УДК 539.4

© С. А. Евтюков, д-р техн. наук, профессор
© И. С. Брылев, канд. техн. наук
© М. М. Блиндер, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: s.a.evt@mail.ru, ilya2104@mail.ru,
maria.blinder@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-2-208-214

© S. A. Evtyukov, Dr. Sci. Tech., Professor
© I. S. Brylev, PhD in Sci. Tech.
© M. M. Blinder, post-graduate student
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: s.a.evt@mail.ru, ilya2104@mail.ru,
maria.blinder@mail.ru

РЕКОНСТРУКЦИЯ АВАРИИ И ОЦЕНКА ТРАВМ ВЕЛОСИПЕДИСТА, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ АВТОМОБИЛЯ С ВЕЛОСИПЕДОМ

ACCIDENT RECONSTRUCTION AND ASSESSMENT OF THE CYCLIST'S INJURIES SUSTAINED IN A CAR-BICYCLE COLLISION

Цель данного исследования — изучить кинематику движения двухколесного транспортного средства (ДТС) и факторы, оказывающие влияние на травмы, полученные велосипедистом при столкновении с автомобилем путем моделирования с использованием программного обеспечения MADYMO (MAtithmetic DYnamic MOdels). Проведен анализ влияния скорости транспортного средства на степень травмы в момент столкновения. Определено, что увеличение скорости автомобиля оказывает непосредственное влияние на увеличение расстояния отбрасывания велосипедиста. Дана количественная оценка факторам, влияющим на степень травматизма в дорожно-транспортных происшествиях. В зависимости от скорости автомобиля, времени столкновения были построены графики и получены уравнения регрессии.

Ключевые слова: дорожно-транспортное происшествие, двухколесное транспортное средство, степень травмы, скорость, время столкновения, моделирование.

The aim of this study was to study the movement kinematics of a two-wheeled vehicle (TWV) and the factors influencing the severity degree of injuries sustained by a cyclist in a collision with a car by modeling using the MADYMO software (MAtithmetic DYnamic MOdels). The analysis of the influence of the vehicle speed on the severity degree of injury at a certain moment of collision is carried out. It has been determined that an increase in vehicle speed has a direct effect on an increase in the cyclist's kickback distance. A quantitative assessment of the factors influencing the severity degree of injuries in road traffic accidents is given. Graphs were built and regression equations were obtained depending on the speed of the car and the time of the collision.

Keywords: road traffic accident; two-wheeled vehicle; severity degree of injury; speed; collision time; modeling.

Двухколесные транспортные средства (ДТС), в частности велосипеды, являются активными участниками дорожного движения, а также многих дорожно-транспортных происшествий. Самый большой риск получения серьезных травм велосипедисты получают при столкновении с автомобилем [1, 2]. Разница в массе автомобиля и ДТС огромна, а энергия столкновения в основном поглощается более легким транспортным средством. В настоящее время существует крайне мало опубликованных источников, в которых бы присутствовали сведения о столкновениях

ДТС с автомобилем и их последствий, а также по уменьшению травматизма таких столкновений [9]. Результаты данного исследования могут стать шагом на пути к снижению числа пострадавших велосипедистов и смертности в результате дорожно-транспортных происшествий ДТС с автомобилем.

Согласно статистике официального сайта Госавтоинспекции¹ за период 2017–2020 гг. прослеживается динамика ДТП с участием велосипе-

¹ Официальный сайт МВД РФ 2020 ГИБДД России. URL: <http://stat.gibdd.ru>

дистов (рис. 1, 2). Установление истинных причин нарушения правил дорожного движения, приведших к аварии, и способствующих им обстоятельств — одна из важных задач обеспечения безопасности движения и эксплуатации велосипедов (рис. 3, 4) [7, 8]. Тяжесть полученных травм при ДТП зависит от скорости, при которой происходит столкновение — чем больше скорость, тем больше количество выделяемой энергии. Часть выделяемой энергии поглощается телом человека, однако оно способно перенести только ограниченное количество внешних сил. В данном исследовании модель столкновения велосипед–автомобиль была разработана с использованием программного обеспечения MADYMO (MATHematic DYnamic MOdels) [4–6].

Для конкретного случая столкновения автомобиля с велосипедом был проанализирован ряд параметров, таких как ускорение таза, растяжения шеи, сдвиг шейных позвонков, степень травмы головы, силы, действующие на левую и правую большеберцовую кость [3]. Путем моделирования было установлено, что лобовое стекло — наиболее частое место удара велосипедиста головой и туловищем.

Для проведения вычислительного исследования был выбран тип аварии, при которой авто-

мобиль сталкивается с боковой частью ДТС. Такие аварии — одни из самых распространенных, особенно при пересечении велосипедистом улицы [12, 13]. Начальной точкой расчета расстояния отбрасывания велосипедиста был первый контакт с автомобилем, конечной — вторичный контакт велосипедиста с поверхностью транспортного средства. В проведенном исследовании велосипедист двигался со средней скоростью 5–15 км/ч, а средняя скорость автомобиля составляла 10–70 км/ч. Было определено, что увеличение скорости автомобиля оказывает непосредственное влияние на увеличение расстояния отбрасывания велосипедиста. Для проведения исследования был проведен имитационный тест с манекеном. Данные, введенные в программное обеспечение (положение велосипедиста, тип велосипеда, геометрические характеристики автомобиля и скорость столкновения), непосредственно связаны с данными, полученными в результате эксперимента (кинематика велосипедиста после столкновения и травмы, полученные в результате столкновения) [11]. С помощью программного обеспечения MADYMO были разработаны несколько моделей автомобилей: 1) автомобиль с коротким капотом и более крутым углом наклона ветрового стекла; 2) автомобиль

Рис. 1. Динамика ДТП с участием велосипедистов, погибших и пострадавших в 2020 гг. в РФ (чел.)

Рис. 2. Динамика ДТП с участием велосипедистов, погибших и пострадавших в 2017–2020 гг. в РФ (чел.)

с коротким капотом и большим углом наклона ветрового стекла; 3) автомобиль с длинным капотом и большим углом наклона ветрового стекла; 4) автомобиль с длинным капотом и более крутым углом наклона ветрового стекла.

Для исследований выбрали модель MADYMO — программный комплекс для анализа систем безопасности пассажиров в автомобильной и транспортной отраслях [10]. Были использованы структурные элементы для моделирования кузова автомобиля, велосипеда и тела велосипедиста. Тело велосипедиста было смоделировано из множества частей: наружные поверхности состояли из 74 эллипсоидов. Модель человека имеет антропометрические данные: средний вес 76,5 кг, рост 1,76 м. Кинематика реальной модели, значения ускорения и оценка травм всего тела были получены с помощью компьютерных ресурсов.

Независимо от типа столкновения степень травмы головы (СТГ) — ключевой фактор, определяющий полученные травмы человеком. Значение СТГ показывает степень повреждения головы человека. Значение СТГ было рассчитано по формуле

$$\text{СТГ} = \left\{ \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2,5} (t_2 - t_1) \right\} \max, \quad (1)$$

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}, \quad (2)$$

где a — результирующее ускорение центра тяжести головы в единицах ускорения силы тяжести ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$); t_1 — время в начальный момент столкновения, м/с²; t_2 — время в конечный момент столкновения ($t_2 - t_1 \leq 15 \text{ мс}$).

Утверждается, что раненый имеет высокий шанс на выживание, если СТГ ≤ 900 . Степень травмы головы считается одним из ключевых критериев оценки безопасности транспортных средств. Для более детального изучения серьезности травм, полученных при лобовом столкновении, представлено сопоставление сокращенной шкалы травм (СШТ) и СТГ (рис. 3).

Степень повреждения шеи при ударе сзади была определена с использованием сил растяжения и смещения шеи, выраженных в кН, а длительность этих сил в мс. Для этих критериев были установлены предельно допустимые силы: сила растяжения — 3,6 кН, сила смещения — 3,0 кН. Сила первичных столкновений с бампером или краем капота определяет уровень тяжести травмы ноги. Переломы часто вызваны сочетанием нагрузок. Согласно данным, полученным в экспериментах, максимально допустимая осевая нагрузка на длинные кости составляет 11 кН. Сила, действующая на большеберцовые кости, может

Рис. 3. Сопоставление значений СШТ и СТГ

выдержать максимум 9 кН. Предлагаемый предел к травмам таза был равен 110 g.

При выезде велосипедиста с второстепенной дороги (например, из двора) предполагается, что центральная ось велосипеда совпадает с геометрическим центром автомобиля. Этот тип ситуации возникает, когда автомобиль едет прямо, а велосипедист движется перпендикулярно по отношению к траектории движения автомобиля.

Общая длительность разработанного исследования составляет 0,3 с. Первый контакт между автомобилем и ногой велосипедиста ниже правого колена регистрируется через 120 мс после начала. Приблизительно через 20 мс зарегистрирован второй удар: высота капота была такой, что удар по велосипедисту был сосредоточен в области таза. Еще через 120 мс голова велосипедиста попадает в верхнюю часть лобового стекла. Этот вид воздействия считается наиболее опасным для жизни велосипедиста. Построенные диаграммы (рис. 4) демонстрируют факторы, определяющие травмы, полученные велосипедистом при скорости автомобиля 40, 50 и 60 км/ч при выезде велосипедиста на дорогу: *a* — в момент перед столкновением; *b* — момент первого столкновения; *c* — момент второго столкновения.

Степень травмы головы рассчитывалась с использованием соответствующих временных интервалов, измеряемых в миллисекундах.

Полученные уравнения регрессии описывают полиномиальные кривые (средние значения), с помощью которых можно получить единичное значение степени травмы головы для определенной скорости движения автомобиля в конкретный момент времени.

Практическая значимость уравнений регрессии заключается в возможности их использования в целях определения степени травмы головы для определенной скорости движения автомобиля в конкретный момент времени.

Таким образом, в результате проведенных исследований можно сделать выводы о том, что скорость движения автомобиля в момент столкновения имеет непосредственное влияние на степень тяжести травмы, полученной в результате ДТП. Для скорости удара до 40 км/ч СТГ составляла 800 (критерий без единиц измерения) (умеренная травма). Это значение СТГ дает высокие шансы на выживание для велосипедиста без шлема. Скорость автомобиля 50 км/ч приводит к повышению СТГ до 909, а скорость 60 км/ч повышает СТГ до 1680. Если велосипедист сбит автомобилем со скоростью 60 км/ч, его шансы на выживание минимальны.

Библиографический список

1. Beck R. F. Mountain Bicycle Acceleration and Braking Factors, Casteel, Beck & Associates, Inc. San Diego, California, 2004. 9 p.

Рис. 4. Факторы, определяющие травмы, полученные велосипедистом при скорости автомобиля 40 км/ч (серая линия), 50 км/ч (оранжевая линия) и 60 км/ч (синяя линия)

**Уравнения регрессий значений СГТ
при определенной скорости движения
автомобиля в конкретный момент времени**

№ п/п	Скорость автомоби- ля, км/ч	№ рис.	Уравнения регрессии, $y = f(x)$
1	60	1	$y = -0,0215x^2 + 6,9828x - 12,032$
2	50	1	$y = -0,012x^2 + 4,3431x - 16,093$
3	40	1	$y = -0,012x^2 + 4,3431x - 16,093$
4	60	2	$y = -0,0075x^2 + 3,445x - 74,316$
5	50	2	$y = -0,015x^2 + 7,6242x - 648,7$
6	40	2	$y = -0,0174x^2 + 9,3294x - 910,45$
7	60	3	$y = -0,0095x^2 + 3,0058x + 32,221$
8	50	3	$y = -0,0084x^2 + 2,8046x - 4,2516$
9	40	3	$y = -0,0074x^2 + 2,4935x - 15,568$
10	60	4	$y = -0,1726x^2 + 50,564x + 5943,6$
11	50	4	$y = -0,1099x^2 + 33,273x + 5747,9$
12	40	4	$y = 0,0816x^2 + 24,33x + 5556,7$

Примечание. x — полная масса испытуемого, кг; y — установившееся замедление, m/c^2 .

2. Rutman J. How to do a Roll-down Test. Hyperlink. 2007. 22 p.

3. Grant J. Bicycle wheel components. URL: <http://www.livestrong.com/article/82697-bicycle-wheelcomponents/>, 2010.

4. Пучкин В. А. Основы экспертного анализа дорожно-транспортных происшествий: Базы данных. Экспертная техника. Методы решений. Ростов-на-Дону: ИПО ЮФУ, 2010. С. 192–193.

5. Schwalbe S. Rolling resistance. URL: http://www.schwalbetyres.com/tech_info/rolling_resistance, 2011. Pp. 3–6.

6. Евтюков С. А., Васильев Я. В. Экспертиза ДТП: методы и технологии. СПб.: СПбГАСУ, 2012. 310 с.

7. Евтюков С. А., Брылев И. С. Обзор существующих методик расчета скорости двухколесных транспортных средств // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 51–56.

8. Брылев И. С. Реконструкция ДТП по параметрам процесса торможения двухколесных механических транспортных средств. 2015. С. 68–91.

9. Евтюков С. С., Гинзбург Г. Problem of accident reconstruction mechanism using parameters of braking process of two-wheeled motor vehicles Architecture and Engineering. 2016. URL: <http://aej.spbgasu.ru/index.php/AE/article/view/>

10. Laurencas R., Liudas B., Robertas K. Accident Reconstruction and Assessment of Cyclist's Injuries Sustained in Car-to-Bicycle Collision 2017. Pp. 1-2.

11. Евтюков С. А., Евтюков С. С. Проблемы расчета скорости движения двухколесных механических транспортных средств при ДТП // Transportation research procedia 36. 2018. С. 84–89.

12. Брылев И. С., Евтюков С. С., Ворожейкин И. В. Оценка времени реакции водителя двухколесного механического транспортного средства при торможении // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 6 (83). С. 277–283.

13. Евтюков С. А., Брылев И. С., Блиндер М. М. Факторы, влияющие на формирование установившегося замедления двухколесных транспортных средств // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 6 (83). С. 186–195.

References

1. Beck R. F. *Mountain Bicycle Acceleration and Braking Factors*, Casteel, Beck & Associates, Inc. San Diego, California, 2004, 9 p.

2. Rutman J. How to do a Roll-down Test. Hyperlink, 2007, 22 p.

3. Grant J. Bicycle wheel components. Available at: <http://www.livestrong.com/article/82697-bicycle-wheelcomponents/>, 2010.

4. Puchkin V. A. *Osnovy ekspertnogo analiza dorozhno-transportnykh proissheshtviy: Bazy dannykh. Ekspertnaya tekhnika. Metody resheniy* [Fundamentals of expert analysis of road accidents: Databases. Expert technique. Solution methods]. Rostov-na-Donu: IPO YuFU, 2010, pp. 192–193.

5. Schwalbe S. *Rolling resistance*. Available at: http://www.schwalbetyres.com/tech_info/rolling_resistance, 2011, pp. 3–6.

6. Evtyukov S. A., Vasil'ev Ya. V. *Ekspertiza DTP: metody i tekhnologii* [Examination of road accidents: methods and technologies]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2012, 310 p.

7. Evtyukov S. A., Brylev I. S. *Obzor sushchestvuyushchikh metodik rascheta skorosti dvukhkolesnykh transportnykh sredstv* [Review of existing methods for calculating the speed of two-wheeled vehicles]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2013, no. 6, pp. 51–56.

8. Brylev I. S. *Rekonstruktsiya DTP po parametram protsessy tormozheniya dvukhkolesnykh mekhanicheskikh transportnykh sredstv* [Reconstruction of road accidents according to the parameters of the braking process of two-wheeled motor vehicles]. 2015, pp. 68–91.

9. Evtyukov S. S., Ginzburg G. Problem of accident reconstruction mechanism using parameters of braking process of two-wheeled motor vehicles. *Architecture and Engineering*. 2016. Available at: <http://aej.spbgasu.ru/index.php/AE/article/view/>

10. Laurencas R., Liudas B., Robertas K. Accident Reconstruction and Assessment of Cyclist's Injuries Sustained in Car-to-Bicycle Collision 2017, pp. 1-2.

11. Evtyukov S. A., Evtyukov S. S. *Problemy rascheta skorosti dvizheniya dvukhkolesnykh mekhanicheskikh transportnykh sredstv pri DTP* [Problems of calculating the speed of movement of two-wheeled motor vehicles in an accident]. *Transportation Research Procedia*, 2018, no. 36, pp. 84–89.

12. Brylev I. S., Evtyukov S. S., Vorozheikin I. V. *Otsenka vremeni reaktsii voditelya dvukhkolesnogo mekhanicheskogo transportnogo sredstva pri tormozhenii*

[Estimation of the reaction time of a driver of a two-wheeled motor vehicle when applying braking]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2019, no. 6 (77), pp. 277–283.

13. Evtyukov S. A., Brylev I. S., Blinder M. M. *Faktory, vliyayushchie na formirovanie ustanovivshegosya zamedleniya dvukhkolesnykh transportnykh sredstv* [Factors affecting the formation of the steady state deceleration of two-wheel vehicles]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 6 (83), pp. 186–194.