



15. Kazakov M. A. Robastnii optimizator Adam na osnove usrednyayushchikh agregiruyushchikh funktsii [Robust adam optimizer based on averaging aggregation functions]. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS]. 2025, vol. 27, no. 5, pp. 159–167. DOI 10.35330/1991-6639-2025-27-5-159-167.
16. Zhigulin V. I., Shumilov K. A., Alfimov V. A. Analiz skorosti raboti i rekomendatsii pri rabote s neironnimi setyami [Speed analysis and recommendations for working with neural networks]. *Inzhenerno-stroitel'nyi vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2023, no. 4 (46), pp. 92–95. DOI 10.52684/2312-3702-2023-46-4-92-95.
17. Sadek M. G., Hassan A. Y., Diab T. O., Abdelhafeez A. Advancing Text-to-Image Generation: A Comparative Study of Style-GAN-T and Stable Diffusion 3 under Neutrosophic Sets. *Neutrosophic Sets and Systems*. 2025, vol. 85, pp. 784–800. DOI 10.5281/zenodo.15380944.
18. Zhang X., Xuan Ch., Ma Ya., Su He. A high-precision facial recognition method for small-tailed Han sheep based on an optimised Vision Transformer. *Animal*. 2023, vol. 17, no. 8, pp. 100886. DOI 10.1016/j.animal.2023.100886.
19. Patil S., Patil Y. M. Face Expression Recognition Using SVM and KNN Classifier with HOG Features. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2022, vol. 303 SIST, pp. 416–424. DOI 10.1007/978-981-19-2719-5_39.
20. Kolyuchkin V. Ya., Nguen K. M. Vibor rabocheho slovarya priznakov v algoritmakh raspoznavaniya izobrazhenii na osnove fure-deskriptorov [Selecting an informative features vocabulary for recognition algorithms based on Fourier-descriptors]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N. E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU]. 2014, no. 3, pp. 188–199. DOI 10.7463/0314.0699817.

© И. А. Соловьева, И. Б. Муравьев, Д. С. Соловьев

Ссылка для цитирования:

Соловьева И. А., Муравьев И. Б., Соловьев Д. С. Математическая модель и программный комплекс для системы детектирования синтетических изображений лиц в среде мессенджера на базе сверточной нейронной сети efficientnetb3 // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 1 (55). С. 126–134.

УДК 531.3:629.3.015:519.6

DOI 10.52684/2312-3702-2026-55-1-134-141

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ДЛЯ АНАЛИЗА СКОРОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПО ДАЛЬНОСТИ СВОБОДНОГО ПОЛЕТА
АНТРОПОМЕТРИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА**

А. В. Синельщиков, Е. В. Пономарева, Е. Д. Пономарева

Синельщиков Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань, Российская Федерация, тел.: + 7 (927) 282-62-11; e-mail: laex@bk.ru;

Пономарева Елена Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Общественные дисциплины и наземный транспорт», Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Российская Федерация, тел.: + 7 (927) 566-50-32; e-mail: acmpax@rambler.ru;

Пономарева Елена Дмитриевна, студент, Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Российская Федерация, тел.: + 7 (917) 182-47-33; e-mail: acmpax@rambler.ru

В статье представлена методика анализа скоростных параметров транспортных средств при столкновениях, основанная на кинематике свободного полета антропометрического объекта. Исследование направлено на повышение точности инженерных расчетов при ударе легких моторных средств о массивные препятствия. Научная новизна заключается в интеграции дифференциальных уравнений динамики твердого тела с учетом односторонних связей и импульсных воздействий, описываемых аппаратом обобщенных функций. Рассмотрен механизм трансформации поступательной энергии системы во вращательное движение («эффект катапульты») при блокировке передней оси. Разработанная математическая модель учитывает горизонтальную проекцию скорости и вертикальную составляющую, возникающую за счет угловой скорости тангажа. Модель верифицирована путем сопоставления расчетных траекторий с координатами падения объекта. Моделирование показало высокую чувствительность результатов к антропометрии водителя и геометрии транспортного средства.

Ключевые слова: математическое моделирование, динамика столкновений, закон сохранения импульса, свободный полет, антропометрические данные, эффект катапульты, неупругое столкновение, численное моделирование, односторонние связи, обобщенные функции.

**DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL MODELING METHODOLOGY
FOR ANALYZING VEHICLE VELOCITY PARAMETERS BASED ON THE FREE-FLIGHT DISTANCE
OF AN ANTHROPOMETRIC OBJECT**

A. V. Sinelshchikov, Ye. V. Ponomareva, Ye. D. Ponomareva

Sinelshchikov Aleksey Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Industrial and Civil Engineering Department, Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, Astrakhan, Russian Federation, phone: + 7 (927) 282-62-11; e-mail: laex@bk.ru;

Ponomareva Yelena Vladimirovna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of General Engineering Disciplines and Land Transport Department, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation, phone: + 7 (927) 566-50-32; e-mail: acmpax@rambler.ru;

Ponomareva Yelena Dmitriyevna, student, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation, phone: + 7 (917) 182-47-33; e-mail: acmpax@rambler.ru

The article presents a methodology for analyzing vehicle speed parameters during collisions, based on the free-flight kinematics of an anthropometric object. The study aims to improve the accuracy of engineering calculations in cases where light motorized vehicles strike massive obstacles. The scientific novelty lies in the integration of differential equations of rigid body dynamics, accounting for unilateral constraints and impulsive forces described by the apparatus of generalized functions. The mechanism of translational energy transformation into rotational motion (the "catapult effect") occurring upon front axle locking is examined. The developed mathematical model accounts for both the horizontal velocity projection and the vertical component arising from the pitch angular velocity. The model was verified by comparing calculated trajectories with the object's impact coordinates. Numerical simulation demonstrated high sensitivity of the results to the driver's anthropometric data and the vehicle's geometric characteristics.

Keywords: *mathematical modeling, collision dynamics, law of conservation of momentum, free flight, anthropometric data, catapult effect, equation of moments, inertia tensor, angular velocity, inelastic collision, motion trajectory, computational modeling, pitch, yaw, center of mass, unilateral constraints, generalized functions, model verification, kinematic analysis.*

Введение

Современное состояние транспортной среды характеризуется ростом интенсивности движения и усложнением качественного состава транспортных потоков, в которых значительную долю занимают легкие моторные средства [1–4]. Анализ обстоятельств столкновений с участием данной категории транспорта представляет собой одну из наиболее трудоемких задач, требующих применения точных методов физико-математического моделирования. Традиционные аналитические подходы [19, 20], опирающиеся преимущественно на замеры тормозного пути или оценку деформаций, зачастую оказываются недостаточно информативными в ситуациях, когда кинематика процесса включает сложную пространственную ориентацию объектов и мгновенную трансформацию видов движения [5–7]. В этой связи особую актуальность приобретает разработка и внедрение методик, позволяющих определять скоростные режимы участников столкновения на основе анализа траекторий свободного полета и конечного положения антропометрических объектов и транспортных средств [10, 11].

Научная проблема, рассматриваемая в данной работе, сосредоточена на поиске объективных критериев связи между энергией столкновения и баллистическими характеристиками перемещения водителя после отделения от транспортного средства (мотоцикла). Сложность моделирования подобных процессов обусловлена необходимостью учета широкого спектра факторов: от инерционных характеристик системы и векторов импульсного взаимодействия до специфики односторонних связей, удерживающих водителя. Прикладная ценность исследования заключается в возможности получить математически обоснованные данные о скорости в момент первичного контакта. Это требует пересмотра классических моделей в пользу более сложных систем, способных описывать динамику взаимодействия тел с резко различающимися массами и моментами инерции.

Методологический базис исследования опирается на синтез методов динамического анализа и численного моделирования. Авторами предлагается использование аппарата обобщенных функций и теории функций с ограниченным изменением, что позволяет преодолеть математические разрывы в точках импульсного воздействия и описывать траектории движения как непрерывные процессы на всем протяжении – от момента соударения до окончательной остановки объектов. В противополо-

жность элементарным расчетным схемам, предлагаемая методика базируется на углубленном анализе трансформации кинетической энергии поступательного движения в энергию вращения, обусловливающую возникновение динамического «эффекта катапульти» [12, 13, 15, 18]. Интеграция дифференциальных уравнений динамики твердого тела с учетом пространственного вращения вокруг подвижного полюса позволяет повысить достоверность заключений, переводя процесс анализа столкновения в плоскость вычислительной верификации. Таким образом, работа направлена на создание комплексного алгоритма, связывающего теоретическую механику с практическими задачами инженерного анализа [8, 9].

Методы

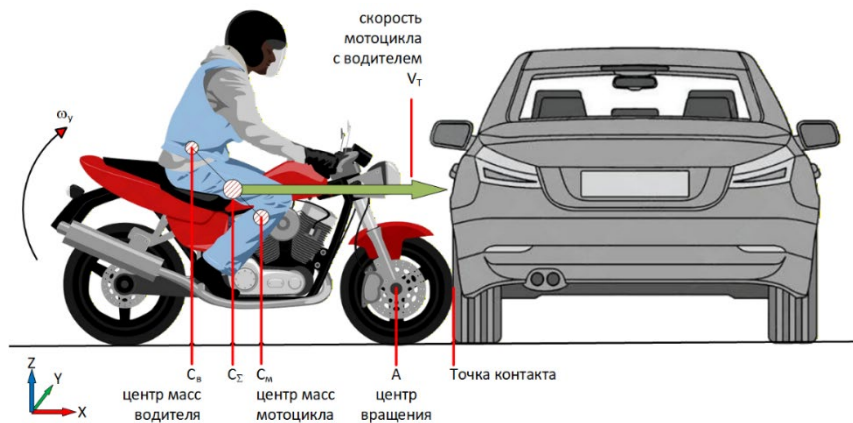
Методологическую основу исследования составляет классический подход механики в форме основного закона динамики, адаптированный для систем с импульсными воздействиями. Движение тел рассматривается как непрерывный процесс, описываемый обыкновенными дифференциальными уравнениями на всем протяжении, включая моменты соударения и участки движения по границам связей. Для описания вращательного движения системы «мотоцикл-водитель» используется уравнение моментов импульса относительно подвижного полюса, расположенного на оси переднего колеса автомобиля. При этом силовое взаимодействие с препятствием (точка контакта) происходит передней частью колеса. В модели учитываются паспортные технические характеристики транспортных средств, такие как снаряженная масса, колесная база и моменты инерции, а также антропометрические параметры водителя, определяющие положение общего центра тяжести. Расчет скоростей производился с учетом законов сохранения энергии и импульса, при этом столкновение рассматривалось как неупругое ввиду неизбежной деформации конструктивных элементов. Решение базируется на применении основного закона динамики, дополненного аппаратом обобщенных функций для корректного описания траекторий в точках соударения и на участках с наложенными односторонними связями. Основной целью моделирования выступает установление функциональной зависимости между скоростью мотоцикла перед столкновением и конечным положением водителя мотоцикла. При этом физический процесс столкновения является неупругим, что подразумевает частичную трансформацию кинетической энергии в энергию деформации элементов конструкции при сохранении общего импульса системы.

Расчетная схема моделирует взаимодействие автомобиля и мотоцикла как последовательную смену состояний механической системы. Автомобиль, обладающий снаряженной массой, значительно превышающей суммарную массу мотоцикла и водителя, и значительной инерцией, рассматривается в направлении оси движения мотоцикла как массивное, практически неподвижное препятствие. В проекции на направление движения мотоцикла импульс

автомобиля принимается равным нулю, что позволяет рассматривать изменение кинетической энергии только легкого транспортного средства.

Центральным элементом расчетной схемы является точка контакта А, связанная с осью переднего колеса мотоцикла (рис. 1). В момент удара эта точка приобретает свойства шарнира, смещающегося в горизонтальной плоскости (вдоль оси Y) со скоростью автомобиля, в то время как поступательная скорость по оси X мгновенно падает до нуля.

а
135



б

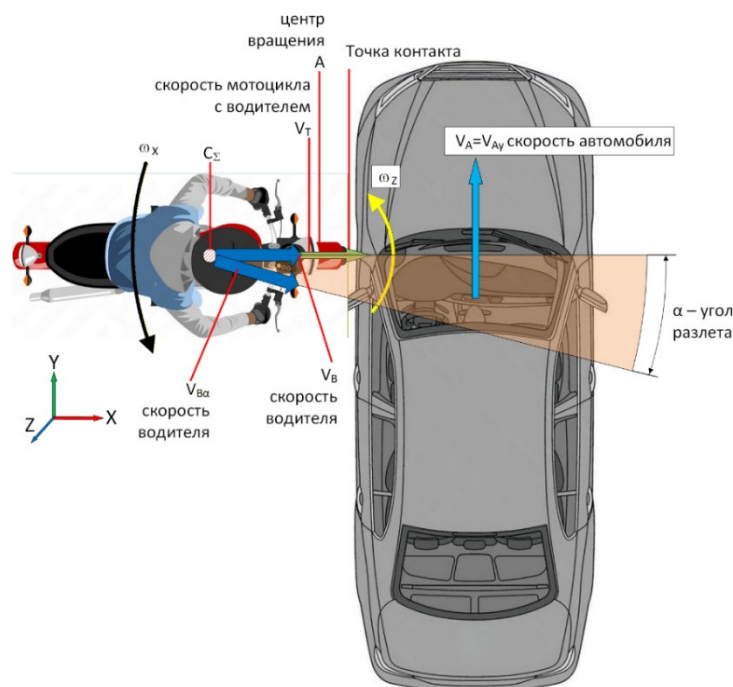


Рис. 1. Положение транспортных средств перед столкновением:
а) вид сзади на автомобиль; б) вид сверху (иллюстрации авторов)
Fig. 1. Positions of the vehicles before the collision:
a) rear view of the car; b) top view (illustration by the authors)

Изменение характера движения мотоцикла связано не только с его мгновенной остановкой, преобразованием поступательного движения во вращательное вокруг места контакта, но и с возникновением вращательного движения (со скоростью ω_y против хода часовой стрелки при виде сверху) в результате ударного воздействия со стороны автомобиля по оси Y в месте контакта.

Для описания инерционных свойств системы «мотоцикл + водитель» вычисляется тензор инерции I_A относительно полюса А, исходя из геометрии тел и антропометрических данных водителя.

Алгоритм численного решения динамической задачи

Процесс непосредственного соударения транспортных средств характеризуется переходом системы в состояние сложного пространственного

движения, определяемого резким изменением кинематических параметров в точке контакта. В рамках принятой в расчетной модели ось переднего колеса мотоцикла (точка А) рассматривается как подвижный шарнир, чье ускорение определяется взаимодействием с кузовом автомобиля. Движение системы «мотоцикл–водитель» не является свободным и полностью определяется динамическими нагрузками, возникающими вследствие ударного замедления вдоль продольной оси и бокового смещения под воздействием преграды. Для описания вращения системы вокруг полюса А используется уравнение моментов импульса относительно полюса А, которое с учетом инерционных свойств и тензора инерции мотоцикла I_A относительно точки контакта принимает вид:

$$I_A \frac{d\omega}{dt} + \omega \times (I_A \omega) = M_A^{ext} - m(\rho \times a_A), \quad (1)$$

где $\rho = [x_c, y_c, z_c]^T$ – радиус-вектор от точки А до центра масс в системе координат, связанной с мотоциклом; a_A – вектор ускорения точки (определяется взаимодействием с автомобилем); $\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ – вектор угловой скорости мотоцикла; I_A – тензор инерции мотоцикла относительно

$$\begin{cases} I_{Ax}\dot{\omega}_x + (I_{Az} - A_{Ay})\omega_y\omega_z = M_x - m(y_c a_{Az} - z_c a_{Ay}) & \text{крен}(X) \\ I_{Ay}\dot{\omega}_y + (I_{Ax} - A_{Az})\omega_x\omega_z = M_y - m(z_c a_{Ax} - x_c a_{Az}) & \text{тангаж}(Y) \\ I_{Az}\dot{\omega}_z + (I_{Ay} - A_{Ax})\omega_y\omega_x = M_z - m(x_c a_{Ay} - y_c a_{Ax}) & \text{рыскание}(Z) \end{cases} \quad (2)$$

В системе уравнений (2):

1. Тангаж (Y) (рис. 1) описывает поднятие задней части мотоцикла и определяет расстояние, на которое «улетит» тело водителя после отделения от мотоцикла в направлении движения мотоцикла. Определяющим является слагаемое $-mz_c a_{Ax}$, зависящее от ускорения торможения мотоцикла $a_{Ax} \ll 0$. M_{Gy} – момент силы тяжести, а слагаемое $mz_c a_{Ax}$ – описывает удар (a_{Ax}) и создает момент, подбрасывающий водителя вверх.

2. Рыскание (Z) (определяющим является $-mx_c a_{Ay}$) – смещение переднего колеса мотоцикла автомобилем ($a_{Ay} > 0$) и крен (X) – следствие бокового рывка со стороны автомобиля ($+mz_c a_{Ay}$) и гироскопического эффекта от первых двух вращений (мотоцикл начинает падать на бок еще до того, как достигнет верхней точки при тангаже (Y)) – определяют отклонение траектории полета водителя вправо от направления движения мотоцикла (см. угол α на рис. 1).

В уравнении (2), в части описывающей подъем задней части мотоцикла (тангаж) вверх (поворот вокруг Y), главную роль играет торможение переднего колеса ($a_{Ax} < 0$, которое по модулю велико). Ускорение замедления при торможении определяется по синусоидальной модели по формуле:

$$a_{Ax}(t) = -A_p \sin^2\left(\frac{\pi t}{\Delta t}\right), \text{ для } 0 \leq t < \Delta t, \quad (3)$$

где Δt – длительность удара ($\Delta t = 0.12$ с); $A_p = 2a_{cp}$ – пиковое ускорение; a_{cp} – среднее ускорение замедления, определяемое по формуле:

$$a_{cp} = \frac{v_{\Sigma}^2}{2S}, \quad (4)$$

точки А; M_A^{ext} – сумма моментов внешних сил относительно точки А (сила тяжести, реакции опоры заднего колеса, если колесо еще касается земли). Следует отметить, что слагаемое $-m(\rho \times a_A)$ является моментом сил инерции, которое описывает опрокидывание и разворот мотоцикла за счет резкой остановки (смещения) переднего колеса.

В (1) положение центра масс C_{Σ} связано с положением колеса А через матрицу поворота R:

$$r_c(t) = r_A(t) + R(t)\rho,$$

где $r_A(t)$ – траектория переднего колеса, определяемая движением автомобиля (вдоль его борта).

Поскольку траектория движения водителя после отрыва от мотоцикла определяется вращениями мотоцикла вокруг соответствующих осей координат, векторное представление уравнения движения (1) удобно преобразовать в систему из трех уравнений движения по каждой оси координат с использованием угловых ускорений $\varepsilon = \dot{\omega}$. Примем направление главных осей инерции совпадающими с осями симметрии мотоцикла. Полная система из трех дифференциальных уравнений, описывающая сложное пространственное движение мотоцикла совместно с водителем, с "прикрепленным" к автомобилю передним колесом в момент удара имеет вид:

где $V_{\Sigma} = V_m + V_{ax}$, сумма скоростей мотоцикла и автомобиля по оси X (для автомобиля $V_{ax} = 0$); S – глубина проникновения мотоцикла в корпус автомобиля с учетом деформации (принято значение $S = 0.5$ м).

Уравнение поворота вокруг оси Z (рыскание в (2)) описывает вращение мотоцикла в результате смещения точки А по оси Y. Главную роль играет величина перемещение переднего колеса мотоцикла автомобилем ($a_{Ay} > 0$). Слагаемое $mx_c a_{Ay}$ – определяется ускорением точки контакта А вместе с автомобилем и создает инерционный момент, который закручивает корпус мотоцикла (против часовой стрелки при виде сверху).

Третье уравнение в (2) описывает вращение мотоцикла вокруг оси X (крен), являющееся следствием того, то автомобиль воздействует на мотоцикл ниже центра тяжести «мотоцикл+водитель». Слагаемое $(I_{Az} - I_{Ay})\omega_y\omega_z$ определяет гироскопический момент, который показывает, что если мотоцикл одновременно поднимает заднюю часть (ω_y) и поворачивается вслед за машиной (ω_z), то возникает сила, поворачивающая его вокруг продольной оси. В уравнении, описывающем крен: M_x^{ext} – момент внешних сил, возникающий от силы тяжести после наклона мотоцикла ($mg\Delta y$) и момент реакции опоры заднего колеса, пока оно касается асфальта; $+mz_c a_{Ay}$ – инерционный момент, создаваемый центром массы мотоцикла от воздействия со стороны автомобиля.

Определение момента времени t_s , когда водитель отделяется от мотоцикла, является задачей на нарушение связей. В механической модели водитель и мотоцикл рассматриваются как единое твердое тело

только до тех пор, пока силы, удерживающие водителя на мотоцикле, способны компенсировать инерционные силы, стремящиеся его «сорвать» с сиденья.

Момент разделения определяется выполнением одного из двух критериев: силового (преодоление трения/хвата) или геометрического (невозможность дальнейшего контакта). Геометрический критерий в настоящей работе не рассматривался, так как связан с соскальзыванием водителя с сиденья мотоцикла при скоростях до 10 км/ч и угле наклона мотоцикла (при поднятой задней части) более 45°.

Используя систему дифференциальных уравнений (2), полученную ранее, на каждом шаге интегрирования (по времени t) вычислялось полное ускорение точки, в которой находится центр масс водителя. Ускорение точки центра масс водителя a_s складывается из ускорения точки контакта А (переднего колеса) и вращательных ускорений мотоцикла:

$$a_s = a_A + \varepsilon \times r_s + \omega \times (\omega \times r_s),$$

где a_A – ускорение переднего колеса (определяется ударом об автомобиль); $\varepsilon = \dot{\omega}$ – угловое ускорение мотоцикла; ω – угловая скорость мотоцикла; r_s – вектор от переднего колеса (А) до центра масс водителя.

При силовом критерии (срыв с сиденья) водитель удерживается силой трения о сиденье (F_{mp}) и силой хвата за руль ($F_{xв}$). Момент t_s наступает тогда, когда сила инерции водителя превышает сумму удерживающих сил:

$$m_g |a_s| > \mu N + F_{xв}^{max},$$

где $m_g |a_s|$ – сила инерции, пытающаяся сбросить водителя с сиденья мотоцикла; N – нормальная реакция опоры (сиденья). Если мотоцикл резко «клюет» носом, N может уменьшаться. Если $N \leq 0$, водитель теряет контакт с седлом мгновенно; μ – коэффициент трения между одеждой и седлом ($\approx 0.3-0.6$); $F_{xв}^{max}$ – предельная сила, которую могут выдержать кисти рук (обычно в пределах от 200 до 400 Н). Для неожиданного удара она невелика (руки просто разжимаются или соскальзывают).

При проведении расчетов при различных скоростях мотоцикла больше 15 км/ч, при столкновении с жестким препятствием (автомобиль) ускорение замедления мотоцикла достигает 3g–20g. Никакое трение или сила рук не могут удержать тело водителя (требуемая сила $\approx 1600-4000$ Н), поэтому в данной работе принято, что разделение происходит через малый промежуток времени после начала фазы подъема задней части мотоцикла (через 0.05–0.1 сек после столкновения).

Соотношение скорости мотоцикла с водителем (до удара) и начальной скорости свободного полета водителя мотоцикла (после разделения) определяется кинематикой сложного движения. В момент удара происходит трансформация поступательного движения всей системы во вращательное движение мотоцикла, которое работает как «катапульта» для водителя.

Скорость водителя в момент отрыва ($V_{вотд}$) вычисляется как векторная сумма скорости точки вращения (оси колеса) и линейной скорости вращения водителя вокруг этой точки:

$$V_{вотд} = V_A + [\omega \times r], \quad (5)$$

где V_A – остаточная скорость передней оси мотоцикла (точка А, в момент разделения она близка

к 0 по оси X, но имеет составляющую скорости автомобиля по оси Y); ω – вектор угловой скорости мотоцикла (возникший от удара); r – радиус-вектор от оси переднего колеса (точка А) до центра масс водителя (длина рычага).

До удара водитель имел скорость V_0 , равную скорости мотоцикла. В момент удара ось колеса резко останавливается. Верхняя часть мотоцикла (сиденье) и водитель по инерции продолжают движение вперед. Вращение мотоцикла (задняя часть поднимается, происходит вращение вокруг оси Y, ω_y) создает тангенциальную скорость, направленную вперед и вверх.

Проведенные расчеты показали, что горизонтальная скорость водителя всегда получается чуть меньше или равна начальной скорости мотоцикла ($V_{x,вотд} < V_0$). Потери связаны с трением о сиденье и деформацией мотоцикла и автомобиля в первые миллисекунды удара.

Вертикальная скорость (вдоль оси Z) («эффект катапульти») до столкновения равна нулю. После удара возникает вертикальная составляющая из-за вращения мотоцикла вокруг остановившегося переднего колеса $V_{z,вотд} \approx \omega_y \cdot r$. Эта скорость возникает за счет кинетической энергии мотоцикла. Именно она определяет время полета и, как следствие, дальность полета. Чем выше центр тяжести водителя, тем сильнее его подбрасывает.

Отдельно следует отметить влияние скорости автомобиля (боковой для мотоцикла скорости вдоль оси Y) на траекторию полета водителя. В рассматриваемом положении автомобиля, мотоцикл начинает вращаться вокруг вертикальной оси Z (ω_z). Водитель, находясь сзади от переднего колеса, получает боковой импульс в противоположную сторону (или в зависимости от скорости автомобиля продолжает движение прямо, в то время как мотоцикл уходит влево, что равносильно смещению водителя вправо относительно мотоцикла). При достаточной скорости автомобиля вектор скорости водителя отклоняется от прямолинейной траектории вправо относительно продольной оси мотоцикла (см. рис. 1).

Решая систему дифференциальных уравнений (2) при различных начальных скоростях автомобиля установлено, что максимальное отклонение траектории движения водителя (после отрыва от мотоцикла) вправо от направления движения мотоцикла может составлять до $\alpha = 15^\circ$ (см. рис. 1) при скорости автомобиля $V_a = V_{ay} = 5,97$ м/с (21,5 км/ч). При уменьшении скорости автомобиля при выполнении поворота, значение угла отклонения α нелинейно уменьшается и становится меньше 3° при скорости автомобиля $V_a = V_{ay} < 2,5$ м/с (9 км/ч) (скорость направлена поперек движения мотоцикла). Эффект уменьшения отклонения траектории движения водителя после отрыва от мотоцикла от прямолинейного связан с уменьшением влияния слагаемых $-m x_c a_{Ay}$ в (2) на вращение мотоцикла вокруг оси Z и уменьшение крена мотоцикла (вращение вокруг оси X) за счет уменьшения слагаемого $+m z_c a_{Ay}$. При сохранении ускорения торможения мотоцикла вдоль оси X задняя часть мотоцикла

успевают подняться и выбросить водителя с сиденья раньше, чем крен и рысканье успевают отклонить его траекторию от близкой к прямолинейной.

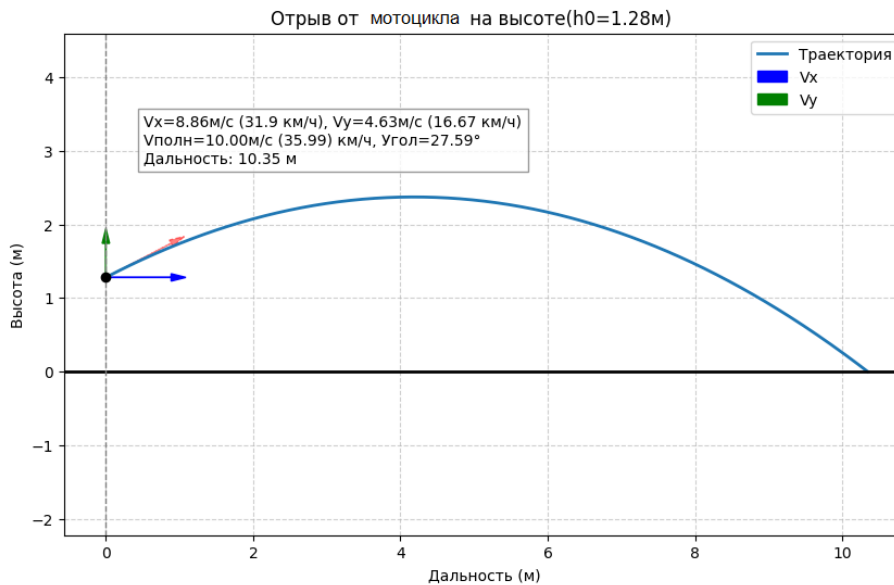
Результаты

Для демонстрации возможностей предложенной методики было проведено численное моделирование с теоретически заданными начальными условиями. В качестве исходных параметров были приняты скорости и расстояния, выбранные авторами для иллюстрации работы модели. Принятая в модели автомобиля $V_a = 2,514$ м/с (9,05 км/ч) создавала минимальное поперечное воздействие, что обеспечило отклонение вектора скорости водителя от первоначального курса не более чем на 3° . Это позволило в рамках теоретической модели рассматривать полет водителя как практически

прямолинейный в проекции на плоскость дороги. В ходе численного моделирования были рассмотрены два иллюстративных сценария.

Сценарий свободного полета на заданную дистанцию: для иллюстрации методики была выбрана дальность падения 10,35 м (рис. 3а). Моделирование показало, что для достижения этой дальности при заданных параметрах системы начальная скорость мотоцикла должна составлять 31,9 км/ч (8,86 м/с). В момент отрыва, согласно модели, центр масс водителя находится на высоте $h_o = 1,28$ м, а вектор скорости направлен под углом $27,59^\circ$ к горизонту. С следующим сценарии дальность чистого полета была принята равной 8,91 м (рис. 2б). В этом случае расчетная исходная скорость мотоцикла составила 29,2 км/ч (8,11 м/с).

а



б

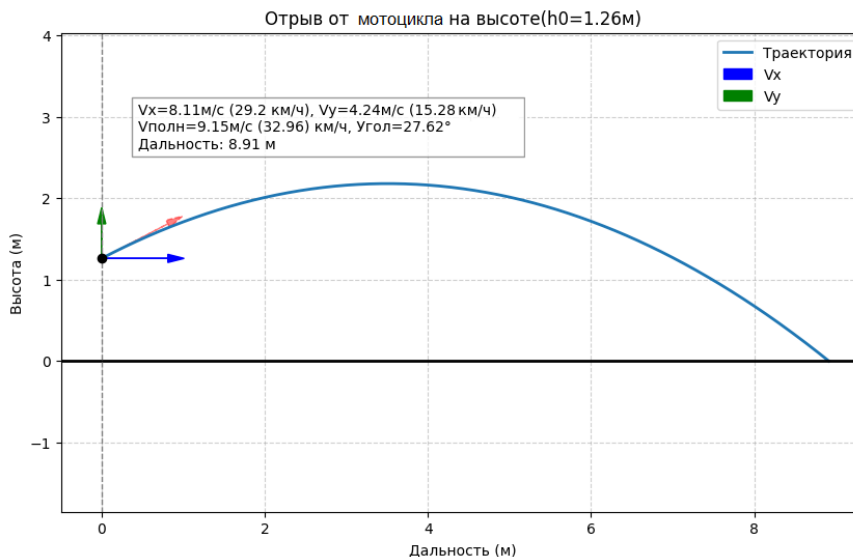


Рис. 2. Траектории движения центра масс водителя после отрыва от мотоцикла:

- а) при скорости столкновения $V_m = V_{вод,x} = 8,86$ м/с (31,9 км/ч);
- б) при скорости столкновения $V_m = V_{вод,x} = 8,11$ м/с (29,2 км/ч) (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Trajectories of the driver's center of mass after separation from the motorcycle:

- a) at a collision speed of 8.86 m/s (31.9 km/h); b) at a collision speed of 8.11 m/s (29.2 km/h) (illustration by the authors)

В ходе проведения серии расчетов было показано, что траектория полета водителя в модели определяется сложным взаимодействием трех видов угловых скоростей: тангажа, рыскания и крена. Основной вклад в дальность полета вносит инерционный момент тангажа, возникающий при резком замедлении передней оси, что сообщает телу вертикальный импульс и трансформирует его в «метаемый объект». Математическая модель показала, что при скоростях мотоцикла свыше 15 км/ч силы трения и мышечного удержания становятся недостаточными для сохранения единства системы, что приводит к разделению тел через 0,05–0,1 секунды после контакта. Расчеты подтверждают, что начальная скорость свободного полета превышает горизонтальную составляющую скорости в момент удара за счет тангенциального ускорения при вращении вокруг оси переднего колеса. Для рассматриваемого теоретического сценария было продемонстрировано, что заданная дистанция падения в 10,35 м соответствует расчетной скорости мотоцикла в момент столкновения 31,9 км/ч.

Результаты моделирования характеризуют ход развития динамического взаимодействия в рамках заданных начальных условий и демонстрируют

возможности методики по установлению связи между скоростными режимами и параметрами полета антропометрического объекта.

Обсуждение

Полученные результаты подчеркивают важность учета пространственной ориентации векторов скоростей в момент удара, особенно в случаях, когда препятствие обладает значительной массой. Проведенное моделирование показывает, что теоретически предсказанное отклонение траектории полета в 3° полностью коррелирует с влиянием заданной поперечной скорости автомобиля [16]. Необходимо отметить, что принятый коэффициент трения покоя ($\mu = 0,7$) и синусоидальная модель замедления являются идеализированными параметрами модели [14, 17], что следует учитывать при интерпретации результатов. Тем не менее предложенный математический аппарат предоставляет объективную физическую картину динамического взаимодействия для заданных начальных условий. Дальнейшее развитие методики может быть связано с анализом чувствительности модели к вариациям входных параметров, таких как коэффициент рассеивания энергии при деформации.

Список литературы

1. Жданов В. Л. Организация транспортных услуг и безопасность транспортного процесса : учебное пособие / В. Л. Жданов, Е. А. Григорьева. – Кемерово : Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 2016. – 310 с. // Лань : электронно-библиотечная система. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/172512> (дата обращения: 12.01.2026), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
2. Арсланов М. А. Организация транспортных услуг и безопасность транспортного процесса : учебное пособие / М. А. Арсланов. – Махачкала : Дагестанский государственный аграрный университет имени М. М. Джамбулатова, 2020. – 392 с. // Лань : электронно-библиотечная система. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/159410> (дата обращения: 12.01.2026), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
3. Коновалова Т. В. Организация перевозочных услуг и безопасность транспортного процесса : учебное пособие / Т. В. Коновалова, С. Л. Надириян, И. Н. Котенкова. – Краснодар : Кубанский государственный технологический университет, 2024. – 256 с. – ISBN 978-5-8333-1355-8 // Лань : электронно-библиотечная система. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/478313> (дата обращения: 12.01.2026), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
4. Кобаев Е. В. Организация перевозочных услуг и безопасность транспортного процесса : учебное пособие / Е. В. Кобаев. – Тверь : Тверская государственная сельскохозяйственная академия, 2019. – 171 с. // Лань : электронно-библиотечная система. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/172703> (дата обращения: 12.01.2026), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
5. Балакин В. Д. Экспертиза дорожно-транспортных происшествий : учебное пособие / В. Д. Балакин. – 3-е изд, испр. и доп. – Омск : Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, 2020. – 123 с. – ISBN 978-5-00129-052-0.
6. Евтюков С. А. Реконструкция дорожно-транспортных происшествий : учебное пособие / С. А. Евтюков, Я. В. Васильев. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. – 204 с. – ISBN 978-5-9227-0849-4.
7. Иларионов В. А. Экспертиза дорожно-транспортных происшествий : учебник / В. А. Иларионов. – Москва : Транспорт, 1989. – 255 с.
8. Комаров Ю. Я. Экспертиза дорожно-транспортных происшествий в примерах и задачах : учебное пособие / Ю. Я. Комаров, С. В. Ганзин, Р. А. Жирков. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2012. – 320 с. – ISBN 978-5-9912-0247-3.
9. Володькин П. П. Экспертное исследование столкновения тяжелых транспортных средств на высоких скоростях / П. П. Володькин, А. С. Рыжова, С. А. Францев // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2017. – № 7. – С. 85–89.
10. Бакакури В. И. Использование специальных знаний при расследовании ДТП / В. И. Бакакури // Эпомен. – 2020. – № 48. – С. 67–73.
11. Суворов Ю. Б. Судебная дорожно-транспортная экспертиза : судебно-экспертная оценка действий водителей и иных участников дорожного движения / Ю. Б. Суворов. – Москва : Экзамен, 2013. – 207 с.
12. Obenski K. S. Motorcycle Accident Reconstruction / K. S. Obenski, P. F. Hill, N. J. Gogan. – Tucson : Lawyers & Judges Publishing Company, 2018. – 800 p. – ISBN 978-1-933264-67-8.
13. Fries T. R. Motorcycle Accident Reconstruction / T. R. Fries, et al. // SAE Technical Paper 890737. – 1989. – DOI: 10.4271/890737.
14. Rose N. A. Analysis of Motorcycle and Rider Linear Deceleration Rates / N. A. Rose, J. Searles // SAE Technical Paper 2002-01-0545. – 2002. – DOI: 10.4271/2002-01-0545.
15. Wood D. P. Impact and Movement of Pedestrians in Frontal Collisions with Vehicles / D. P. Wood // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. – 1988. – Vol. 202, iss. 2. – P. 101–110.
16. Moser A. Validation of the PC-Crash Simulation Model / A. Moser, H. Steffan // SAE Technical Paper 960885. – 1996. – DOI: 10.4271/960885.

17. Lambourn R. F. The Calculation of Motorcycle Speeds from Sliding Distances / R. F. Lambourn // SAE Technical Paper 910125. – 1991. – DOI: 10.4271/910125.
18. Hugemann W. Accident Reconstruction / W. Hugemann. – Berlin : Springer, 2021. – Vol. 1–2. – ISBN 978-3-662-63231-5.
19. Синельщиков А. В. Решение задачи Галилея с учетом сил сопротивления в среде Maple / А. В. Синельщиков, Е. В. Пономарева, Е. Д. Пономарева // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2024. – № 3 (49). – С. 92–112.
20. Хохлова О. А. Модификация численного метода для решения задач кинематического и динамического анализа механизмов / О. А. Хохлова, А. В. Синельщиков, Е. В. Пономарева // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2022. – № 2 (40). – С. 36–41.

References

1. Zhdanov V. L., Grigoreva Ye. A. *Organizatsiya transportnikh uslug i bezopasnost transportnogo protsessa* [Organization of transport services and safety of the transport process]. Kemerovo: Kuzbasskii gosudarstvennii tekhnicheskii universitet imeni T. F. Gorbacheva; 2016, 310 p. Available at: <https://e.lanbook.com/book/172512> (accessed 12.01.2026).
2. Arslanov M. A. *Organizatsiya transportnikh uslug i bezopasnost transportnogo protsessa* [Organization of transport services and safety of the transport process]. Makhachkala: Dagestanskii gosudarstvennii agrarnii universitet imeni M. M. Dzhambulatova; 2020, 392 p. Available at: <https://e.lanbook.com/book/159410> (accessed 12.01.2026).
3. Konovalova T. V., Nadiryana S. L., Kotenkova I. N. *Organizatsiya perevozochnik uslug i bezopasnost transportnogo protsessa* [Organization of transport services and safety of the transport process]. Krasnodar: Kubanskii gosudarstvennii tekhnicheskii universitet; 2024, 256 p. Available at: <https://e.lanbook.com/book/478313> (accessed 12.01.2026).
4. Kopaev Ye. V. *Organizatsiya perevozochnik uslug i bezopasnost transportnogo protsessa* [Organization of transport services and safety of the transport process]. Tver: Tverskaya gosudarstvennaya selskokhozyaystvennaya akademiya; 2019, 171 p. Available at: <https://e.lanbook.com/book/172703> (accessed 12.01.2026).
5. Balakin V. D. *Ekspertiza dorozhno-transportnikh proisshestvii* [Expertise of road traffic accidents]. Omsk: Sibirskii gosudarstvennii avtomobilno-dorozhnyi universitet; 2020, 123 p.
6. Evtyukov S. A., Vasilyev Ya. V. *Rekonstruktsiya dorozhno-transportnikh proisshestvii* [Reconstruction of road traffic accidents]. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennii arkhitekturno-stroitel'nyi universitet; 2018, 204 p.
7. Ilarionov V. A. *Ekspertiza dorozhno-transportnikh proisshestvii* [Expertise of road traffic accidents]. Moscow: Transport; 1989, 255 p.
8. Komarov Yu. Ya., Ganzin S. V., Zhirkov R. A. *Ekspertiza dorozhno-transportnikh proisshestvii v primerakh i zadachakh* [Expertise of road traffic accidents in examples and problems]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom; 2012, 320 p.
9. Volodkin P. P., Rizhova A. S., Frantsev S. A. Ekspertnoe issledovanie stolknoveniya tyazhelikh transportnikh sredstv na vysokikh skorostyakh [Expert study of collision of heavy vehicles at high speeds]. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii* [Intellect. Innovation. Investments]. 2017, no. 7, pp. 85–89.
10. Bakakuri V. I. Ispolzovanie spetsialnykh znaniy pri rassledovanii DTP [The use of special knowledge in the investigation of traffic accidents]. *Epomen* [Epomen]. 2020, no. 48, pp. 67–73.
11. Suvorov Yu. B. *Sudebnaya dorozhno-transportnaya ekspertiza: sudebno-ekspertnaya otsenka deistvii voditelei i inikh uchastnikov dorozhnogo dvizheniya* [Forensic road transport expertise: forensic expert assessment of the actions of drivers and other road users]. Moscow: Ekzament; 2013, 207 p.
12. Obenski K. S., Hill P. F., Gogan N. J. *Motorcycle Accident Reconstruction*. Tucson: Lawyers & Judges Publishing Company; 2018, 800 p.
13. Fries T. R., et al. Motorcycle Accident Reconstruction. *SAE Technical Paper 890737*. 1989. DOI: 10.4271/890737.
14. Rose N. A., Searles J. Analysis of Motorcycle and Rider Linear Deceleration Rates. *SAE Technical Paper 2002-01-0545*. 2002. DOI: 10.4271/2002-01-0545.
15. Wood D. P. Impact and Movement of Pedestrians in Frontal Collisions with Vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 1988, vol. 202, iss. 2, pp. 101–110.
16. Moser A., Steffan H. Validation of the PC-Crash Simulation Model. *SAE Technical Paper 960885*. 1996. DOI: 10.4271/960885.
17. Lambourn R. F. The Calculation of Motorcycle Speeds from Sliding Distances. *SAE Technical Paper 910125*. 1991. DOI: 10.4271/910125.
18. Hugemann W. *Accident Reconstruction*. Berlin: Springer; 2021, vol. 1–2.
19. Sinelshchikov A. V., Ponomareva Ye. V., Ponomareva Ye. D. Reshenie zadachi Galileya s uchetom sil soprotivleniya v srede Maple [Solving Galileo's problem taking into account resistance forces in the Maple environment]. *Inzhenerno-stroitel'nyi vestnik Prikaspiya* [Caspian Engineering and Construction Bulletin]. 2024, no. 3 (49), pp. 92–112.
20. Khokhlova O. A., Sinelshchikov A. V., Ponomareva Ye. V. Modifikatsiya chislennoy metody dlya resheniya zadach kinematicheskogo i dinamicheskogo analiza mekhanizmov [Modification of a numerical method for solving problems of kinematic and dynamic analysis of mechanisms]. *Inzhenerno-stroitel'nyi vestnik Prikaspiya* [Caspian Engineering and Construction Bulletin]. 2022, no. 2 (40), pp. 36–41.

© А. В. Синельщиков, Е. В. Пономарева, Е. Д. Пономарева

Ссылка для цитирования:

Синельщиков А. В., Пономарева Е. В., Пономарева Е. Д. Разработка методики численного моделирования для анализа скоростных параметров транспортного средства по дальности свободного полета антропометрического объекта // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 1 (55). С. 134–141.