УДК 656.13:656.08:656.078(075.8)

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

© Е. В. Тюлькин, аспирант

© П. А. Степина, канд. техн. наук, доцент

© В. А. Безгина, соискатель кафедры НТТМ

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

E-mail: telefunken3@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-3-166-170

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

© E. V. Tyulkin, post-graduate student

© P. A. Stepina, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© V. A. Bezgina, competitor

(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: telefunken3@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ТЕЛА ПЕШЕХОДА ПРИ РАССЛЕДОВАНИИ ДТП

DETERMINATION OF FRICTION COEFFICIENT OF PEDESTRIAN'S BODY IN ROAD ACCIDENT INVESTIGATION

Рассматривается возможность уточнения коэффициента трения скольжения тела человека при исследовании ДТП, связанных с фронтальным наездом на пешехода, посредством наклонного стенда. Получены коэффициенты трения для разных типов одежды в зимнее время года. Уточнены частные случаи фронтального наезда на пешехода и методы расчета скорости автомобиля.

Ключевые слова: наклонный стенд, коэффициент трения, фронтальный наезд на пешехода.

The article is devoted to the problem of friction coefficient calculation during road accident with frontal pedestrian collision by use of inclined stand. The coefficients of friction for different types of clothes in winter were obtained. Specific cases of frontal impact with a pedestrian and methods for calculating the speed of the car are specified.

Keywords: inclined stand, friction coefficient, frontal pedestrian accident.

Расчет скорости движения автомобиля по отбросу пешехода при наезде автомобиля требует уточнения модели движения тела пешехода, в том числе определения одного из основных параметров — коэффициента трения тела пешехода о поверхность дороги. В данной статье будет рассмотрен способ определения коэффициента трения тела пешехода при его движении по поверхности дороги после наезда ТС при определении скорости движения автомобиля по дистанции отброса пешехода. Для решения этой задачи был проведен ряд экспериментов, предназначенных для измерения коэффициента трения пешехода.

В специализированной литературе описано несколько способов определения коэффициента трения. Например, в работе Дж. С. Хилла «Расчет скорости автомобиля по отбросу пешехода»

а также краш-тестах 1999 года использовалась упрощенная формула [5]

$$V_a = \sqrt{2\mu g S}, \quad (1)$$

где V_a — скорость автомобиля; μ — коэффициент трения пешехода; g — ускорение свободного падения; S — путь скольжения пешехода.

Однако данная формула не учитывает потерь энергии при вертикальном ударе тела пешехода, поэтому в [3] был описан лабораторный тест, который демонстрировал зависимость потери горизонтальной скорости объекта от высоты вертикального падения. Это доказывало непригодность использования формулы (1) для определения коэффициента трения пешехода, так как полученные с ее помощью теоретические значения существенно превышали значения, полученные экспериментальным путем. Поэтому,

анализируя полученные данные испытаний, в [3] приведена формула, учитывающая потери горизонтальной скорости из-за вертикального удара:

$$(V + U\mu) = \sqrt{2\mu g(S + \mu H)}, \quad (2)$$

где V — горизонтальная скорость; U — вертикальная скорость; H — высота падения пешехода.

При $H = 0$ вертикальная скорость отрицательна, поэтому коэффициент трения можно определить как

$$\mu = \frac{UV + gS}{V^2} - \frac{\sqrt{g^2 S^2 + 2UVgS}}{V^2}. \quad (3)$$

Однако эта идеализированная модель для движения по плоской поверхности не учитывает механизма взаимодействия тела манекена с опорной поверхностью при продольном перемещении. Рассмотрим пример с использованием дальнейшего развития моделирования ДТП, связанных с фронтальным наездом на пешехода. Минимальное перемещение манекена

$$\min \{V_p(t_v)\} = \frac{\sqrt{2\mu g[(D_2 + D_3) - \mu H_2]}}{\sqrt{1 + \mu^2}}, \quad (4)$$

максимальное —

$$\max \{V_p(t_v)\} = \sqrt{2\mu g[(D_2 + D_3) - \mu H_2]}, \quad (5)$$

где μ — коэффициент трения пешехода; H_2 — высота от опорной поверхности до центра масс тела манекена; D_1 — дистанция в фазе удара; D_2 — то же в фазе отброса; D_3 — то же в фазе удара о землю и скольжения.

Эксперименты по определению скорости движения ТС при фронтальном наезде на пешехода проводились путем измерения расстояния, преодоленного манекеном вдоль дороги во всех фазах движения. Начальная высота падения манекена, горизонтальная скорость движущегося транспортного средства и положения первого контакта и конечного покоя измерялись с использованием датчиков, установленных в манекене и автомобиле. На рис. 1 представлены результаты испытаний с указанием фаз движения тела человека после наезда ТС [12].

Исходя из полученной картины краш-теста, можно наблюдать перемещение тела манекена пешехода в фазе D_3 — удар о землю и скольжение. На рис. 1 в фазе D_3 имеются два пика ускорений и замедлений центра масс манекена пешехода, что свидетельствует о затухающей реакции системы «манекен–опорная поверхность» при вертикальном перемещении после удара [5].

Рис. 1. Данные датчиков ускорения центра масс манекена со схематическим описанием фаз и траектории движения тела манекена после фронтального наезда автомобиля по модели Дж. Серля — «падение, отскок, скольжение»: $D_t = D_1 + D_2 + D_3$

Таким образом, при анализе импульса столкновения (замедления), наряду с графиками изменения скорости и смещения, мы можем наблюдать отношения между ними, а также между двумя временными шкалами времени динамического смещения и времени восстановления вертикальной скорости (отскока) (рис. 2). В точке максимального сдавливания скорость деформации равна нулю и динамическое воздействие достигает своего максимального значения, в этот момент наблюдается максимальное замедление скорости горизонтального перемещения (см. рис. 1). В точке восстановления соответствующее замедление равно 0, а относительная вертикальная скорость достигает своего максимального значения. Следует обратить внимание, что время динамического сдавливания тела человека при падении с высоты H малоизучено [8] и сведения о нем встречаются в литературе фрагментарно, также нам ничего не известно о времени восстановления формы тела человека, поэтому мы используем данные упрощенных моделей, описывающих уравнения движения.

При воздействии на динамическую систему коэффициент восстановления определяется как отношение модуля скорости в начале удара к модулю скорости в конце удара. На этапе деформации относительное значение модуля скорости уменьшается от начального значения до нуля

в связи с воздействием импульса деформации. В то время когда относительная скорость вертикального перемещения равна 0, достигается максимум динамического воздействия и деформации тела манекена при ударе о землю. Относительная скорость в фазе отскока достигает отрицательного значения до момента окончательного отскока, в момент, когда центр масс манекена достигает максимального положения относительно опорной поверхности. В случае разделения тела манекена и опорной поверхности больше не существует импульса восстановления, действующего на массы, таким образом относительное ускорение в момент отрыва равно 0, что хорошо видно из графиков датчиков акселерометра, приведенных на рис. 1.

В момент вертикального удара благодаря сжатию изменяются фрикционные свойства поверхности тела человека, поскольку сам коэффициент трения является отношением силы трения к нормальной силе, прижимающей тело. Для такого случая подходит модель Максвелла, которая определяет действующую прижимную силу в момент удара по формуле

$$F(0) = \eta \sqrt{2gH}. \quad (6)$$

В случае, если центр масс пешехода находится на одном уровне или ниже выступающей части автомобиля, наезд на пешехода может рассматриваться как частный случай выведения человека

Рис. 2. График смещения модуля скорости по отношению к ускорению при динамическом сдавливании в момент удара

из равновесия с учетом силового импульса. Испытания показали, что в таких случаях отрыв ног человека от земли может не происходить. Тогда наиболее применимой является формула, предложенная на конференции в Гааге в 2001 году [11]:

$$V = \sqrt{2\mu g S} + \sqrt{2\mu g H}. \quad (7)$$

Формула позволяет достаточно хорошо рассчитывать скорость движения автомобиля в момент наезда на пешехода, если точка первичного контакта может быть определена при осмотре ТС [12]. Тем не менее, во всех формулах определения скорости движения автомобиля при фронтальном наезде на пешехода по отбросу μ считается постоянной величиной. Поэтому для проведения исследований были применены стендовые испытания для определения коэффициента трения скольжения (рис. 3).

Для стенда необходима поворачиваемая поверхность достаточного размера для установки

Рис. 3. Схема испытательного стенда для получения значений μ у разных поверхностей

манекена или человека с возможностью смены поверхностей различной шероховатости и твердости. Коэффициент трения рассчитывается по формуле

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha. \quad (7)$$

Тело манекена (человека) помещают на наклонную поверхность с заранее подготовленной поверхностью, после чего изменяют угол наклона. В момент начала равномерного движения тела фиксируют угол наклона и определяют коэффициент трения. Важно, что для стендового испытания можно применять разные типы одежды многократно, что невозможно при натурных краш-тестах, когда одежда манекена рвется под воздействием импульсных динамических нагрузок. Также это позволило получить меньший диапазон разброса значений коэффициента трения при большем количестве испытаний (см. таблицу).

Создание наклонного стенда позволило определить коэффициент трения скольжения μ для различных поверхностей и типов одежды. Возможность применения стенда для данной работы доказывается существующим рабочим диапазоном коэффициента трения, полученного другими исследователями с использованием изложенных методов расчета (1), (3), которые, например, показали диапазон значения коэффициента трения $\mu = 0,39-0,87$ [4] для различных поверхностей.

Значения коэффициента трения тела манекена, полученные при стендовых испытаниях

Тип одежды/Тип поверхности	Количество испытаний	Среднее значение	90 %-ный доверительный интервал для среднего значения	Данные из других источников
Толстая зимняя одежда/лед	15	0,1120	0,1064–0,1176	–
Тонкая кожаная одежда/лед	15	0,0980	0,0931–0,1029	–
Толстая зимняя одежда/лед с рыхлым снегом	15	0,1990	0,1890–0,2089	–
Тонкая кожаная одежда/лед с рыхлым снегом	15	0,1910	0,1814–0,2005	–
Тонкая кожаная одежда/мокрый асфальт	8	0,4230	0,4018–0,4441	0,47 [1], 0,43 [2], 0,45–0,72 [7, 10], 0,30–0,93 [8], 0,66 [9], 0,61 [13], 0,60 [14]
Тонкая кожаная одежда/крупный щебень	10	0,8600	0,8170–0,9030	0,60–0,70 [6]

Библиографический список

1. Пучкин В. А. Судебная автотехническая экспертиза: анализ дорожно-транспортных происшествий: науч.-практ. пособие. Ростов н/Д: Профпресс, 2015. 360 с.
2. Becke M., Golder U. Rutschweiten von Fussgaengern auf nasser Fahrbahn // Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik. December 1988. Pp. 327–328.
3. Searle J. A. The physics of throw distance in accident reconstruction // Accident reconstruction: Technology and animation III, SP-946, Society of Automotive Engineers. SAE paper No. 930659. 1993. Pp. 71–81.
4. Lucchini E., Weissner R. Differences between the kinematics and loadings of impacted adults and children: results from dummy tests // Proc. 5th International IRCOBI Conference on the biomechanics of Impacts, 1980. Pp. 165–179.
5. Тюлькин Е. В., Евтюков С. А., Степина П. А. Физическая модель фронтального наезда автомобиля на пешехода // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 3 (62). С. 259–264.
6. Евтюков С. А., Васильев Я. В. Экспертиза дорожно-транспортных происшествий. СПб.: ООО «Изд-во ДНК», 2006. 536 с.
7. Field J. Pedestrian/vehicle collisions, investigation in the 21st century. West Midlands Police, 2000. 63 p.
8. Wood D., Simms C. Coefficient of friction in pedestrian throw // Impact. 2000. Vol. 9, no 1. Pp. 12–15.
9. Searle J. A., Searle A. The Trajectories of Pedestrians, Motorcycles, Motorcyclists, etc., Following a Road Accident // Society of Automotive Engineers Technical Paper 831622, 1983. 9 p.
10. Happer A., Araszewski M., Toor A., Overgaard R., Johal R. Comprehensive Analysis Method for Vehicle/Pedestrian Collisions // Society of Automotive Engineers Conference, SAE Paper No. 2000-01-0846. 2000.
11. Hague D. J. Calculation of Impact Speed from Pedestrian Slide Distance // Metropolitan Laboratory Forensic Science Service, ITAI Conference, 2001.
12. Степина П. А., Тюлькин Е. В., Подопригора Н. В. Автотехническая экспертиза дорожно-транспортных происшествий: учеб. пособие. СПб.: СПбГАСУ, 2018.
13. Han I., Brach R. M. Throw Model for Frontal Pedestrian Collisions // SAE International Congress, March 2001, paper 2001–01-0898.
14. Toor A., Araszewski M. Theoretical vs. Empirical Solutions for Vehicle/Pedestrian Collisions // SAE Technical Paper 2003-01-0883. 13 p.

References

1. Puchkin V. A. *Sudebnaya avtotekhnicheskaya ehkspertiza. Anali zdorozhno-transportnykh proisshestviy. Nauchno-prakticheskoe posobie* [Judicial auto-technical examination. Analysis of road accidents]. Rostov-on-Don, Profpress Publ., 2015, 360 p.
2. Becke M., Golder U. *Rutschweiten von Fussgaengern auf nasser Fahrbahn. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*. December 1988, pp. 327–328.
3. Searle J. A. The physics of throw distance in accident reconstruction. Accident reconstruction: Technology and animation III, SP-946, Society of Automotive Engineers. SAE paper no. 930659. 1993, pp. 71–81.
4. Lucchini E., Weissner R. *Differences between the kinematics and loadings of impacted adults and children: results from dummy tests*. Proc 5-th International IRCOBI Conference on the biomechanics of Impacts, 1980, pp. 165–179.
5. Tyul'kin E. V., Evtyukov S. A., Stepina P. A. *Fizicheskaya model' frontal'nogonaezda avtomobilya na peshekhoda* [Physical model of vehicle-pedestrian frontal collision]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 3 (62), pp. 259–264.
6. Evtyukov S. A., Vasil'ev Ya. V. *Ehkspertiza dorozhno-transportnykh proisshestviy. Spravochnik* [Examination of traffic accidents. Reference book]. St. Petersburg, DNK Publ., 2006, 536 p.
7. Field J. *Pedestrian/vehicle collisions, investigation in the 21st century*. West Midlands Police, 2000, 63 p.
8. Wood D., Simms C. Coefficient of friction in pedestrian throw. *Impact*, 2000, vol. 9, no 1, pp. 12–15.
9. Searle J. A., Searle A. The Trajectories of Pedestrians, Motorcycles, Motorcyclists, etc., Following a Road Accident. *Society of Automotive Engineers*, paper 831622, 1983, 9 p.
10. Happer A., et al. *Comprehensive Analysis Method for Vehicle/Pedestrian Collisions*. Society of Automotive Engineers, SAE Paper no. 2000-01-0846.
11. Hague D. J. *Calculation of Impact Speed from Pedestrian Slide Distance*. Metropolitan Laboratory Forensic Science Service, ITAI Conference, 2001.
12. Stepina P. A., Tyul'kin E. V., Podoprighora N. V. *Avto tekhnicheskaya ehkspertiza dorozhno-transportnykh proisshestviy* [Auto-technical expertise of road accidents]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2018.
13. Han I., Brach R. M. Throw Model for Frontal Pedestrian Collisions. *Society of Automotive Engineers*, International Congress, March 2001, paper 2001–01-0898.
14. Toor A., Araszewski M. Empirical Solutions for Vehicle/Pedestrian Collisions. *Society of Automotive Engineers*, Technical Paper 2003-01-0883, 13 p.