

УДК 656.13

А.С. Вашурин, Ю.И. Молев, Д.Н. Прошин, Ю.П. Трусков

**РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К УСТОЙЧИВОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ
ПРИ ЭКСТРЕННОМ ТОРМОЖЕНИИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Разработана методика определения вероятности возникновения заноса автомобиля при экстренном торможении. Оценка данной вероятности выполнена на основе обработки экспериментальных данных, полученных при испытаниях техники производства ОАО «ГАЗ» в период с 2010 по 2018 гг. Изложены методики получения расчетных величин поперечных ускорений, возникающих при прямолинейном движении автомобиля, движении по криволинейному участку дороги и выполнении контраварийных маневров. Экспериментальные и теоретические данные обладают хорошей сходимостью. Проанализированы нормативные требования к аварийности дорожного движения. Полученные результаты позволяют изготовителю более обоснованно подойти к выбору параметров автомобилей для обеспечения безопасности дорожного движения.

Ключевые слова: автомобиль, поперечное ускорение, занос, безопасность дорожного движения, вероятность события.

Обоснование необходимости и цели работы

Одним из путей повышения безопасности дорожного движения является совершенствование требований к конструкции транспортного средства, в том числе – направленных на поддержание устойчивости транспортных средств при экстренном торможении. Широкое распространение автомобилей с антиблокировочной системой торможения (ABS) и системой стабилизации движения (ESP) не окончательно решает поставленную проблему – главным образом, потому, что около 50 % автомобилей на наших дорогах не имеют указанных систем. Кроме того, в условиях экстренного торможения системы помощи водителю не всегда действуют корректно в связи с тем, что процесс поведения машин в заносе до конца точно не смоделирован [1-6].

Термин «занос» определяется как проявление технической неустойчивости на конечном интервале времени [7, 8]. Он возникает, когда контактная сила достигает своего предельного значения, равного силе трения трогания. Это может происходить в двух случаях: при воздействии на автомобиль достаточно больших боковых сил и в ситуациях, когда продольные компоненты контактных сил велики при этом для возникновения бокового скольжения оси относительно малых боковых сил. Таким образом, необходимым условием заноса является наличие боковых сил. Отсутствие же заноса при торможении может быть обеспечено его устойчивостью – способностью системы сохранять текущее состояние при влиянии внешних воздействий [7].

Исследование условий возникновения заноса автомобилей связано с составлением и решением систем дифференциальных уравнений высокого порядка. При этом качественный анализ получаемых зависимостей является практически невозможным событием, а численное моделирование, особенно в реальном времени, затруднено значительным изменением параметров движения во времени. Это приводит к необходимости проведения интегрирования по времени процесса с малым шагом, в условиях, когда сам процесс от начала до конца длится более 3-10 с. Данный подход является, во-первых, чрезвычайно затратным, во-вторых, малопродуктивным, а для целей исследования изучения условий возникновения заноса – еще и избыточным. Приближенное моделирование заноса автомобиля является наиболее актуальным направлением научных исследований.



Рис. 1. Типичный характер заноса при экстренном торможении на дороге с низкими сцепными свойствами [12]

Необходимо отметить, что отсутствие статистических данных, несовершенство учета влияния технического состояния, конструкции автомобилей на установление причинно-следственной связи между ними и ДТП не позволяют в настоящее время выработать адекватные управленческие решения, направленные на снижение количества ДТП, вызванных техническим состоянием транспортных средств. При этом эффективность таких решений, напрямую зависит от достоверности начальной информации. Отсутствие федерального учета аварийности, связанной с техническим состоянием различных марок и моделей транспортных средств, годами их выпуска, также отрицательным образом сказываются на анализе общей картины аварийности. Поэтому работа, направленная на повышение безопасности дорожного движения методом статистической обработки данных, а также ее сравнение с параметрами технического состояния транспортных средств является в высшей степени актуальной.

Методика выполнения работы

В настоящее время в Российской Федерации действует ГОСТ 31507-2012 «Автомобильные транспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний» [8], согласно которому проводятся исследования транспортных средств на устойчивость при опрокидывании на стенде (п. 4.3.) при испытаниях «рывок руля» (п. 4.4.) и комплексные испытания совместно с управляемостью вида «поворот» и «переставка» (п. 4.5) и «пробег» (п. 4.7). Испытания проводят на дорогах как с сухим, так и с мокрым покрытием (пробег). Минимальный коэффициент сцепления при испытаниях

должен быть не менее 0,3 (п. 5.2.7). Определим, с каким расчетным боковым ускорением должен двигаться автомобиль по прямой дороге. Согласно ГОСТ 31507-2012, средняя угловая скорость корректирующих поворотов рулевого колеса при движении по полосе заданной ширины должна находиться в пределах от 7 до 14 $^{\circ}/с$ (п. 4.6.2). Считая величину передаточного отношения рулевого механизма равной от 16 до 25 (в среднем – 20), получим, что средняя скорость вращения колес автомобилей при движении по прямой будет находиться в пределах 0,5-0,6 $^{\circ}/с$ (для скорости движения 22,22 м/с данная величина составит 0,0225 $^{\circ}/м$). Величина «скорость поворота управляемых колес в зависимости от величины пробега автомобиля» определится зависимостью $\varpi = 0,0225 \cdot x$. Тогда максимальный угол поворота колес в зависимости от пробега будет равным $\alpha = 0,01125 \cdot x^2$. Полагая ширину коридора шире транспортного средства на 0,4 м (табл. 7 ГОСТ 31507-2012), получим полупериод колебания автомобиля в рамках допустимого коридора:

$$\frac{0,4}{2} = \int \sin \alpha dx = \int \alpha dx = 0,00375 \cdot x^3 \rightarrow x = \sqrt[3]{\frac{0,2}{0,00375}} = 3,76 \text{ м}$$

При этом максимальный угол поворота управляемого колеса при данном пробеге составит 0,16 $^{\circ}$. Радиус кривизны траектории автомобиля при указанном режиме движения

будет равным: $R = L / \text{tg} \alpha \approx 1000$ м, а величина поперечного ускорения – $a_y = \frac{v^2}{R}$ около

0,5 м/с 2 . Эти данные полностью соответствуют экспериментальным данным, полученным сотрудниками НГТУ им. Р.Е. Алексеева при испытаниях техники производства ОАО «ГАЗ» в период с 2010 по 2019 гг. в рамках выполнения работ по проекту «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда автомобилей ГАЗель Next с новой электронной архитектурой электронных систем» по Соглашению № 075-11-2019-027 от 29.11.2019 (постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218). (рис. 2). Испытания проводились на автомобильных дорогах общего пользования, как в городских, так и в загородных условиях (Нижний Новгород – Арзамас, Нижний Новгород – Павлово; Нижний Новгород – Красные Баки; Нижний Новгород – Лысково). Получаемые данные фиксировались с использованием датчиков системы RACELOGIC.

В связи со значительными колебаниями показателей датчиков (рис 2, 3 и 5) поперечное ускорение усреднялось в пределах 1 с записи (более жирная линия на графиках). При исследовании движения транспортных средств на автомагистралях величины боковых ускорений доходили до значений 0,08g, что связано с более высокими скоростями движения.

Геометрические параметры автомобильных дорог регламентируют величину поперечных ускорений автомобиля при движении со скоростью и радиусу кривизны траектории, установленными в качестве предельно допустимых. Согласно п. 3.5 ГОСТ 33475-2015 [9], исходя из зависимости, что центростремительное ускорение равняется величине:

$$a_y = \frac{v^2}{R}$$

, при движении по дорогам расчетные величины боковых ускорений не должны превышать величину 2,5 м/с 2 (рис. 3).

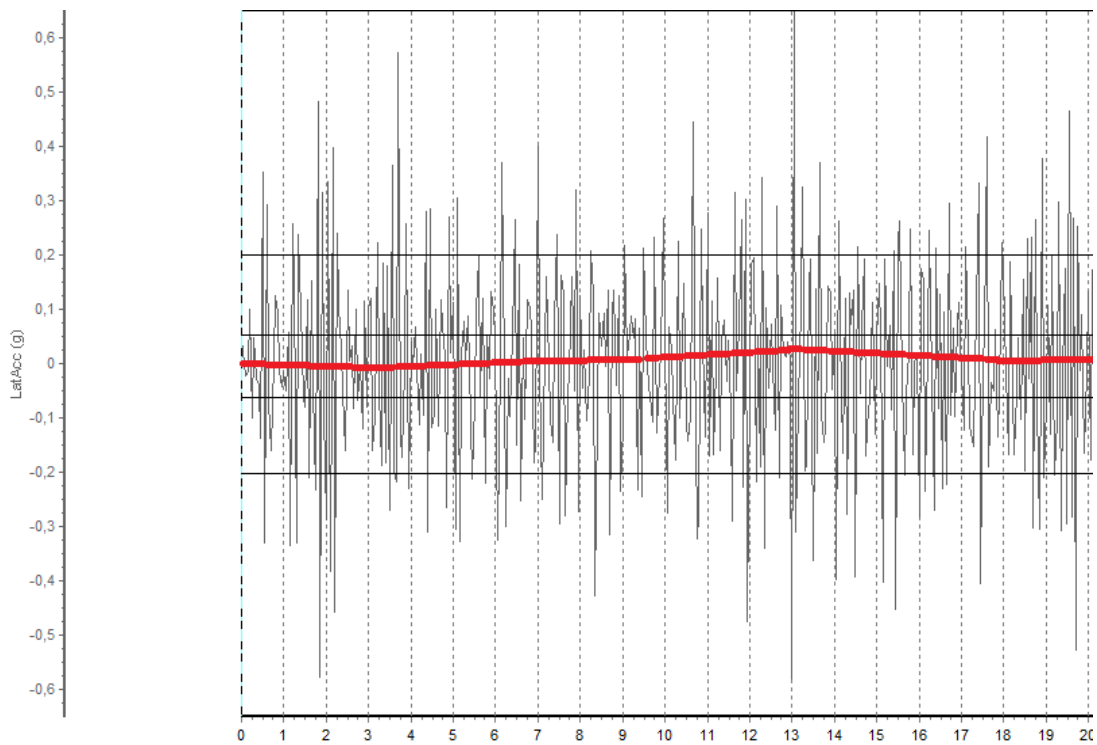


Рис. 2. Пример записи изменения поперечных ускорений автомобиля и фрагмент данной записи при движении по прямой горизонтальной дороге, полученный с использованием комплекса измерительной аппаратуры RACELOGIC

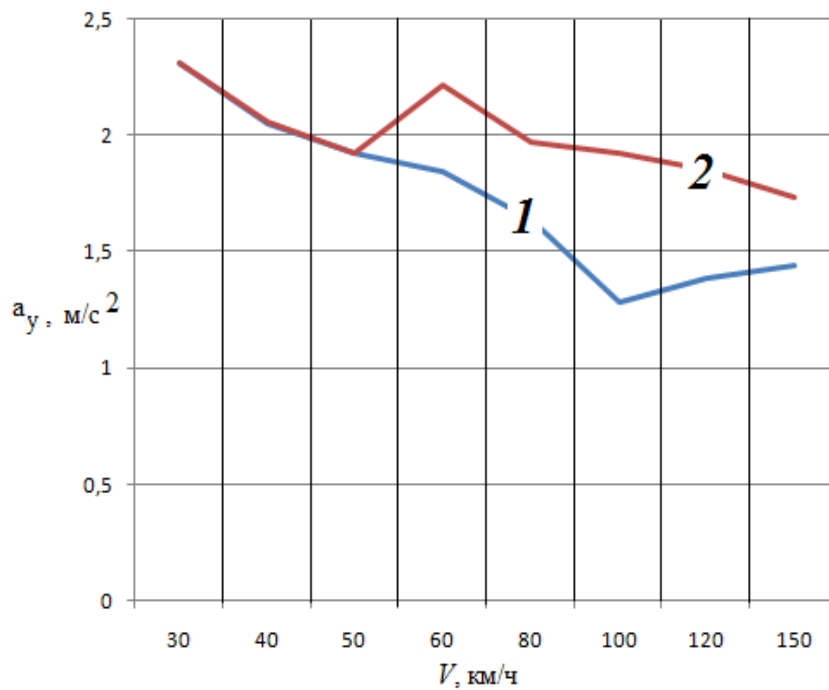


Рис. 3. Зависимость максимальных расчетных боковых ускорений, возникающих при движении по дорогам общего пользования с расчетными скоростями движения 1 – для обычных дорог, 2 – для горных дорог

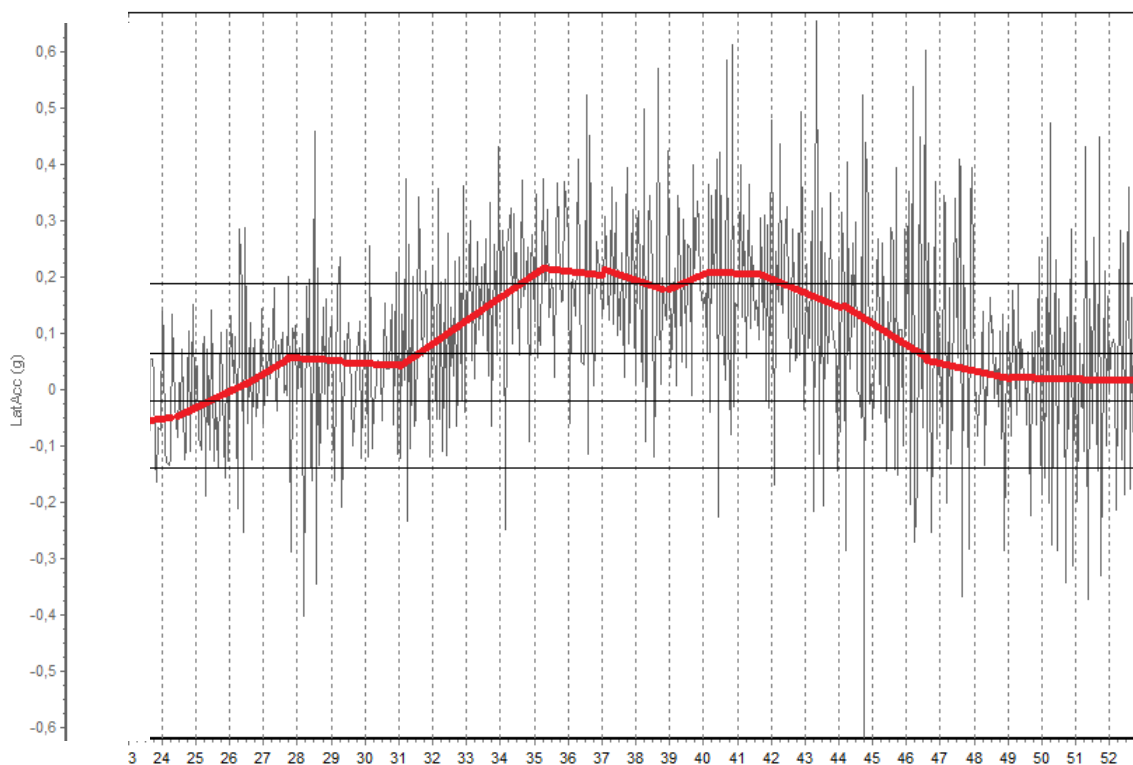


Рис. 4. Пример записи изменения поперечных ускорений автомобиля и фрагмент данной записи при движении по криволинейному участку дороги, полученный с использованием комплекса измерительной аппаратуры RACELOGIC

Согласно табл. 1. ОДМ 218.4.005-2010 «Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах» [11], к местам концентрации ДТП относят участки дорог, на которых интенсивность ДТП превышает значения 4 ДТП в год. Поскольку данные значения привязаны к интенсивности движения автомобилей и протяженностью участка, можно установить, какой пробег между ДТП нормативные документы считают минимально допустимым. Табл. 1 представляет собой исходную таблицу 5.3.1 из ОДМ 218.4.005-2010 «Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах» [11]. Умножая интенсивность движения на длину участка и деля на минимальное количество ДТП, получим модернизируемую таблицу, в которой в качестве показателя аварийности будет применяться пробег транспортных средств между ДТП.

Считая, что в одном ДТП в среднем участвуют 2-3 автомобиля [11], получим минимально допустимый пробег автомобиля между авариями (табл. 2).

Таблица 1 [4]

Исходная таблица для определения предельно-допустимой аварийности автомобилей

Интенсивность движения, авт/сут	Минимальное количество ДТП за три года на участках их концентрации при длине участка, м				
	до 200	200-400	400-600	600-800	800-1200
3000-7000	3	3	3	4	4
7000-11000	3	3	4	4	5
11000-13000	3	3	4	4	5
13000-15000	3	4	4	5	6
15000-17000	3	4	5	5	6
17000-20000	4	4	5	6	7
более 20000	4	4	6	6	8

Таблица 2

**Модернизированная таблица для определения
минимально допустимого пробега автомобиля между авариями**

Интенсивность движения, авт/сут	Минимальное пробег автомобиля между двумя ДТП, км				
	до 200м	200-400	400-600	600-800	800-1200
3000-7000	95217	190434	285652	285652	428478
7000-11000	1110870	1110870	833152	833152	666521
11000-13000	1745652	1745652	1309239	1309239	1047391
13000-15000	2063043	1547283	1547283	1237826	1031522
15000-17000	2380435	1785326	1428261	1428261	1190217
17000-20000	2023370	2023370	1618696	1348913	1156211
более 20000	2380435	2380435	1586957	1586957	1190217

Полученные данные свидетельствуют, что с увеличением длины исследуемого участка полученные результаты асимптотически стремятся к показателям пробега одного автомобиля между ДТП, равной 500 000 км пробега. Согласно табл. 2, ОДМ 218.4.005-2010 «Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах» [11] при интенсивности движения меньшей 3000 авт/сутки к местам концентрации ДТП относят участки дорог, на которых интенсивность ДТП находится в пределах от 900 000 до 1 млн км пробега или 400 000 км на 1 автомобиль. Согласно табл. 5 ОДМ 218.4.005-2010 «Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах» [11] к особо опасным участкам дороги относят участки дорог, на которых частота ДТП превышает значения показатели 1 ДТП на 250-500 000 км пробега или 100 000 км пробега на один автомобиль. Исходя из указанного принципа, можно предположить, что автомобили, частота попадания в ДТП которых превышает 1 ДТП на 500 000 км пробега, следует считать опасными для движения. Если же частота попадания их в ДТП превышает 1 ДТП на 100 тысяч км пробега, то особо опасными.

Следует отметить, что в рассматриваемых случаях рассматриваются ДТП с пострадавшими, которых за 2019 г. в Российской Федерации произошло около 160 000 ДТП [12]. Вместе с тем, согласно данным РСА [13], общее количество ДТП составило 2,1 млн, т.е., на одно ДТП с пострадавшими приходится в среднем 13 ДТП только с материальным ущербом. Автомобили, частота попадания в ДТП без пострадавших которых превышает 1 ДТП на 50 000 км пробега, следует считать опасными для движения; если же частота попадания их в ДТП превышает 1 ДТП на 10 000 км пробега, то – особо опасными.

Результаты исследования

Рассматривая движение автомобиля по автомобильной дороге в условиях экстренного торможения при движении по криволинейной траектории, можно сделать вывод о том, что, кроме сил и моментов, стремящихся отправить автомобиль в занос, будут действовать и стабилизирующие усилия, стремящиеся сохранить заданную траекторию движения. Степень отличия отклонения реальных параметров движения автомобиля от параметров, задаваемых водителем, характеризует устойчивость транспортного средства на траектории, а отклонение данных параметров до значений, которые уже не могут обеспечить безопасность движения, следует классифицировать как занос. При этом причиной возникновения заноса могут быть любые неуравновешенные воздействия на автомобиль: торможение в условиях микста, когда сцепление левых и правых колес автомобиля отличаются друг от друга, резкий поворот рулевого колеса. В условиях низкого коэффициента сцепления колеса с дорогой причиной возникновения заноса могут являться и боковые порывы ветра, и наклон проезжей части дороги [10, 11]. Для того, чтобы стандартизировать все виды внеш-

них воздействий на автомобиль, приводящих к его заносу, было принято решение выделить один параметр, который достоверно и полностью описывал бы характер поведения автомобиля во время действия на него боковых сил. Исследование существующих подходов к решению поставленной задачи показало, что для оценки степени устойчивости движения автомобиля применяют различные критерии. Разнообразие критериев оценки устойчивости движения автомобиля на дороге связано с огромным количеством условий и комбинаций управляющего воздействия на автомобиль во время движения по опорной поверхности, отличающейся как физическими, так и геометрическими параметрами.

В работе [8] для количественной оценки степени сопротивляемости автомобиля к возникновению заноса рекомендуется применять соотношение между коэффициентами боковой устойчивости и тормозной силы или соотношение между величиной продольной скорости и радиусом поворота автомобиля. Упрощая данные показатели, можно утверждать, что в наибольшей степени требованием к единому классификационному параметру, описывающему параметры возникновения заноса, является величина бокового ускорения, действующего на автомобиль. Данный параметр обладает физическим смыслом и может быть измерен, а его величина напрямую связана с устойчивостью движения автомобиля при экстренном торможении.

Статистический анализ экспериментальных данных показал, что вероятность воздействия той или иной боковой силы на движущийся автомобиль подчиняется зависимости вида (1):

$$f(a_y) = \frac{0,5}{0,71\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{a_y^2}{1,031}} \quad (1)$$

где 0,71 – среднее отклонение поперечного ускорения, 1,031 – удвоенное среднеквадратичное отклонение поперечного ускорения, а 0,5 – шаг измерения бокового ускорения.

Результаты расчета по полученной зависимости приведены на рис. 5.

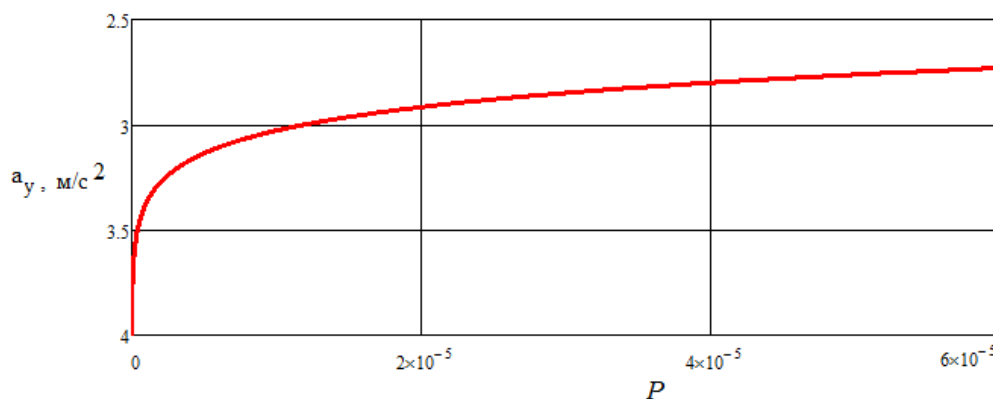


Рис. 5. Зависимость вероятности возникновения заноса при экстренном торможении от устойчивости автомобиля, выраженной предельной величиной бокового ускорения, при которой не происходит изменение параметров движения

Тогда, задавая допустимый уровень вероятности заноса автомобиля при экстренном торможении величиной P, получим, какие боковые ускорения должен выдерживать автомобиль (2):

$$P = 2 \int_{a_{доп}}^{\infty} f(a_y) = \frac{1}{0,71\sqrt{2\pi}} \int_{a_{доп}}^{\infty} e^{-\frac{a_y^2}{1,031}} da_y \quad (2)$$

Проанализировав вероятность торможений на дорогах получим, что она подчиняется экспоненциальному распределению вида (3):

$$f(\zeta) = be^{-b(\zeta)}, \quad (3)$$

где ζ – частота торможений (километров на одно торможение), а b – параметр масштаба, равный 0,4 удовлетворяет всем перечисленным критериям. Полученная зависимость показана на рис. 7.

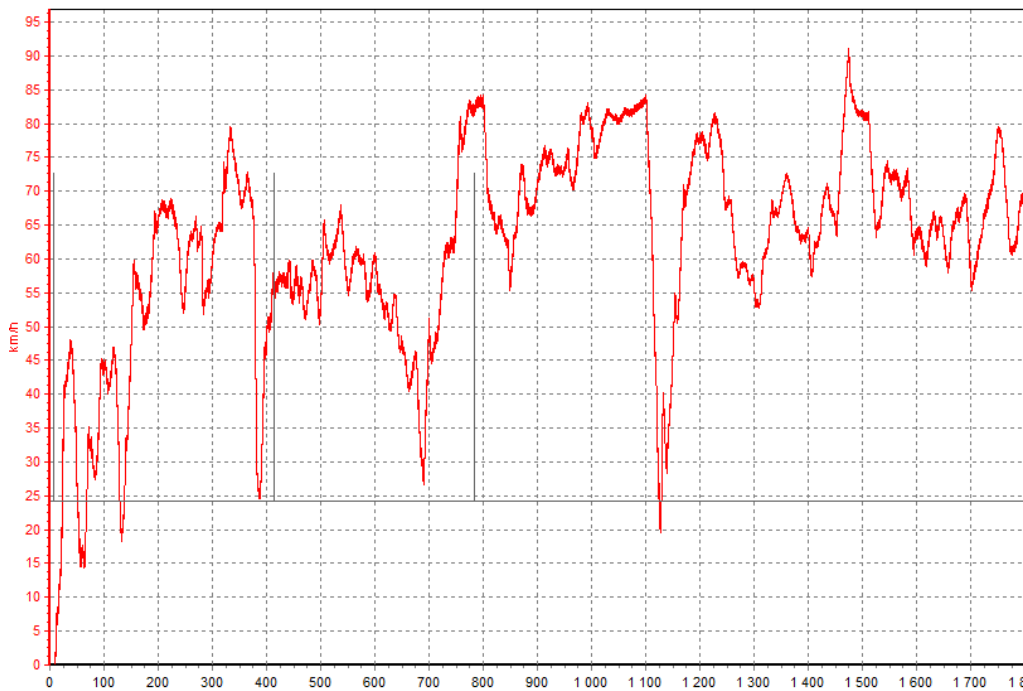


Рис. 6. Пример записи изменения скорости движения автомобиля на трассе

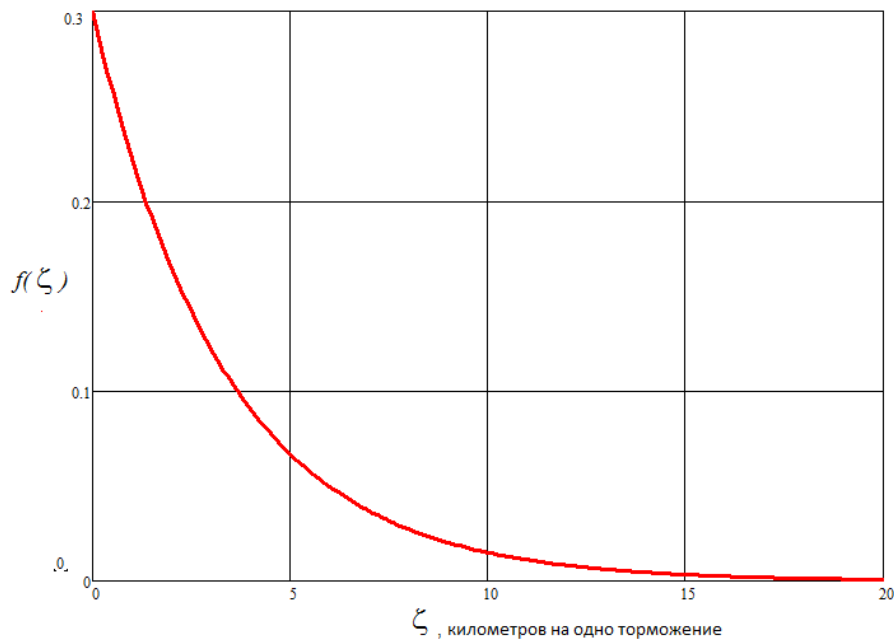


Рис. 7. Плотность распределения вероятности частоты торможений автомобилей

Полученные данные свидетельствуют о том, что на 10 000 км пробега автомобиль в среднем производит 250 неслужебных торможений, а на 50 000 – 1250. Автомобиль не будет считаться опасным, если частота возникновения заноса при экстренном торможении не будет превышать 1 занос на 1250 торможений. Подставляя данное значение вероятности в уравнение 2, получим, что при экстренном торможении автомобиль должен быть устойчив к боковому ускорению, равному $2,2 \text{ м/с}^2$. Если автомобиль неустойчив к ускорению, равному $1,9 \text{ м/с}^2$, он будет считаться особо опасным для эксплуатации. Приведенные данные справедливы при движении автомобилей по сухой асфальтовой дороге. В условиях движения по поверхности с недостаточным коэффициентом сцепления колеса с дорогой водители снижают скорость движения, тем самым снижая величину бокового ускорения. При этом изменяется и эффективность, и частота торможений. Поэтому транспортное средство, отвечающее критериям безопасности при движении по сухой асфальтовой дороге не обязательно будет считаться безопасным при движении по заснеженной дороге [10, 11]. Вопрос безопасности транспортных средств,двигающихся по поверхностям с низким коэффициентом сцепления, будет рассмотрен в дальнейших исследованиях.

Выводы

Результаты проведенного исследования позволили разработать требования к автомобилю для обеспечения его безопасной эксплуатации на основе допустимой вероятности возникновения заноса при экстренном торможении в условиях движения по сухой асфальтовой дороге. Предложен единый критерий устойчивости автомобиля, а именно – предельное значение бокового ускорения, действующего на автомобиль, при котором транспортное средство не выходит за габариты трехметрового коридора при экстренном торможении на сухой асфальтовой дороге.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда автомобилей ГАЗель Next с новой электронной архитектурой электронных систем» по Соглашению № 075-11-2019-027 от 29.11.2019 (постановление Правительства Российской Федерации от 09 апреля 2010 года №218). Экспериментальные исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования НГТУ «Транспортные системы».

Библиографический список

1. ОДМ 218.4.005-2010 Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах.
2. ОДМ 218.6.003-2011 Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах.
3. **Молев, Ю.И.** Обеспечение дорожной безопасности автомобильного транспорта в зимний период. Дисс. на соискание уч. степени доктора техн. наук. – Владимир: 2007. – 389с.
4. **Смирнов, И.А.** Математическое моделирование заноса автомобиля. Дисс. на соискание уч. степени кандидата физ.-мат. наук. – Москва: 2011. – 169с.
5. **Шапкин, В.А.** Улично-дорожная сеть Нижнего Новгорода как среда работы автомобильного транспорта / В.А. Шапкин, У.Ш. Вахидов, И.А. Ерасов, Ю.И. Молев. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. – 163 с.
6. Полотно пути транспортно-технологических машин / под общей редакцией В.В. Белякова, А.А. Куркина. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. – 447 с.
7. **Абгарян, К.А.** Введение в теорию устойчивости движения на конечном интервале времени. – М.: Наука, 1992. – 160 с.
8. ГОСТ 31507-2012 Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний.

9. ГОСТ 33475-2015 Дороги автомобильные общего пользования. Геометрические элементы. Технические требования.
10. Прошин, Д.Н. Методика определения степени влияния дорожных условий и конструкционных особенностей автомобилей на безопасность дорожного движения / Д.Н. Прошин, И.А. Ерасов, Н.А. Колесниченко, Ю.И. Молев, В.А. Шапкин // Мир транспорта и технологических машин. – 2015. – № 4 (51). – С. 82-88.
11. Вахидов, У.Ш. Подвижность колесных машин на заснеженном склоне / У.Ш. Вахидов // Современные проблемы науки и образования – 2012. – № 4. – С. 111.
12. Аварии на трассе. Выпуск от 10 января 2019. – Режим доступа: https://www.youtube.com/watch?v=nyFwTRwgk1M_
13. Показатели состояния безопасности. – Режим доступа: <http://stat.gibdd.ru/>.
14. Сайт Российского союза автостраховщиков. – Режим доступа: https://autoins.ru/novosti/tekushchie/?ELEMENT_ID=146261.

*Дата поступления
в редакцию: 27.01.2020*

A.S. Vashurin, Yu.I. Molev, D.N. Proshin, Yu.P. Trusov

DEVELOPMENT OF REQUIREMENTS FOR STABILITY OF VEHICLES UNDER EMERGENCY BRAKING

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: The stage of interaction of the working body of a fire-fighting soil-throwing-strip-laying machine with soil is considered. It is noted that when developing forest fire engines, it is necessary to take into account the natural qualities of the soil, the geometric design features, as well as the operating modes of the unit.

Design / methodology / approach: The technique of simulation of the working environment in interaction with the working bodies of the unit is presented. The working bodies of the combined fire-fighting soil-throwing strip-spreading machine interact with the medium in several stages: first, the cutting edge of the spherical discs develops solid soil, separated soil layers are formed into the formed soil shaft, milling cutters, which also function in several stages, form a directed flow: separate the soil from a pre-formed loosened shaft, mechanically milling the soil layer with a cutting edge, and then giving a mechanical impulse already rotary blade. The process of separating the soil layer at the entrance to the work of active working bodies is carried out by the cutting edges of the working bodies.

Research implications: It is indicated that when simulating the physical and mathematical process of the operation of a forest fire fighting machine, it is of great importance to take into account in the model the physical and mechanical properties of soil, which are characterized by particle size distribution, density, porosity, moisture, cohesion, loosening, angle of repose, ductility, compressibility, strength, shear resistance, friction coefficients of the soil on steel and soil on the soil, abrasion, stickiness.

Keywords: wildfire, discrete element method, simulation, soil, milling thrower, spherical disks, interaction of planes, numerical integration.