УДК 656.13:656.08:656.078(075.8)

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-3-259-264

© Е. В. Тюлькин, генеральный директор
(ООО «Кит оценка»)© E. V. Tyulkin, CEO
(JSC «Kit otsenka»)

© С. А. Евтюков, д-р техн. наук, профессор

© S. A. Evtyukov, Dr. Sci. Tech., Professor

© П. А. Степина, канд. техн. наук

© P. A. Stepina, PhD in Sci. Tech.

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: telefunken3@mail.ru

E-mail: telefunken3@mail.ru

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФРОНТАЛЬНОГО НАЕЗДА АВТОМОБИЛЯ НА ПЕШЕХОДА

PHYSICAL MODEL OF VEHICLE-PEDESTRIAN FRONTAL COLLISION

Рассмотрена методика определения скорости автомобиля по расстоянию отбрасывания пешехода при фронтальном наезде.

Ключевые слова: определение скорости по расстоянию отбрасывания пешехода, фронтальный наезд на пешехода.

This article is devoted to the study of speed detection methods and problems regarding accidents with frontal pedestrian collision.

Keywords: speed detection by using pedestrian throw, frontal car pedestrian accident.

В настоящий момент в Российской Федерации не существует признанной методики, по которой проводится исследование и анализ наезда на пешехода по расстоянию его отбрасывания от точки наезда. Для реконструкции ДТП, связанных с фронтальным наездом на пешехода, требуется установить несколько важных с точки зрения автотехнической экспертизы параметров, в том числе требуется установить скорость движения автомобиля в момент наезда. При современном уровне технического оснащения автомобилей системами ABS, ESP и пр. возможность использования методики, учитывающей наличие следов юза, стремится к минимуму. В связи с этим целью данного исследования является анализ данных, полученных при натурных экспериментах с манекеном человека при фронтальном наезде различных типов транспортных средств, для определения наиболее приемлемой методики расчета скорости автомобиля по расстоянию отбрасывания пешехода от места наезда.

При исследовании проверялась гипотеза о том, что основная зависимость, которая может быть использована на практике — это зависимость скорости движения автомобиля в момент

удара от расстояния, на которое отбросило пешехода $V_{co} = f(S_p)$. Движение транспортного средства и пешехода в момент наезда является сложной системой, физические и математические параметры которой зависят друг от друга.

Одним из первых зависимость $V_{co} = f(S_p)$ описал в 1975 году Н. Appel [1]. При исследовании автомобилей были разделены на две категории, пешеходы разделены на взрослых и детей. Для получения результата формулы нужно использовать парами. Для автомобилей округлой формы используется формула:

$$v = \sqrt{\frac{d}{0,084}}, \quad (1)$$

где v — скорость автомобиля, м/с; d — расстояние отбрасывания пешехода, м.

Для автомобилей V-образной формы используется формула

$$v = \sqrt{\frac{d}{0,065}}. \quad (2)$$

Для расчета скорости движения автомобиля при наезде на детей (3) или взрослых (4) совместно используется первая пара формул.

Для детей:

$$v = \sqrt{\frac{d}{0,088}}. \quad (3)$$

Для взрослых:

$$v = \sqrt{\frac{d}{0,070}}. \quad (4)$$

В изданном в 1981 году в Германии справочнике по реконструкции ДТП Н. Rau [2] была представлена выведенная эмпирически зависимость расстояния отбрасывания от скорости автомобиля в момент столкновения в виде квадратного уравнения.

$$D_t = 0,0052v_0^2 + 0,0783v_0, \quad (5)$$

где D_t — полное расстояние отбрасывания пешехода, м; v_0 — скорость автомобиля в момент наезда, м/с.

В 1993 году выходит работа Дж. А. Серля [3] с описанием расчета скорости по расстоянию отбрасывания пешехода. Этот метод позволяет получить диапазон скоростей подлета пешехода в доверительном ожидании от минимально возможной скорости до максимальной скорости. Скорость подлета пешехода может быть выражена следующим образом:

$$v_{p0\min} = \frac{\sqrt{2g\mu(S_p - S_0 - \mu h)}}{\sqrt{1 + \mu^2}}; \quad (6)$$

$$v_{p0\max} = \sqrt{2g\mu(S_p - S_0 - \mu h)}, \quad (7)$$

где S_p — полное расстояние отбрасывания пешехода, м; S_0 — расстояние, на которое двигается пешеход между первым и вторым ударом, м; g — ускорение свободного падения, м/с²; μ — коэффициент трения между пешеходом и землей; h — высота подлета пешехода, м.

Следующая работа на эту тему была представлена в 1999 году Р. Смитом и А. К. Эвансом [4], которые представили свою формулу:

$$v_{\min} = 3,6\sqrt{S} - 2,16; \quad (8)$$

$$v_{\max} = 3,6\sqrt{S} + 2,16, \quad (9)$$

где $v_{\min}$ — минимальная скорость автомобиля в момент столкновения, м/с; S — полное расстояние отбрасывания пешехода, м; $v_{\max}$ — максимальная скорость автомобиля в момент столкновения, м/с.

В 2001 году I. Han и R. M. Branch [5] представили свой вариант решения:

$$v_{p0} = A_p \sqrt{S_p - B}; \quad (10)$$

$$A_p = \sqrt{\frac{2f_p g}{f_p^2 \sin^2 \theta + f_p \sin 2\theta + \cos^2 \theta}}; \quad (11)$$

$$B = S_0 + f_p h, \quad (12)$$

где v_{p0} — скорость подлета пешехода, м/с; S_p — полное расстояние отбрасывания пешехода, м; h — высота подлета пешехода, м; g — ускорение свободного падения м/с²; θ — угол подлета пешехода; S_0 — расстояние, на которое двигается пешеход между первым и вторым ударом, м; f_p — коэффициент трения между пешеходом и дорогой.

Скорость автомобиля в момент удара может быть выражена уравнениями

$$v_{c0} = A \sqrt{S_p - B}; \quad (13)$$

$$A = A_p \frac{m_c + m_p}{\eta m_c}, \quad (14)$$

где v_{c0} — скорость движения ТС в момент наезда; m_p — масса пешехода; m_c — масса ТС; η — фактор воздействия пешехода.

Значение коэффициента f_p выводилось Г. С. Хиллом опытным путем. Хилл использовал манекен взрослого человека, сделанный из кожи и набитый смесью из песка и мешочков с опилками. Манекен был одет в пять разных типов одежды. Он был выпущен из двигавшегося автомобиля и держался примерно на 0,1 см выше уровня земли. Однако формула, которую вывел Г. С. Хилл, не учитывает воздействия вертикального удара, который возникает, когда манекен ударяется о поверхность дороги. Корректная формула для определения f_p :

$$f_p = \frac{gS_2 + v_{p0}\sqrt{2gh} - \sqrt{(gS_2 + v_{p0}\sqrt{2gh})^2 - 2v_{p0}^2 gh}}{2gh}, \quad (15)$$

где v_{p0} — скорость подлета пешехода, м/с; S_2 — дистанция от места удара о землю до состояния покоя; g — ускорение свободного падения м/с²; h — высота подлета пешехода, м.

В 2003 году А. Тоог и М. Araszewski [6] выразили зависимость следующим образом:

$$v_0 = 8,25 \cdot D_t^{0,61}, \quad (16)$$

где v_0 — скорость автомобиля в момент столкновения, м/с; D_t — расстояние отбрасывания пешехода, м.

Дальнейшее развитие исследований для определения скорости автомобиля было сделано в 2004 году коллективом авторов — D. P. Wood, C. K. Simms, D. G. Walsh [7], которые придержи-

ваются следующей классификации фаз наезда на пешехода:

1. Подброс и заворот пешехода (wrap projection).
2. Выброс вперед.
3. Удар о крыло.
4. Удар о крышу.

Рассматривая подброс и заворот (wrap projection), полное расстояние отбрасывания выглядит так [7]:

$$S_{total} = S_{impact} + S_{flight} + S_{slide/roll/bounce}, \quad (17)$$

где S_{total} — полное расстояние отбрасывания пешехода; S_{impact} — расстояние, на которое двигается пешеход в момент первичного удара; S_{flight} — расстояние, которое преодолевает пешеход по воздуху до удара о землю; $S_{slide/roll/bounce}$ — расстояние, которое пешеход скользит, катится или отскакивает.

Скорость в момент столкновения можно выразить так, если отношение масс неизвестно:

$$v_{col} = C[S - S_0]^D, \quad (18)$$

где v_{col} — скорость автомобиля в момент столкновения, м/с; C и D — коэффициенты регрессии, обеспечивающие уровень доверительной вероятности; S — расстояние отбрасывания пешехода, м; S_0 — расстояние, на которое двигается пешеход между первым и вторым ударом, м.

Если отношение масс известно, то выражение приобретает следующий вид:

$$\frac{v_{col}}{M_r} = C[S - S_0]^D, \quad (19)$$

где M_r — отношение масс,

$$M_r = \frac{m_v + m_p}{m_v}, \quad (20)$$

где m_v — масса транспортного средства, кг; m_p — масса пешехода, кг.

В 2008 году М. Batista [8] описал реконструкцию наезда на пешехода.

Если рассматривать модель движения пешехода после наезда, то полное расстояние отбрасывания выглядит так:

$$S_p = S_0 + S_1 + S_2, \quad (21)$$

где S_p — полное расстояние отбрасывания пешехода, м; S_0 — расстояние, на которое двигается пешеход между первым и вторым ударом (если второй удар имеет место быть), м; S_1 — расстояние, которое преодолевает пешеход по воздуху до удара о землю, м; S_2 — дистанция от места удара о землю до состояния покоя, м.

При этом S_0 зависит от характеристик транспортного средства и пешехода, а также от характера наезда.

Учитывая характер наезда, М. Batista классифицирует четыре фазы:

1. Фаза контакта (включает в себя непосредственный контакт автомобиля и пешехода, импульс тела пешехода и движение на капоте).

Различают два основных типа наезда. Первый тип подбрасывает пешехода и как бы «заворачивает» над передней частью, второй тип наезда выбрасывает тело вперед из-за того, что центр тяжести пешехода расположен ниже, чем передняя выступающая деталь автомобиля.

2. Фаза полета.

3. Фаза столкновения с землей.

4. Фаза скольжения (длится до состояния покоя).

Зачастую при ДТП с участием пешехода известно расстояние отбрасывания тела. Для реконструкции механизма ДТП и определения скорости автомобиля в момент удара необходимо знать расстояние отбрасывания, при этом скорость автомобиля в момент удара можно выразить так:

$$v_{c0} = \left(1 + \frac{m_p}{m_c}\right) \frac{v_{p0}}{\eta}, \quad (22)$$

где v_{c0} — скорость движения ТС в момент наезда; v_{p0} — скорость подлета пешехода; m_p — масса пешехода; m_c — масса ТС; η — фактор воздействия пешехода.

Скорость подлета пешехода v_{p0} можно выразить через расстояние отбрасывания пешехода S_p :

$$v_{p0} = \frac{\sqrt{2g(\sin \alpha + \mu \cos \alpha)(S - S_0 - \mu h)}}{\cos \theta + \sin \theta}, \quad (23)$$

где g — ускорение свободного падения; $\sin \alpha$ и $\cos \alpha$ — тригонометрические функции уклона дороги; μ — коэффициент трения между пешеходом и землей; h — высота подлета пешехода; θ — угол подлета пешехода.

При этом высота и угол подлета пешехода могут быть только предполагаемыми величинами, которые невозможно измерить. Однако современные исследователи предпочитают моделировать этот процесс в существующих специализированных программных продуктах. Так, например, в программе PC-Crash v. 10.0 возможно моделирование мультиобъемного тела пешехода с определением центра тяжести

и механизма наезда в трехмерном пространстве [9]. Совокупно данные о зависимости между скоростью движения автомобиля и дистанцией отбрасывания пешехода по разным алгоритмам расчета представлены на рис. 1.

Для проверки значений существующих методов расчета были проведены натурные испытания наезда автомобиля на манекен пешехода. Манекен изготовлен в рост человека 1 м 70 см, его вес составил 80 кг. Стальной каркас с гнущимися суставами обеспечивает прочность конструкции при испытаниях и возможность установки манекена в разных позициях относительно автомобиля. Наполнение манекена выполнено смесью песка с опилками в пенополиуретановом футляре, обшитом брезентом. Голова манекена выполнена из дерева с соблюдением всех пропорций головы человека. В корпус манекена, на уровне центра масс, встроен герметичный стальной футляр с программируемым датчиком акселерометра, работающим в трех осях. Датчик акселерометра выполнен на основе цифрового MEMS-акселерометра с автономным питанием, USB-интерфейсом и чипом EEPROM на 256 Кбайт. Программно включаемые диапазоны ускорений от 25g до 250g. Полоса частот сигнала датчика от 25 до 3200 Гц.

При проведении эксперимента по наезду на пешехода использовались три типа кузова: клиновидный, трапециевидный и коробчатый. Кли-

новидный кузов по переднему свесу автомобиля соответствует автомобилям класса седан. Трапециевидный кузов соответствует передним свесам автомобилей класса джип. Коробчатый кузов используется для современных автобусов и кабин грузовых автомобилей. Испытания на отбрасывание производились на скоростях от 18 до 50 км/ч. Все фазы наезда на пешехода фиксировались на видеокамеру в нормальном и высокоскоростном режиме. Данные датчика акселерометра записывались в чип EEPROM по трем осям. Длительность записи позволяет анализировать данные о ускорениях, получаемых телом манекена во всех четырех фазах процесса наезда на пешехода: фазе упругого удара, фазе подброса/отбрасывания, фазе удара о землю и подскока, фазе скольжения/волочения. Устанавливают манекен при проведении эксперимента таким образом, чтобы наезд был осуществлен передней правой частью кузова автомобиля (рис. 2).

В результате были получены следующие типичные картины ударных воздействий для разных типов кузова автомобиля при фронтальном наезде (рис. 3–5).

Из-за того что импульс, получаемый манекеном при наезде автомобиля, является комплексным сигналом, оправданно его упрощение. Полученная картина отбрасывания тела после наезда автомобиля позволяет выделить четыре основных фазы, приведенных в иссле-

Рис. 1. Зависимость расстояния отбрасывания пешехода от скорости движения ТС

Рис 2. Момент наезда на манекен при проведении натурных испытаний

довании М. Batista только для случаев наезда на пешехода кузовами с низким расположением переднего свеса. Если расположение точки первичного контакта находится выше центра масс тела манекена, следует рассматривать физико-математическую модель поведения тела человека

Рис. 4. Наезд автомобиля с кузовом седан на скорости 30 км/ч

после выведения его из состояния устойчивого равновесия с учетом силового импульса. В этом случае в общем виде полный путь, пройденный центром тяжести по оси X , можно записать как

$$S = V_x' t_f + S_s, \quad (24)$$

Рис. 3. Наезд автобуса на скорости 30 км/ч

Рис. 5. Наезд автомобиля с кузовом автомобиля класса джип на скорости 30 км/ч (экспоненциальное сглаживание)

где t_f — время свободного падения центра масс тела манекена; V'_x — составляющая скорости по оси X , полученная в конце взаимодействия переднего свеса автомобиля и тела манекена; S_s — перемещение центра масс по оси X во время скольжения:

$$S_s = \frac{1}{2} V'^2_x / \varphi g, \quad (25)$$

где g — ускорение свободного падения; φ — коэффициент трения.

Тогда в общем виде для такого типа наезда на пешехода минимальную границу скорости автомобиля можно определить как

$$V'_x = 3,6 \sqrt{2 S_s \varphi g}. \quad (26)$$

Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод о возможности применения натурных испытаний с использованием датчиков ускорений для других типов наезда на пешехода. Полученные результаты могут быть обобщены в единую методику расчета для практического использования при реконструкции ДТП.

Библиографический список

1. Appel H., Sturtz G., Gotzen L. Influence of impact speed and vehicle parameter on injuries of children and adults in pedestrian accidents // Proceedings of Second International IRCOBI Conference, 1975. Pp. 83–100.

2. Burg H., Rau H. Handbuch der Verkehrsunfallrekonstruktion. Verlag Information Ambs GmbH, Kippenheim, 1981.

3. Searle J. A. The physics of throw distance in accident reconstruction // Society of Automotive Engineers, 1993.

4. Evans A. K., Smith R. Vehicle speed calculation from pedestrian throw distance. Department of Mathematical Sciences, De Monfort University, Leicester, UK, 1999.

5. Han I., Branch R. M. Throw model for frontal pedestrian collisions, Uni. Notre Dame USA, 2001.

6. Toor A., Araszewski M. Theoretical vs. empirical solutions for vehicle/pedestrian collisions. ASME Paper (2003-01-0883).

7. Wood D. P., Simms C. K., Walsh D. G. Vehicle–pedestrian collisions: validated models for pedestrian impact and projection. Dublin, Department of Mechanical Engineering, Trinity College, Dublin, 2004.

8. Batista M. A simple throw model for frontal vehicle-pedestrian collision. University of Ljubljana, 2008.

9. Richardson S., Josevski N., Sandvik A., Pok T., Lange Orton T., Winter B. Pedestrian Throw Distance Impact Speed Contour Plots Using PC-Crash. RMIT University, 2015.

References

1. Appel H., Sturtz G., Gotzen L. Influence of impact speed and vehicle parameter on injuries of children and adults in pedestrian accidents. Proc. of the Second International IRCOBI Conference, 1975, pp. 83–100.

2. Burg H., Rau H. Handbuch der Verkehrsunfallrekonstruktion. Verlag Information Ambs GmbH Publ., Kippenheim, 1981.

3. Searle J. A. The physics of throw distance in accident reconstruction. Society of Automotive Engineers Publ., 1993.

4. Evans A. K., Smith R. Vehicle speed calculation from pedestrian throw distance. Department of Mathematical Sciences, De Monfort University Publ., Leicester, UK, 1999.

5. Han I., Branch R. M. Throw model for frontal pedestrian collisions, Uni. Notre Dame Publ., USA, 2001.

6. Toor A., Araszewski M. Theoretical vs. empirical solutions for vehicle/pedestrian collisions. ASME Paper (2003-01-0883).

7. Wood D. P., Simms C. K., Walsh D. G. Vehicle–pedestrian collisions: validated models for pedestrian impact and projection. Dublin, Department of Mechanical Engineering, Trinity College Publ., Dublin, 2004.

8. Batista M. A simple throw model for frontal vehicle-pedestrian collision. University of Ljubljana Publ., 2008.

9. Richardson S., et al. Pedestrian Throw Distance Impact Speed Contour Plots Using PC-Crash. RMIT University Publ., 2015.