УДК 656.131:343.983.25

© Я. В. Васильев, канд. техн. наук, доцент

© В. В. Воронин, аспирант

(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: xen2k@rambler.ru, vseslav1@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-6-158-164

© Ya. V. Vasiliev, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© V. V. Voronin, post-graduate student

(Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)

E-mail: xen2k@rambler.ru, vseslav1@yandex.ru

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАБОТЫ СИЛ НА ОПРОКИДЫВАНИЕ ТС ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ

METHODOLOGY FOR CALCULATING THE PERFORMANCE OF FORCES WORKING ON THE VEHICLE ROLLOVER AT CARRYING OUT THE ROAD TRAFFIC ACCIDENT EXAMINATION

Рассматривается метод расчета работы сил на опрокидывание транспортного средства при выполнении экспертного исследования по установлению скорости движения объекта исследования до, в момент и после ДТП. Методика расчета основана на результатах анализа натурных краш-тестов и данных, сохраняемых в EDR (Event Data Recorder, регистратор данных о событиях). Приведены результаты сравнения расчета по предложенной и общепринятой методикам.

Ключевые слова: экспертиза ДТП, анализ ДТП, опрокидывание ТС, реконструкция механизма ДТП, расчет работы сил, скорость движения.

This article discusses a method for calculating the performance of forces working on the overturning the vehicle. The method is used in case of carrying out an expert examination aimed at assessing the vehicle speed before, at the time and after an accident. The calculation methodology is based on the results of the analysis of field crash tests and data stored in the EDR (Event Data Recorder). The results of the comparison of calculations according to the proposed methodology and the generally accepted methodology are presented.

Keywords: road traffic accident examination, road traffic accident analysis, vehicle rollover, traffic accident mechanism reconstruction, calculation of the performance of forces, vehicle speed.

Дорожно-транспортная экспертиза (ДТЭ) занимает важное место в обеспечении контроля за исполнением участниками дорожного движения предъявляемых к ним норм регулирования, в частности требований ПДД РФ. Действующий метод расчета скорости движения ТС при опрокидывании включает отдельный учет работы сил на перемещение ТС A_s по формуле (1) на стадии отброса (для случаев, когда опрокидывание имеет место после или вследствие контактно-следового взаимодействия с другим ТС) или на стадии с момента начала опрокидывания до занятия ТС конечного после ДТП положения и работы на опрокидывание $A_{\text{опр}}$ по формуле (2), в которой учитывается только работа силы на плече опрокидывания (т. е. колес колес):

$$A_s = mg\varphi'S_s, \text{ Дж}, \quad (1)$$

где m — масса ТС с учетом загрузки, кг; g — ускорение свободного падения, $g \approx 9,81 \text{ м/с}^2$; φ' — коэффициент сцепления в поперечном направлении, по [1] рекомендуется принимать от 0,5 до 0,8 от коэффициента в продольном направлении с учетом угла разворота продольной оси ТС на стадии разлета (а именно: при углах до 45° — 0,8, от 45° до 90° — 0,7, от 90° до 180° — 0,6, более 180° — 0,5), в случаях длительного скольжения при опрокидывании и выбеге накатом по [1] рекомендуется принимать как максимальное возможное значение коэффициента сопротивления перемещениям 0,1; S_s — путь перемещений центра масс ТС от точки контакта до занятия зафиксированного конечного после ДТП положения, м.

$$A_{\text{опр}} = mg \left(\sqrt{\left(\frac{B}{2}\right)^2 + h_{\text{COG}}^2} - h_{\text{COG}} \right), \text{ Дж} \quad (2)$$

где B — плечо опрокидывания ТС, м; h_{COG} — высота центра масс ТС, м.

Известно расширенное решение по учету работы сил, представленное в [2]; такой подход частично устраняет недостатки действующего метода, объединяя в себе работы на перемещение и на опрокидывание (переворот на сторону). Согласно [2] суммарная работа сил на опрокидывание ТС в процессе его перемещений на стадии разлета для случая падения с опрокидыванием под уклон кювета или насыпи дороги:

$$A_{\text{опр}} = mg \sum_{i=1}^n \left(\sqrt{\left(\frac{P}{x}\right)^2 + h_X^2} - h_X \right) + mg(h_{\text{сбp}} + (\sin \alpha - f \cos \alpha) S_0), \quad (3)$$

где $i = 1 \dots n$ — число переворотов (при падении на бок $n = 1$, при перевороте на крышу $n = 2$, при перевороте на сторону, противоположную стороне опрокидывания, $n = 3$, при полном обороте $n = 4$); P — плечо опрокидывания ТС, м; x — доля длины плеча к точке опрокидывания в зависимости от фазы опрокидывания (для $n = 1$ и $n = 3$ принимается $x = 0,5$; если $n = 2$ и $n = 4$, то соответственно $x = B - h_{\text{COG}}$, где B — высота ТС, м); h_X — высота центра масс ТС относительно опорной поверхности с учетом фазы опрокидывания (числа переворотов), м; $h_{\text{сбp}}$ — высота сброса, а именно расстояние по вертикали к оси дороги от точки съезда до места конечного положения ТС после ДТП; α — угол сброса (для случаев, если ТС не отрывалось от опорной поверхности, равен углу уклона насыпи или кювета, в иных случаях определяется графическим построением схемы сброса); f — коэффициент сопротивления перемещением при опрокидывании; S_0 — путь, преодолеваемый ТС при опрокидывании.

Согласно [2] суммарная работа сил на опрокидывание ТС на горизонтальном участке дороги в процессе его перемещений на стадии разлета определяется как

$$A_{\text{опр}} = mg \sum_{i=1}^n \left(\sqrt{\left(\frac{P}{x}\right)^2 + h_X^2} - h_X \right) + mgfS_0. \quad (4)$$

Однако такое решение также наследует подход к модели расчета, в котором принимается, что замедление на участке опрокидывания определяется только сцепными и инерционными силами, без демпфирования и учета угловых скоростей

и перемены контактной зоны по мере обочивания (переворачивания). При этом во всех действующих методах расчета скорости движения ТС через работы сил само ТС принимается как жесткое тело [3–6].

Следует отметить, что параллельно с действующей практикой в ДТЭ расчета через работы сил также используется расчет через моменты инерции ТС [7–9], который обладает большей точностью, но из-за сложности ручного решения применяется только в программных средствах для моделирования механизма ДТП (в частности PC-Crash, VistaCrash, VirtualCrash).

С учетом методики, описанной в [10], комплексная процедура модельноориентированной реконструкции опрокидывания ТС, совмещенная с рискориентированным подходом, показана в виде структурной взаимосвязи моделей и методов на рис. 1, а примененная в ней математическая модель расчета энергических затрат на основе закона сохранения количества движения и моментов инерции тел, основанная на обобщенной схеме фазовых перемещений центра масс ТС относительно временной оси, представлена на рис. 2.

С учетом вышеизложенного была разработана математическая модель расчета затрат энергии на перемещения ТС при его продольном опрокидывании в подвижной инерциальной системе координат (рис. 3) с учетом погашения энергии при получении объемных деформаций ТС (включая крышу и ее стойки). Развернутое решение полученной модели позволило также представить компактное решение для практического применения в ДТЭ при расчете скорости движения ТС V_A до опрокидывания через работы сил:

$$V_A = 3,6 \sqrt{\frac{2\Delta E_k + I_o \Delta \omega^2}{m}}, \quad (5)$$

где ΔE_k — кинетическая энергия, затраченная на получение объемных деформаций кузова при опрокидывании, Дж; I_o — момент инерции ТС, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; $\Delta \omega$ — угловая скорость, рад/с .

При производстве ДТЭ уже по факту свершившегося ДТП установление угловой скорости возможно только при получении данных из бортовых устройств регистрации событий — БУРС (банк накопленных данных по которым пока отсутствует и не используется в ДТЭ при

Рис. 1. Структурная взаимосвязь моделей и методов оптимизации и их место в цикле рискориентированного анализа при ДТЭ

Рис. 2. Перемещение системы координат центра масс ТС в фазах опрокидывания

реконструкции ДТП) на практике определение угловой скорости для нужд ДТЭ является актуальной научной задачей. В этой связи были проанализированы 28 тестов из базы NHTSA, а также собраны данные по EDR-банку NASS EDR Report (за 2000–2015 гг. — всего 10 992 записи) и по CDR-базе проекта CISS (3226 записей за 2016–2018 гг.), из которых выбраны 378 пакетов данных (только с опрокидыванием ТС), которые

были обработаны в программе Entree V5, а также средствами MSExcel. Пример отображения базовых 27 каналов записи оборудования краш-теста при обработке файла формата ev5 в пакете программ NHTSA NVS R&D DB Eng. Apps (Entree V5) показан на рис. 4.

Пример фрагмента отчета и графика изменения угловой скорости при опрокидывании после анализа шестнадцатеричного кода записи в фай-

Рис. 3. Углы в инерциальной системе координат модели опрокидывания ТС

Рис. 4. Пример отображения базовых 27 каналов записи оборудования краш-теста

ле 20181011030_V2_ACM.CDRX из базы CISS 2018 показан на рис. 5.

В результате обработки натурных данных получены регрессионные уравнения, описывающие изменение угловой скорости ТС в зависимости от количества четвертей оборота ТС при перемещении с продольным вращением (табл. 1), а также в зависимости от продольного ускорения (замедления) и состояния покрытия (соответственно по коэффициенту сцепления: сухое, мокрое и гололед) (табл. 2).

На основе выполненного анализа экспериментальных данных (натурных краш-тестов и данных EDR) была разработана методика расчета работы сил на совместное перемещение, разворот и вращение ТС при опрокидывании,

использующая следующее выражение расчета полной работы сил:

$$A_{\text{опр}} = \left[\left(\left(\frac{a-b}{L_T} S_C \frac{1-\cos \gamma'}{\gamma'} \right) + \left(0,75 \left(\frac{\sum_{i=1}^{n-1} S_C^i}{\pi} - \frac{S_C^{i=n} (1+\sin \gamma')}{2(\gamma' - W\pi)} \right) \right) + \frac{2ab}{L_T} \gamma' + \left(\frac{\Delta \omega \varepsilon k_r^2}{25,92r(\varepsilon \sin \theta - \cos \theta)} \right) \right] \cdot \varphi', \quad (6)$$

где $i = 1 \dots n$ — число четвертей оборота; a — расстояние от центра масс автомобиля до его перед-

Рис. 5. Пример графика изменения угловой скорости при опрокидывании по базе CDR проекта CISS

Таблица 1

**Зависимости угловой скорости ТС от количества четвертей оборота ТС
при перемещении с продольным вращением**

№ п/п	Число четвертей оборота	Уравнение регрессии	Достоверность аппроксимации
1	Одна	$\Delta\omega = 68,833x^3 - 838x^2 + 3139,2x - 3350$	0,889
2	Две	$\Delta\omega = 8,1414x^3 - 167,07x^2 + 974,69x - 1165,5$	0,923
3	Три	$\Delta\omega = 1,0894x^3 - 29,892x^2 + 198,31x + 85,667$	0,888
4	Четыре и более	$\Delta\omega = 0,0627x^3 - 4,6049x^2 + 74,366x + 259,87$	0,857

ней оси, м; b — расстояние от центра масс автомобиля до его задней оси, м; $L_T = a + b$, колесная база автомобиля, м; γ' — угол между направлением перемещения ТС и линией, направленной от его центра масс к середине передней оси, рад; S_C — полная длина перемещений центра масс (хорда дуги) ТС на стадии разлета от места столкновения до конечного после ДТП положения автомобиля, $S_C = \sum_{i=1}^n S_C^i$, м; S_C^i — i -й участок траектории центра масс автомобиля, на котором угол γ изменился в соответствующей четверти оборота, м; W — соответствующая четверти оборота доля квадранта угла γ : $\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, 2$; $\Delta\omega$ — угловая скорость, рад/с; r — радиус оборачивания контактной зоны (расстояние от центра масс к точке контакта в четверти оборота), м; k_r — радиус гирации, м; ϵ — коэффициент сцепления в зоне скольжения; θ — угол вращения продольной оси, рад.

С целью верификации предложенного метода расчета работы сил были отобраны десять ДТП из экспертной практики ИБДД СПбГАСУ. Во всех 10 примерах расстояния перемещений и конечный угол разворота продольной оси ТС были определены путем графического построения схемы места ДТП. Сравнение полученных значений показано в табл. 3.

Полученные результаты в сравнении показывают, что в 70 % расчетных случаев, выбранных для верификации, до опрокидывания имело место превышение максимально допустимой скорости движения, которое не могло быть установлено при расчете по действующей методике, что является весьма существенным для обеспечения контроля за исполнением участниками дорожного движения требований ПДД РФ.

Таблица 2

**Зависимости угловой скорости ТС от продольного ускорения (замедления)
и коэффициента сцепления**

№ п/п	Значение коэффициента сцепления	Уравнение регрессии	Достоверность аппроксимации
1	0,7	$\Delta\omega = -1,4866x^3 + 24,799x^2 - 30,798x + 183,44$	0,809
2	0,5	$\Delta\omega = -1,2486x^3 + 28,478x^2 - 31,674x + 106,44$	0,811
3	0,3	$\Delta\omega = -1,1175x^3 + 27,98x^2 - 24,741x + 58,442$	0,807

Таблица 3

Результаты расчета по предложенной и действующей методикам

№	Ограничение скорости	Расчет по действующей методике		Расчет по предложенной методике	
		Суммарная работа сил, Дж	Скорость, км/ч	Суммарная работа сил, Дж	Скорость, км/ч
1	60	171 414	53,7	198 454	57,8
2	90	418 360	87,2	487 241	94,1
3	60	270 132	57,7	289 452	59,8
4	90	311 263	84,1	478 368	104,3
5	40	96 375	43,0	117 855	47,5
6	40	94 870	36,3	147 821	45,3
7	60	239 694	60,9	278 454	65,7
8	90	334 440	83,4	389 784	90,1
9	90	465 456	93,6	578 144	104,3
10	90	605 137	95,5	678 418	101,1

Библиографический список

1. Евтюков С. А., Васильев Я. В. Справочник по экспертизе дорожно-транспортных происшествий. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: Петрополис, 2020. 516 с.
2. Евтюков С. С. Методология оценки и повышения эффективности дорожно-транспортных экспертиз: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2020. 355 с.
3. Кристи Н. М. Решение отдельных типовых задач судебной автотехнической экспертизы / отв. ред. В. Ф. Алексеев. М.: ВНИИСЭ МЮ СССР, 1988. 37 с.
4. Боровский Б. Е. Безопасность движения автомобильного транспорта. Л.: Лениздат, 1984. 305 с.
5. Суворов Ю. Б. Судебная дорожно-транспортная экспертиза. М.: Экзамен: Право и закон, 2003. 202 с.
6. Пучкин В. А. Основы экспертного анализа ДТП: база данных, экспертная техника, методы решений. Ростов н/Д: ИПО ПИ ЮФУ, 2012. 400 с.
7. Reza A., Wierciński J. Wypadki drogowe Vademecum biegłego sądowego. 2^e wyd. Kraków: Instytut Ekspertyz Sądowych, 2010. 1094 s.
8. Orłowski K. F., Moffatt E. A., Bundorf R. T., Holcomb M. P. Reconstruction of Rollover Collisions. SAE Technical Paper 890857, 1989. 12 p.

9. Brach R. M., Brach R. M. Vehicle Accident Analysis and Reconstruction Methods. Warrendale, PA: SAE International, 2005. 442 p.

10. Васильев Я. В., Воронин В. В. Методика расчета работы сил на непрерывное изменение угла разворота продольной оси ТС при производстве дорожно-транспортной экспертизы // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 3 (86). С. 134–138.

References

1. Evtyukov S. A., Vasil'ev Ya. V. *Spravochnik po ekspertize dorozhno-transportnykh proissheshtviy* [Reference book on the examination of road traffic accidents]. 3-rd ed., revised. St. Petersburg, Petropolis Publ., 2020, 516 p.
2. Evtyukov S. S. *Metodologiya otsenki i povysheniya effektivnosti dorozhno-transportnykh ekspertiz. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Methodology of evaluation and improvement of the effectiveness of road traffic examinations. Dr. Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2020, 355 p.
3. Kristi N. M. *Reshenie otde'nykh tipovykh zadach sudebnoy avtotekhnicheskoy ekspertizy* [Solution of some typical tasks of forensic auto-technical expertise]. Ed. by Alekseev V. F. Moscow, VNIISE MYu SSSR Publ., 1988, 37 p.

4. Borovskiy B. E. *Bezopasnost' dvizheniya avtomobil'nogo transporta* [Safety of automobile transport traffic]. Leningrad, Lenizdat Publ., 1984, 305 p.
5. Suvorov Yu. B. *Sudebnaya dorozhno-transportnaya ekspertiza* [Judicial road traffic expertise]. Moscow, Ekzamen:Pravo i zakon Publ., 2003, 202 p.
6. Puchkin V. A. *Osnovy ekspertnogo analiza DTP: baza dannykh, ekspertnaya tekhnika, metody resheniy* [Fundamentals of expert analysis of road traffic accident: database, expert technique, decision methods]. Rostov-on-Don IPO PI YuFU Publ., 2012, 400 p.
7. Reza A., Wierciński J. *Wypadkidrogowe Vademecumbiegłegosądowego*. 2^e wyd. Kraków, Instytut Ekspertyz Sądowych, 2010, 1094 p.
8. Orlowski K. F., Moffatt E. A., Bundorf R. T., Holcomb M. P. *Reconstruction of rollover collisions*. SAE Technical Paper 890857, 1989, 12 p.
9. Brach R. M., Brach R. M. *Vehicle accident analysis and reconstruction methods*. Warrendale, PA, SAE International, 2005, 442 p.
10. Vasiliev Ya. V., Voronin V. V. *Metodika rascheta raboty sil na nepreryvnoe izmenenie ugla razvorota prodol'noy osi TS pri proizvodstve dorozhno-transportnoy ekspertizy* [Methodology for calculating the work of forces on the continuous change in the angle of rotation of the longitudinal axis of the vehicle in performing road accident examinations]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2021, no. 3 (86), pp. 134–138.