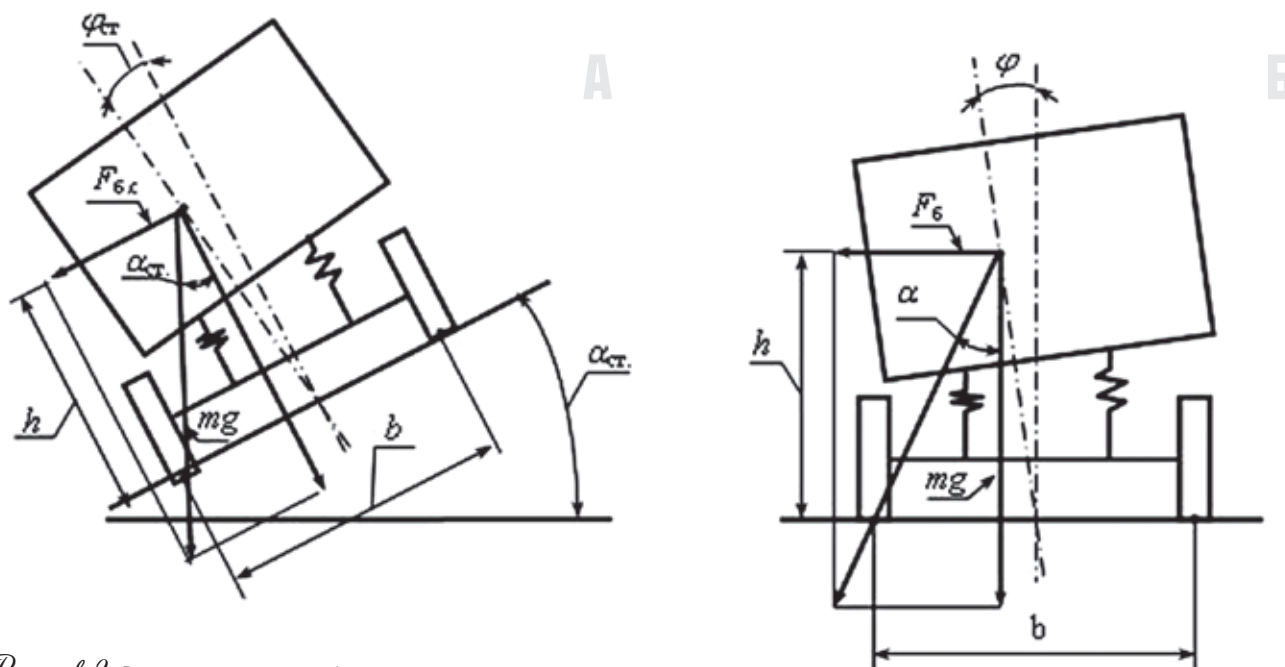


Рисунок 2. Расчетная схема автомобиля:

а) опрокидывание на стенде; б) равномерное движение по кругу; m — масса автомобиля; g — ускорение свободного падения; α — угол статической устойчивости; φ — угол крена поддресоренных масс; F_{ϕ} — боковая (центробежная) сила; F_{6cm} — боковая сила; h — высота центра масс; b — колея

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель работы — проверка обоснованности нормативных требований к скорости V выполнения маневра «Поворот R25» и их согласованности (гармонизации) с нормативными требованиями к показателям статической устойчивости α_{ct} и φ_{ct} . Для достижения поставленной цели проведен расчет максимальной скорости автомобиля при выполнении маневра «Поворот R25» и ее взаимосвязи с показателями статической устойчивости. Расчеты проводились для идеализированного автомобиля, находящегося в идеализированных условиях испытаний. Все возможные факторы, негативно влияющие на скорость выполнения маневра, не учитывались. Принимались во внимание только физические закономерности.

РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ МАНЕВРА «ПОВОРОТ R25»

В рамках поставленной задачи нет необходимости в кропотливом изучении влияния на предельную скорость выполнения маневра множества известных, детально изученных и неизученных факторов: конструктивных характеристик автомобиля в целом и его систем, условий испытаний, методических аспектов, человеческого фактора и т.п. Достаточно, чтобы все допущения априори не приводили к занижению расчетной скорости автомобиля.

Рассмотрим с обозначенных позиций методику и условия испытаний выполнения маневра «Поворот R25». Разметка участка дороги показана на рис. 1. Испытания проводятся с нарастанием от заезда к заезду

скорости автомобиля. В процессе одного испытательного заезда скорость автомобиля поддерживается постоянной. Испытания прекращаются, когда наступает одно из двух критических состояний: начало опрокидывания или боковой занос.

Испытательный заезд можно разделить на две стадии:

- 1) переход от прямолинейного движения к движению по кругу (переходная стадия);
- 2) равномерное движение по кругу постоянного радиуса (стационарная стадия).

Рассмотрим отдельно вторую (стационарную) стадию и определим максимальную скорость движения автомобиля при равномерном движении по кругу постоянного радиуса. Допустим, что автомобиль движется по кругу радиусом 25 м с медленным нарастанием скорости до достижения критического состояния: бокового заноса или опрокидывания. В этом случае максимальная скорость автомобиля будет выше, чем при выполнении маневра «Поворот R25» в целом, поскольку заданный коридор выполнения маневра предполагает резкий переход от прямолинейного движения к движению по кругу, что неизбежно будет сопровождаться интенсивными колебательными явлениями в поперечной и в горизонтальной плоскостях. Заброс бокового ускорения и крена поддресоренной массы в поперечной плоскости и заброс угловой скорости автомобиля в горизонтальной плоскости приведут к снижению скорости как по условиям заноса

са, так и по условиям опрокидывания. Другими словами, если в испытательном заезде и возникает критическое состояние, будь то опрокидывание или боковой занос, то оно возникает в переходной стадии. Таким образом, если мы определим максимальную скорость автомобиля при его движении по кругу радиусом 25 м, то эта скорость будет предельной теоретически достижимой скоростью выполнения маневра «Поворот R25» в целом.

При равномерном движении по кругу характер движения автомобиля и его максимальная скорость полностью определяются статическими характеристиками автомобиля (размерами, силой тяжести, упругими характеристики). То же можно сказать и об опрокидывании автомобиля на стенде. Для проведения расчета и в том, и в другом случае достаточно плоской модели автомобиля. Для упрощения выкладок было принято, что, в первом приближении, центр крена поддрессоренной массы расположен на уровне опорной поверхности и вся масса автомобиля — это поддрессоренная масса. В случае движения автомобиля по кругу на поверхности с заведомо высоким коэффициентом сцепления скорость автомобиля ограничена опрокидыванием. Расчетные схемы, на которых показаны положения автомобиля и действующие на него силы в момент опрокидывания, представлены на рис. 2.

При движении по кругу, в момент опрокидывания через центр внешнего к повороту колеса проходят векторы результирующей силы тяжести автомобиля и центробежной силы. При опрокидывании на стенде через центр колеса проходит вектор силы тяжести автомобиля. Из уравнений равновесия сил, действующих на автомобиль в момент опрокидывания, получены следующие уравнения для определения угла крена поддрессоренной массы φ_{CT} и φ , угла статической устойчивости α_{CT} и α и скорости V автомобиля:

- для случая опрокидывание на стенде:

$$\operatorname{tg} \alpha_{CT} = (0,5b - h \varphi_{CT}) / h = q_s - \varphi_{CT};$$

$$\varphi_{CT} = (h m g \sin \alpha_{CT}) / C_\varphi \quad (1)$$

$$C_\varphi = (h m g \sin \alpha_{CT}) / \varphi_{CT} \quad (2)$$
- для случая равномерного движения по кругу:

$$\operatorname{tg} \alpha = (0,5b - h \varphi) / h = q_s - \varphi;$$

$$\varphi = (h m g \operatorname{tg} \alpha) / C_\varphi \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = q_s / (1 + h m g / C_\varphi) \quad (4)$$

$$F_\delta = a m = (V^2/R)m = m g \operatorname{tg} \alpha; V = \sqrt{R g \operatorname{tg} \alpha} \quad (5)$$

где $q_s = b/2h$ — коэффициент поперечной устойчивости; C_φ — угловая жесткость подвески, Н·м/рад; a — центробежное ускорение, м/с².

С учетом того, что углы крена поддрессоренных масс малы, в уравнениях (1)÷(5) приняты соотношения:

- $\operatorname{tg} \varphi_{CT} \approx \varphi_{CT}; \quad \operatorname{tg} \varphi \approx \varphi.$
- Подставляя уравнение (2) в уравнение (4), получим:
- $$\operatorname{tg} \alpha = q_s / (1 + \varphi_{CT} / \sin \alpha_{CT}) \quad (6)$$

Наконец, подстановка уравнения (6) в уравнение (5) дает соотношение, устанавливающее связь между скоростью выполнения маневра V и показателями статической устойчивости автомобиля при опрокидывании на стенде α_{CT} и φ_{CT} :

$$V = \sqrt{R g q_s / (1 + \varphi_{CT} / \sin \alpha_{CT})} \quad (7)$$

В предельном случае, когда угол крена поддрессоренных масс равен нулю, уравнение (7) приобретает вид:

$$V = \sqrt{R g q_s} \quad (8)$$

Уравнение (8) справедливо не только для автомобиля с бесконечной угловой жесткостью подвески и шин, но и для автомобиля с активной подвеской, предотвращающей крен поддрессоренных масс при возникновении бокового ускорения.

В случае, когда скорость автомобиля ограничена не опрокидыванием, а заносом, максимальная величина боковой (центробежной) зависит от силы сцепления шин с дорогой:

$$F = (V^2/R) m = m g f;$$

где f — коэффициент сцепления шин с дорогой.

Тогда скорость V выполнения маневра при равномерном движении по кругу определится уравнением:

$$V = \sqrt{R g f} = 49 \text{ км/ч} \quad (9)$$

Скорость выполнения маневра $V = 49$ км/ч подсчитана для оговоренного условиями испытаний по ГОСТ Р 51302 (п. 5.2.7) значения коэффициента сцепления $f = 0,75$.

Результаты расчетов по уравнениям (7)–(9) приведены на рисунке 3.

Зона на рис.3, ограниченная сверху линиями 1 и 2, это зона достижимых скоростей выполнения маневра «Поворот R25» для автомобиля с нулевым углом крена поддрессоренных масс, движущегося по поверхности

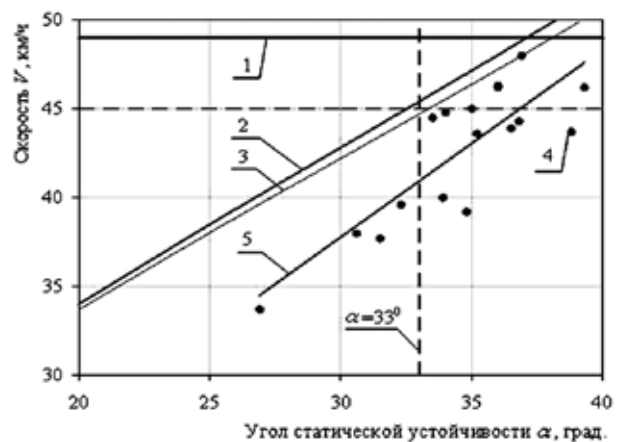


Рисунок 3. Результаты расчета и экспериментальные данные: 1 — уравнение (9); 2 — уравнение (8); 3 — уравнение (7); 4 — результаты испытаний

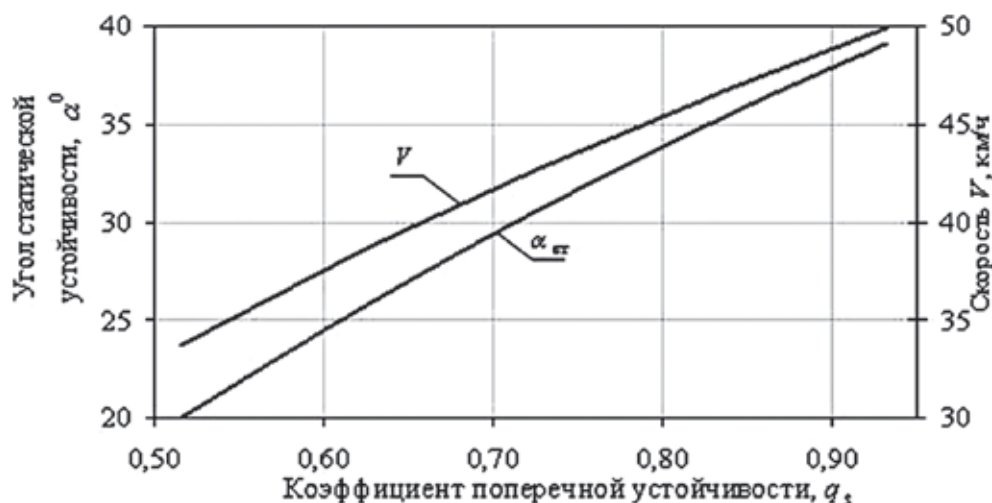


Рисунок 4. Зависимость угла статической устойчивости и скорости выполнения маневра «Поворот R25» от коэффициента поперечной устойчивости

с коэффициентом сцепления, равным 0,75. Для автомобиля, у которого угол крена поддрессоренных масс равен нормативному значению по ГОСТ Р 52302, зона предельных скоростей сужается и дополнительно ограничивается сверху линией 3. На этом же рисунке точками нанесены значения скоростей, полученные при испытаниях многоцелевых автомобилей (см. таблицу). Результаты испытаний обработаны методом наименьших квадратов и получена эмпирическая линия регрессии для скорости выполнения маневра, как функции угла статической устойчивости (линия 5). Линия регрессии определяет связь скорости выполнения маневра «Поворот R25» и угла статической устойчивости для среднестатистического автомобиля.

На рис. 3 наглядно видно, почему подавляющее большинство автомобилей не достигает скорости 45 км/ч при выполнении маневра «Поворот R25». Эта скорость выше предельной теоретически достижимой для автомобилей, у которых угол статической устойчивости равен 33° и угол крена поддрессоренных масс равен нормативному значению по ГОСТ Р 52303. То есть, автомобиль, формально соответствующий нормативным требованиям, предъявляемым к статической устойчивости, не может в принципе выполнить требования, предъявляемые к маневру «Поворот R25». Только при нулевом угле крена поддрессоренных масс и угле статической устойчивости 33° предельная скорость выполнения маневра «Поворот R25» становится практически равной нормативному значению (45,4 км/ч).

Для среднестатистического автомобиля, у которого угол статической устойчивости равен 33°, предельная скорость выполнения маневра «Поворот R25» равна 41 км/ч, что на 4 км/ч ниже норматива. А для того, чтобы среднестатистический автомобиль смог достичь нормативной скорости при выполнении маневра «По-

ворот R25», угол статической устойчивости у него должен быть выше 37°.

По результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

- нормативные требования к скорости выполнения маневра «Поворот R25» необоснованно завышены и недостижимы для подавляющего большинства многоцелевых автомобилей;
- нормативные требования к скорости выполнения маневра «Поворот R25» и к показателям статической устойчивости не гармонизированы.

На этом можно было бы и остановиться, поскольку поставленные задачи выполнены. Однако полученные данные содержат дополнительную информацию, выходящую за рамки поставленных задач, но связанную с ними. Это касается взаимосвязи показателей управляемости и устойчивости с конструктивными параметрами автомобиля, количественного соотношения предельно достижимых скоростей выполнения маневра «Поворот R25» и фактических, полученных при испытаниях.

Расчетные данные, приведенные на рис. 3, показывают, что когда предельная скорость выполнения маневра «Поворот R25» ограничена опрокидыванием, она находится в прямой зависимости от показателей статической устойчивости. Сопоставляя уравнения (1), (7) и (8), можно также видеть, что и угол статической устойчивости, и скорость выполнения маневра зависят от одной и той же величины — коэффициента поперечной устойчивости $q_s = b / 2h$. Коэффициент поперечной устойчивости — это не что иное, как $\operatorname{tg} \alpha_{CT}$ для автомобиля с нулевым углом крена поддрессоренных масс. Другими словами, $\operatorname{arctg} \alpha_{CT}$ — это предельный теоретически достижимый угол статической устойчивости на стенде для автомобиля с заданными значениями колеи и вы-

соты центра масс. Аналогичная ситуация и для маневра «Поворот R25»: предельно достижимая скорость выполнения маневра пропорциональна $\sqrt{q_s}$. Для наглядности на рис. 4 показана зависимость угла статической устойчивости и скорости выполнения маневра «Поворот R25» от коэффициента поперечной устойчивости.

Графики построены по уравнениям (1) и (7), угол крена поддресоренных масс принимался равным нормативному значению по ГОСТ Р 53203.

Теперь вернемся к рис. 3 и проведем сравнительный анализ расчетных и экспериментальных зависимостей скорости выполнения маневра «Поворот R25» от угла статической устойчивости. Первое, что необходимо отметить, это практически одинаковый наклон расчетной линии (3) и эмпирической линии (5). Это говорит о том, результаты испытаний подтверждают полученные расчетные данные о прямой зависимости скорости выполнения маневра «Поворот R25» от показателей статической устойчивости. Результаты испытаний показывают даже бóльшую взаимосвязь этих показателей, чем результаты расчетов.

Также видно, что у автомобилей с одинаковыми углами статической устойчивости, достигаемые скорости выполнения маневра «Поворот R25» могут значительно отличаться (до 5-7 км/ч). Будем полагать, что бóльшая часть этой разницы обусловлена особенностями конструкции образцов, а доля, обусловленная погрешностями эксперимента, не определяющая. Тогда разница скоростей выполнения маневра у образцов с одинаковыми показателями статической устойчивости — это разница их технического уровня. Часть автомобилей достигает при выполнении маневра «Поворот R25» скорости, близкой к предельно достижимой. Это говорит о том, что их технический уровень в части управляемости и устойчивости предельно высокий и резервы его повышения исчерпаны. Есть и обратные примеры, когда разница между экспериментальной и предельной скоростью выполнения маневра достигает 8 км/ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены расчетные зависимости предельной теоретически достижимой скорости автомобиля при выполнении маневра «Поворот R25» и показателей статической устойчивости. Расчетные зависимости подтверждены экспериментальными данными. Показано, что предельно достижимый угол статической устойчивости и предельно достижимая скорость выполнения маневра «Поворот R25», когда она ограничена опрокидыванием, находятся в прямой зависимости от коэффициента поперечной устойчивости.

Показано, что нормативные требования к скорости выполнения маневра «Поворот R25» завышены, не-

достижимы для подавляющего большинства многоцелевых автомобилей и не гармонизированы с нормативными требованиями к показателям статической устойчивости. Нормативные требования к скорости выполнения маневра «Поворот R25» и к показателям статической устойчивости не взаимосвязаны с их предельно достижимыми значениями.

Рассмотрим в свете полученных результатов нормативные требования к управляемости и устойчивости для транспортных средств гражданского назначения. Показатели статической устойчивости устанавливаются в прямой зависимости от коэффициента поперечной устойчивости, который представляет собой тангенс предельно достижимого угла статической устойчивости испытуемого образца. При таком подходе к нормированию разница между нормативным и достигнутым значением показателя — это количественная оценка технического уровня транспортного средства. Что касается показателей управляемости и устойчивости в штатных режимах, то нормативные требования к скорости выполнения маневров «Поворот R35» и «Переставка», также как и в случае многоцелевых автомобилей, не увязаны с их предельно достижимыми значениями, зависят от категории транспортного средства, «чохом» снижены на 5% для всех специальных и специализированных транспортных средств и могут быть еще на 10% ниже «на усмотрение испытательной лаборатории».

Такой подход, когда для транспортных средств с разными значениями коэффициентов поперечной устойчивости, от которого зависят все предельно достижимые показатели управляемости и устойчивости, применяются одинаковые нормативные требования, по мнению авторов некорректен. Нормативные требования должны работать на повышение технического уровня и безопасности транспортных средств, а для этого, как минимум, необходимо, чтобы они были взаимосвязаны с предельно достижимыми показателями. В этом случае нормативные требования становятся техническим барьером для продукции низкого уровня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ОСТ 37.001.471-88. Управляемость и устойчивость транспортных средств. Методы испытаний.
2. ОСТ 37.001.487-89. Управляемость и устойчивость транспортных средств. Технические требования.
3. РД 37.001.005. Методика испытаний и оценки устойчивости управления автотранспортными средствами.
4. ГОСТ Р 52302-2004. Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний.
5. Правила ЕЭК ООН № 111. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения автоцистерн категории N в отношении их устойчивости к опрокидыванию.