

Научная статья
УДК 656.13.052.43

Обоснование величины критической скорости автомобиля при повороте с учетом теории риска

Наталья Юрьевна Лахтина¹, Руслан Руфатович Багаутдинов²

^{1,2}Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹lahtina@inbox.ru

²8822188@mail.ru

Аннотация. Статистика ДТП показывает, что причиной большого количества аварий является неправильно выбранная водителем скорость проезда поворота. Решением этой проблемы может стать система помощи водителю, которая будет информировать водителя о превышении допустимой скорости. Однако для реализации этой системы необходимо знание критической скорости автомобиля по заносу, которая, в свою очередь, зависит от радиуса поворота и коэффициента поперечного сцепления колеса с поверхностью дороги. С получением этого коэффициента возникают трудности, т.к. разные авторы предлагают различные способы его расчета и экспериментального определения, что приводит к разным результатам в расчетах критической скорости. В статье рассмотрены методы определения коэффициента поперечного сцепления и выбран наиболее подходящий с точки зрения теории риска. Приведены зависимости критической скорости автомобиля от радиуса поворота и коэффициента поперечного сцепления колеса с учетом теории риска для допустимых значений коэффициента риска.

Ключевые слова: криволинейное движение автомобиля, критическая скорость автомобиля при повороте, система помощи водителю при повороте, методы определения коэффициента сцепления, теория риска.

Для цитирования: Лахтина Н.Ю., Багаутдинов Р.Р. Обоснование величины критической скорости автомобиля при повороте с учетом теории риска // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2025. № 1 (43).

Original article

Justification of the value of the critical speed of the car when turning taking into account the theory of risk

Natalia Yu. Lakhtina¹, Ruslan R. Bagautdinov²

^{1,2}Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

¹lahtina@inbox.ru

²8822188@mail.ru

Abstract. Accident statistics show that the reason for a large number of accidents is the wrong turn speed chosen by the driver. The solution to this problem can be a driver assistance system that will inform the driver about exceeding the speed limit. However, in order to implement this system, it is necessary to know the critical speed of the car on the skid, which, in turn, depends on the turning radius and the coefficient of transverse adhesion of the wheel to the road surface. It is difficult to obtain this coefficient, because different authors propose different ways of calculating and experimentally determining it, which leads to different results in calculating the critical velocity. The article discusses methods for determining the coefficient of transverse adhesion and selects the most appropriate method from the point of view of risk theory. The dependences of the critical speed of the car on the turning radius and the coefficient of transverse wheel coupling are given, taking into account the risk theory for the permissible values of the risk coefficient.

Keywords: curvilinear motion of the car, driver assistance system when turning, methods for determining critical speed, methods for determining the coefficient of adhesion, risk theory.

For citation: Lakhtina N.Yu., Bagautdinov R.R. Justification of the value of the critical speed of the car when turning, taking into account the theory of risk. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2025. № 1 (43).

Введение

Автомобиль по-прежнему остается одним из самых аварийно-опасных видов транспорта, несмотря на общую тенденцию снижения количества ДТП на дорогах. Одной из основных причин происшествий на дорогах является человеческий фактор, так как человек, в силу своих физических и психологических особенностей, склонен допускать ошибки при управлении автомобилем.

Такой ошибкой водителя, по причине которой происходит более 22% всех ДТП, является неправильный выбор скорости движения [1]. Обычно, когда речь идет о превышении скоростного режима, в первую очередь, предполагается неправомерно высокая скорость автомобиля на автомагистралях или иных относительно прямолинейных участках дороги. Однако не менее опасным является превышение скорости на криволинейных участках дороги, которое может привести не только к столкновению с

другими транспортными средствами, но и к опрокидыванию или съезду с дороги. Согласно статистике, более 40% всех ДТП, связанных с превышением скорости, относятся именно к криволинейным участкам дорог и приводят к опрокидыванию или съезду с дороги (рис.1) [2].

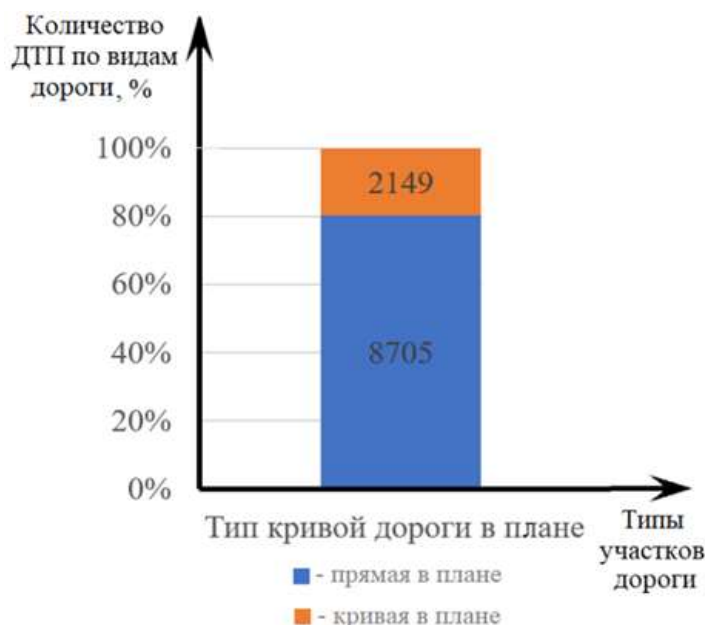


Рис. 1. Статистика ДТП по типу дорог в плане связанных с превышением скорости за 2022 год [2]

Решением этой проблемы может стать система помощи водителю при повороте, которая будет информировать водителя о превышении скорости на повороте. Для реализации такой системы необходимо знание допустимой скорости автомобиля при движении по кривой заданного радиуса.

Поперечная устойчивость автомобиля при повороте

Показателями поперечной устойчивости автомобиля при движении по кривой заданного радиуса являются критическая скорость по боковому скольжению (заносу) и критическая скорость по опрокидыванию.

Критическая скорость заноса рассчитывается по формуле [3]:

$$V_{\text{зн}} = 3,6 \cdot \sqrt{R \cdot g \cdot \varphi_{\text{попер}}} \quad (1)$$

где $V_{\text{зн}}$ – критическая скорость автомобиля по условию заноса, м/с;

g – ускорение свободного падения (м/с²);

$\varphi_{\text{попер}}$ — часть общего коэффициента сцепления, действующая в поперечном направлении;

R — радиус поворота автомобиля.

Как видно из данной формулы, на критическую скорость влияют два основных параметра — составляющая коэффициента сцепления в поперечном направлении и непосредственно радиус кривой поворота, по которой движется автомобиль.

Радиусы кривых дорог в плане выбираются в соответствии с проектной и нормативной документацией и должны удовлетворять планируемым режимам движения на строящемся участке или иметь специальное регулирование скоростного режима. Одним из таких нормативных документов, регламентирующим радиусы кривых дорог в плане и разрешенные скоростные режимы на них, является СП34.13330.2021 «Свод правил. Автомобильные дороги. СНиП 2.05.02-85».

Вторым параметром, влияющим на критическую скорость, является поперечная составляющая коэффициента сцепления. В обычных условиях при движении автомобиля строго в продольном направлении без воздействия каких-либо боковых сил коэффициент сцепления в продольном направлении оказывается равен общему коэффициенту сцепления. Однако движение автомобиля по криволинейной траектории — сложный процесс, при котором направление равнодействующих сил не является строго продольным или строго поперечным относительно направления движения. Поэтому общий коэффициент сцепления шин автомобиля с дорогой можно разложить на продольную и поперечную составляющую, каждая из которых обеспечивает сцепление в соответствующем направлении. При рассмотрении ситуации с критической скоростью по условию заноса наибольший интерес представляет именно поперечная составляющая, которая напрямую влияет на поперечное сцепление колес, противопоставляемое боковой силе.

Существуют различные методы определения поперечного коэффициента сцепления, которые предлагают Боровский Б.Е., Тарасик В.П., Кристи Н.М. и Столяров В.В.

Тарасик В.П. в труде «Теория движения автомобиля» предполагает, что коэффициенты сцепления в продольном и поперечном направлениях равны.

$$\varphi_{\text{прод}} = \varphi_{\text{попер}}$$

Боровский Б.Е. в труде «Безопасность движения автомобильного транспорта» однозначно заключает, что коэффициент сцепления в поперечном направлении меньше, чем в продольном.

$$\varphi_{\text{попер}} = (0,5 \dots 0,85) \cdot \varphi_{\text{прод}}$$

Аналогичный вывод делает Кристи Н.М. в труде «Определение скорости отбрасывания транспортного средства после столкновения», предлагая следующую формулу для поперечного коэффициента сцепления при условии заноса автомобиля.

$$\varphi_{\text{попер}} = 0,62 \cdot \varphi_{\text{прод}}$$

Более точное определение поперечного коэффициента сцепления приводит Столяров В.В. в труде «Проектирование автомобильных дорог с учетом теории риска» [4]. Согласно его утверждению, поперечная составляющая коэффициента сцепления равна некоторой части общего коэффициента сцепления с поправкой на коэффициент тяговой силы, который различен для каждого конкретного автомобиля и каждой конкретной ситуации, характеризуемой скоростью, уклоном дороги, скоростью ветра и прочими параметрами:

$$\varphi_{\text{попер}} = \sqrt{\varphi_{\text{прод}}^2 - \mu_x^2},$$

где μ_x – коэффициент тяговой силы.

Эта формула является наиболее точной с точки зрения учета всех возможных параметров в каждой конкретной ситуации, но не подходит для

использования в системах помощи водителю, так как потребует серьезного усложнения алгоритмических и конструктивных аспектов системы.

Большое количество методов расчета поперечного коэффициента сцепления создает сложности в его выборе для расчета критической скорости автомобиля. Для определения наиболее достоверного метода предлагается использовать математический аппарат теории риска.

Критическая скорость автомобиля при повороте с учетом теории риска

Теория риска представляет собой универсальный математический аппарат для определения вероятности возникновения неблагоприятного или опасного события или исхода. Теория риска нашла широкое применение при решении научно-исследовательских и инженерных задач.

Риск r движения автомобиля со скоростью V по кривой с радиусом R можно определить по формуле [4]:

$$r = 0,5 - \Phi \left(\frac{R - R_M}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_M^2}} \right),$$

где R – величина радиуса дороги;

R_M – значение минимального радиуса дороги, риск движения по которой со скоростью V равен 50%;

σ_R – среднее квадратичное отклонение значений R ;

σ_M – среднее квадратичное отклонение значений R_M .

$\Phi(u)$ – интеграл вероятности, определяемой по подынтегральной функции u при помощи таблицы нормированных функций Лапласа.

На рисунке 2 приведены графики зависимости критической скорости поворота от радиуса поворота для разных степеней риска. Построения произведены для дороги с асфальтобетонным покрытием и коэффициентом сцепления равным 0,7.

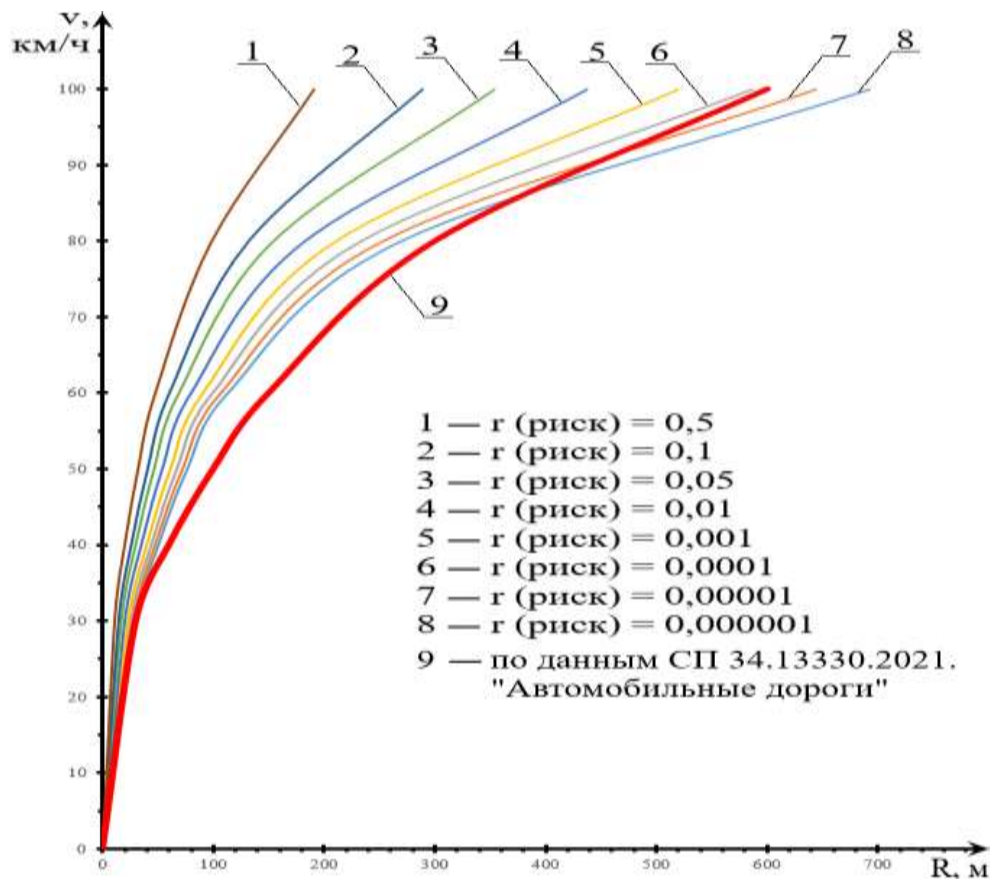


Рис. 2. Зависимость критической скорости от радиуса поворота при различных значениях величины принимаемого риска r

Как видно из графиков, при возрастании критической скорости движения на повороте конкретного радиуса кривизны, увеличивается и величина допустимого риска. Так, например, преодоление поворота радиусом 50 м на скорости 58 км/ч обеспечивает риск возникновения ДТП 50%. Однако если преодолевать тот же поворот со скоростью менее 40 км/ч, то риск ДТП становится незначительным. На рисунке 2 также представлены зависимость критической скорости от радиуса поворота по нормам СП34.13330.2021. Из графика следует, что в этом случае на скоростях до 80 км/ч. риск возникновения ДТП стремится к нулю, а на более высоких скоростях также остается мал и равен 10^{-5} - 10^{-6} .

Для определения наиболее достоверного метода расчета поперечной составляющей коэффициента сцепления были построены графики

зависимости критической скорости от радиуса поворота для разных значений $\varphi_{\text{попер}}$ и аналогичные зависимости для разных значений риска (рис. 3).

Графики показывают, что расчеты по методу Тарасика В.П. (зависимость 1) не обеспечивают даже 50% процентного риска, что является абсолютно недопустимой величиной вероятности ДТП. Метод Кристи Н.М. (зависимость 4) обеспечивает 5-10% риск на скоростях до 68 км/ч, что также является весомой величиной вероятности ДТП. Метод расчета Боровского Б.Е. по верхней границе ($0,85 \cdot \varphi_{\text{прод}}$) (зависимость 2), как и метод Тарасика В.П., в лучшем случае обеспечивает лишь 50% риск возникновения ДТП. Однако, при рассмотрении метода Боровского Б.Е. по нижней границе ($0,5 \cdot \varphi_{\text{прод}}$) (зависимость 3) обнаруживается, что на скоростях 60 км/ч обеспечивается риск менее 1%, на скоростях от 60 до 72 км/ч обеспечивается риск от 1 до 5%, и лишь на скоростях свыше 72 км/ч риск превышает 5%.

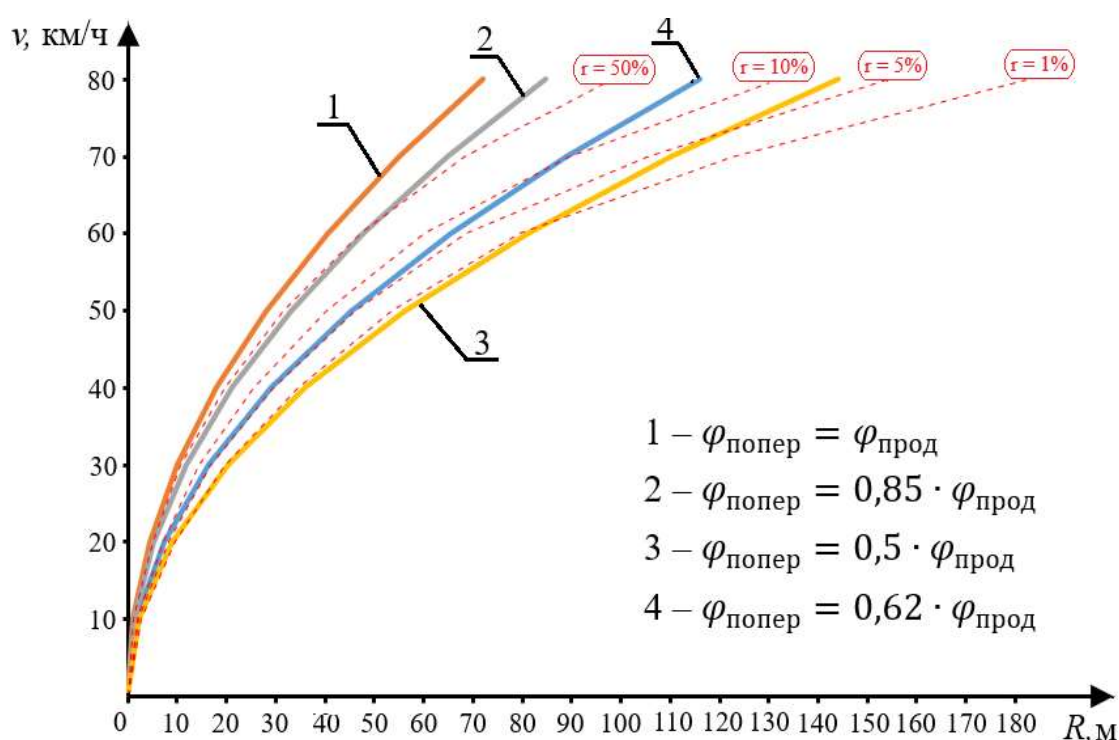


Рис. 3. Зависимости критической скорости от радиуса поворота для разных значений $\varphi_{\text{попер}}$ и величины риска

Согласно Столярову В.В. практически допустимой величиной риска при решении инженерной задачи, связанной с проектированием дороги, является величина не более $1 \cdot 10^{-6}$. Подобную величину риска обеспечивает рассматриваемый в данной статье документ СП34.13330.2021. Однако при разработке алгоритма системы помощи водителю подобные величины риска могут быть избыточны. Все современные автомобили в обязательном порядке оснащаются средствами активной безопасности, которые способны помочь водителю в удержании траектории движения в критических ситуациях.

Также следует учитывать, что практический риск, описанный в ГОСТ Р 58137-2018, выше, чем $1 \cdot 10^{-6}$ и для ситуаций с риском от $1 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ с локальным ущербом и легкими ранениями людей считается допустимым (рис. 4).

Уровень частоты (вероятности) опасных событий	Уровень вреда при возникновении опасных событий				
	U1 (чрезвычайный ущерб)	U2 (существенный ущерб)	U3 (умеренный ущерб)	U4 (локальный ущерб)	U5 (минимальный ущерб)
P1 (св. 1)					
P2 (св. 10^{-2} до 1)					
P3 (св. 10^{-4} до 10^{-2})					
P4 (св. 10^{-6} до 10^{-4})					
P5 (до 10^{-6})					

■ - критический (неприемлемый) риск;
■ - практически возможный риск;
■ - допустимый (приемлемый) риск;
■ - оптимальный риск.

Рис. 4. Матрица риска по ГОСТ Р 58137-2018 с обозначением зоны принимаемого риска в рассматриваемых дорожных ситуациях

Выводы

При разработке алгоритма работы системы помощи водителю при повороте, предлагается рассчитывать коэффициент поперечного сцепления по методу Боровского Б.Е. ($\varphi_{\text{попер}} = 0,5 \cdot \varphi_{\text{прод}}$). Данный метод обеспечит риск 1%, который представляется допустимым при соблюдении водителем правил дорожного движения и наличием в автомобиле активных средств безопасности. При этом, в отличие от нормативов СП34.13330.2021, скорости

движения на поворотах по данному методу значительно выше, а значит скоростной режим на всей протяженности пути будет стремиться к постоянному, что существенно снизит риск возникновения ДТП в связи с разностью скоростей потока на различных участниках протяженности дорог.

Список источников

1. Дорожно-транспортная аварийность в Российской Федерации за 9 месяцев 2022 года : Информационно-аналитический обзор / К. С. Баканов, П. В. Ляхов, А. С. Айсанов [и др.]. – Москва : Научный центр безопасности дорожного движения МВД РФ, 2022. – 40 с. – EDN NGIULK.
2. Дорожно-транспортная аварийность в Российской Федерации за 2022 год : Информационно-аналитический обзор / К. С. Баканов, П. В. Ляхов, А. С. Айсанов [и др.]. – Москва : Научный центр безопасности дорожного движения МВД РФ, 2023. – 150 с. – ISBN 978-5-6046952-7-2. – EDN NIEWCY.
3. Волков, Е.В. Теория движения автомобиля: монография / Е.В. Волков. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2018. – 204 с.
4. Столяров, В. В. Проектирование автомобильных дорог с учетом теории риска / В. В. Столяров. Том Часть 1. – Саратов : федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.", 1994. – 184 с. – ISBN 5-230-07285-7. – EDN TBBSYV.

References

1. Bakanov K.S., Lyakhov P.V., Aisanov A.S., Tsaregorodtseva Ye.A., Sergunova A.S., Selednikov N.V., Naumov S.B. *Dorozhno-transportnaya avariynost' v Rossiyskoy Federatsii za 9 mesyatsev 2022 goda* (Road traffic accidents in the Russian Federation for 9 months of 2022), Moscow, Nauchnyy tsentr bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya MVD RF, 2022, 40 p.
2. Bakanov K.S., Lyakhov P.V., Aisanov A.S., Isaev M.M. Nikulin Ye.D., Koblov P.S., Sergunova A.S., Selednikov N.V., Naumov S.B., Knyazev A.S. *Dorozhno-transportnaya avariynost' v Rossiyskoy Federatsii za 2022 god* (Road traffic accidents in the Russian Federation in 2022), Moscow, Nauchnyy tsentr bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya MVD RF, 2023, 150 p.
3. Volkov E.V. *Teoriya dvizheniya avtomobilya* (Theory of car movement), Khabarovsk, Izd-vo Tikhookean. gos. un-ta, 2018, 204 p.

4. Stolyarov V.V. *Proyektirovaniye avtomobil'nykh dorog s uchetom teorii riska* (Designing highways taking into account the theory of risk), Saratov, Saratovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet imeni Gagarina YU.A., 1994, 184 p.

Рецензент: В.В. Гаевский, д-р техн. наук, проф., МАДИ

Информация об авторах

Лахтина Наталья Юрьевна, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

Багаутдинов Руслан Руфатович, магистр, МАДИ.

Information about the authors

Lakhtina Natalia Yu., Candidate of Sciences (Technical), associate professor, MADI.

Bagautdinov Ruslan R., Master of Engineering sciences, MADI.

Статья поступила в редакцию 23.11.2024; одобрена после рецензирования 17.03.2025; принята к публикации 24.03.2025.

The article was submitted 23.11.2024; approved after reviewing 17.03.2025; accepted for publication 24.03.2025.