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 10.23968/1999-5571-2021-18-3-134-138

© 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 НЕПРЕРЫВНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ УГЛА РАЗВОРОТА ПРОДОЛЬНОЙ ОСИ ТС ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДОРОЖНО- ТРАНСПОРТНОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ

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

В данной статье рассматривается метод расчета работы сил на перемещение и разворот транспортного средства при выполнении экспертного исследования по установлению скорости движения объекта исследования до, в момент и после ДТП. Приведены результаты сравнения расчета по предложенной методике и расчета по общепринятой методике с данными, полученными в натурных краш-тестах на полигоне.

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

This article discusses a method for calculating the operation of forces aimed at moving and turning the vehicle when performing an expert examination to establish the speed of movement of the research object before, at the time and after the accident. The authors present the results of comparing the calculation according to the proposed method and the calculation according to the generally accepted method with the data obtained in full-scale crash tests at the test site.

Keywords: road accident examination, road accident analysis, reconstruction of the road accident mechanism, calculation of forces' operation, vehicle speed.

Среди множества задач, решаемых в рамках дорожно-транспортной экспертизы, особое место при реконструкции механизма ДТП всегда занимало установление фактических значений скорости движения объектов исследования (транспортных средств — участников ДТП) на всех стадиях развития механизма ДТП. Эволюция методов расчета скоростей движения во взаимосвязи с развитием методологии реконструкции механизма ДТП от экспертного мнения середины прошлого века до модельно-ориентированного подхода современности претерпела ряд существенных изменений, но, к со-

жалению, сохранила некоторые допущения как в процедурах исследования, так и в фундаментальной части выполняемых расчетов и применения некоторых расчетных формул, которые чаще всего используются как универсальное расчетное решение без учета фактического характера перемещения ТС на стадии отброса (разлета).

Начиная с работ таких ученых, как Н. М. Кристи, Б. Е. Боровский, Ю. Б. Суворов, С. А. Евтюков [1–5], в экспертную практику широко внедрилась практика расчета скорости движения транспортного средства (ТС) до ДТП на основе закона сохранения количества движения, мето-

дика которого основана, в частности, на суммировании работ сил на перемещения, разворот, опрокидывание и преодоление препятствия объектами исследования в стадиях «сближение — контактно-следовое взаимодействие — разлет». В общем виде для столкновений двух ТС устоявшаяся экспертная практика при расчете скорости движения ТС в экспертных исследованиях для определения работ сил на перемещения и разворот ТС использует следующие формулы:

Работа силы на перемещения ТС, Дж:

$$A_{SC} = m_T g \phi' S_C, \quad (1)$$

где m_T — масса ТС, кг; g — ускорение свободного падения, общезначимая константа, $g \approx 9,81$ м/с²; ϕ' — коэффициент сцепления в поперечном направлении, обычно в экспертной практике принимается равным 0,5–0,8 от продольного коэффициента сцепления, с учетом рекомендаций [6]; S_C — длина перемещений центра масс (хорда дуги) ТС, м, на стадии разлета от места столкновения до конечного после ДТП положения или на расчетном участке, отличном от соседних, через которые перемещалось ТС, по продольному коэффициенту сцепления.

И соответственно работа сил на разворот ТС, Дж:

$$A_{RC} = m_T g L_T \frac{2\pi\alpha_{RC}}{360} \phi', \quad (2)$$

где L_T — колесная база ТС, м; α_{RC} — угол разворота продольной оси ТС в ходе перемещений на стадии разлета, определяемый по масштабному построению схемы места ДТП, град.

При этом формулы (1) и (2) имеют ряд существенных допущений, влияющих на точность расчета итогового значения скорости движения ТС до ДТП, и высокую чувствительность к значению принимаемого коэффициента сцепления ϕ' . В частности, расчет пути перемещений ТС на стадии с момента выхода из контакта до момента занятия конечного после ДТП положения (стадия разлета в хронологии механизма ДТП) использует не полный фактический путь, а хорду его дуги, при этом разворот ТС вычисляется как отдельная работ сил, хотя в физическом смысле разворот имеет место в ходе перемещений, и силы (остаточное количество движения), определяющие сопротивление перемещению, обуславливают также и разворот ТС. При этом нет достаточно проработанных и обоснованных

исследований, учитывающих сопротивление качению и/или скольжению при разрушении элементов подвески и волочении, в случаях когда деформированные элементы кузова ТС блокируют вращение одного или нескольких колес, что в экспертной практике обычно компенсируется усреднением коэффициента сцепления в поперечном направлении и/или его минимизацией. Также вышеуказанный метод расчета не позволяет численно учесть участки пути, на которых после выхода из контакта одно или несколько колес не находятся в контакте с поверхностью дороги, каким-либо иным способом, кроме варьирования значения коэффициента сцепления.

Таким образом, перемещение ТС на стадии отброса с разворотом рассматривается в большинстве отечественных работ [2–6] как сумма поступательного и вращательного движений, т. е. как поступательное движение от момента начала торможения до момента остановки и последующее вращение на величину угла разворота, что является весьма приблизительным описанием реального движения с разворотом. Известна также публикация Ю. И. Маркоишвили, И. И. Чавы и В. И. Чернова [7], в которой ранее уже было учтено непрерывное изменение угла разворота в процессе торможения. Соответственно зависимость замедления ТС от этого угла, показанная в [7] как частное решение, была обоснована только для случаев, когда ТС уже находится в заторможенном состоянии на стадии отброса или в заносе с заблокированными колесами.

Максимальный момент сил, препятствующих развороту автомобиля вокруг вертикальной оси, равен

$$\begin{aligned} m_T g \phi \frac{b}{L_T} a \sin \psi + m_T g \phi \frac{a}{L_T} b \sin \psi = \\ = \frac{2ab}{L_T} m_T g \phi \sin \psi, \end{aligned} \quad (3)$$

где a — расстояние от центра масс автомобиля до его передней оси, м; b — расстояние от центра масс автомобиля до его задней оси, м ($L_T = a + b$); ψ — угол между силой, действующей на переднюю (заднюю) ось автомобиля, и его продольной осью, рад.

В обобщенном виде замедление в зависимости от угла γ между направлением движения автомобиля и лучом, направленным от центра масс

автомобиля к середине его передней оси, может быть определено по формуле

$$j(\gamma) = g\varphi \sin \psi \frac{a-b}{L} \sin \gamma + g\varphi \cos \psi |\cos \gamma|. \quad (4)$$

Таким образом, в (3) и (4) наблюдается зависимость замедления ТС от угла разворота, который в свою очередь может варьироваться в широких пределах, и расчетную задачу можно свести к необходимости вычисления среднего значения замедления $j_{\text{ср}}$ на некотором i -м участке перемещения для последующего определения затрат кинетической энергии на данном участке, а именно

$$j_{\text{ср}} = \frac{g\varphi \sin \psi \frac{a-b}{L}}{\Delta\gamma} \int_{\gamma_i}^{\gamma_{i+\Delta\gamma}} \sin \gamma \cdot d\gamma + \frac{g\varphi \cos \psi}{\Delta\gamma} \int_{\gamma_i}^{\gamma_{i+\Delta\gamma}} |\cos \gamma| \cdot d\gamma. \quad (5)$$

С учетом результатов интегрирования и закона сохранения энергии

$$\sum_{i=1}^n m_T j_{\text{ср}} \Delta S_i + \frac{2ab}{L} m_T g\varphi \sin \psi \sum_{i=1}^n \Delta\gamma = \frac{m_T}{25,92} \sum_{i=1}^n (V_{i-1}^2 - V_i^2), \quad (6)$$

где V_i — скорость движения автомобиля в конце i -го участка.

Опустим вывод формул. Авторами были получены расчетные зависимости для расчета работы сил на непрерывное изменение угла разворота продольной оси ТС против часовой стрелки при его перемещении на стадии отброса. В частности, для любых четырех (и более) случаев попадания угла γ' между направлением перемещения ТС и лучом, направленным от его центра масс к середине передней оси, работа сил A_{MR} , совершенная на непрерывное изменение угла разворота продольной оси ТС при перемещении на стадии отброса, определяется по формулам (7)–(10):

при $0 < \gamma' \leq \frac{\pi}{2}$

$$A_{MR} = m_T g\varphi' \left[\left(\frac{a-b}{L_T} S_C \frac{1-\cos \gamma'}{\gamma'} \right) + \left(0,75 S_C \frac{\sin \gamma'}{\gamma'} + \frac{2ab}{L_T} \gamma' \right) \right]; \quad (7)$$

при $\frac{\pi}{2} < \gamma' \leq \pi$

$$A_{MR} = m_T g\varphi' \left[\left(\frac{a-b}{L_T} S_C \frac{1-\cos \gamma'}{\gamma'} \right) + \left(0,75 \left(\frac{S_C^I}{\pi} + \frac{S_C^{II} (1-\sin \gamma')}{2 \left(\gamma' - \frac{\pi}{2} \right)} \right) + \frac{2ab}{L_T} \gamma' \right) \right], \quad (8)$$

где S_C^I — участок траектории центра масс автомобиля, на котором угол γ изменился от 0 до $\frac{\pi}{2}$; S_C^{II} — участок траектории центра масс автомобиля, на котором угол γ изменился от $\frac{\pi}{2}$ до γ' , причем $S_C^I + S_C^{II} = S_C$.

При $\pi < \gamma' \leq \frac{3}{2}\pi$

$$A_{MR} = m_T g\varphi' \left[\left(\frac{a-b}{L_T} S_C \frac{1-\cos \gamma'}{\gamma'} \right) + \left(0,75 \left(\frac{S_C^I + S_C^{II}}{\pi} - \frac{S_C^{III} \sin \gamma'}{2(\gamma' - \pi)} \right) + \frac{2ab}{L_T} \gamma' \right) \right], \quad (9)$$

где S_C^{II} — участок траектории центра масс автомобиля, на котором угол γ изменился от $\frac{\pi}{2}$ до π ; S_C^{III} — участок траектории центра масс автомобиля, на котором угол γ изменился от π до γ' , причем $S_C^I + S_C^{II} + S_C^{III} = S_C$;

при $\frac{3}{2}\pi < \gamma' \leq 2\pi$

$$A_{MR} = m_T g\varphi' [], \quad (10)$$

где S_C^{III} — участок траектории центра масс автомобиля, на котором угол γ изменился от π до $\frac{3}{2}\pi$; S_C^{VI} — участок траектории центра масс автомобиля, на котором угол γ изменился от $\frac{3}{2}\pi$ до γ' , причем $S_C^I + S_C^{II} + S_C^{III} + S_C^{IV} = S_C$.

Для случаев большего значения угла вычисления проводятся последовательно по формулам (7)–(10), в которых по тому же закону будет изменяться состав второго слагаемого в квадратных скобках. В случае разворота автомобиля в обратном направлении формулы остаются теми же, но угол разворота отсчитывается по часовой стрелке.

Целью верификации предложенного метода расчета работ сил были отобраны десять ДТП из экспертной практики ИБДД СПбГАСУ, в которых исследование скорости движения не проводилось, но имеющийся объем исходных данных был достаточен для целей данного исследования.

Результаты сравнения методов расчета

№	Расчет работы сил по действующей общепринятой методике				Расчет работы сил по предлагаемой методике	
	Работа сил на перемещение, Дж	Работа сил на разворот, Дж	Суммарная работа, Дж	Скорость ТС, км/ч	Суммарная работа, Дж	Скорость ТС, км/ч
1	99657,3	26683,4	126340,8	49,3	24553,4	21,7
2	63073,4	35880,6	98954,0	39,2	21523,9	18,3
3	46322,0	13974,7	60296,8	35,5	35049,7	27,1
4	415893,0	145030,0	560923,0	83,2	157013	44,0
5	46756,9	13448,3	60205,2	31,7	35295,1	24,3
6	59152,3	19553,2	78705,6	37,4	44723,6	28,2
7	186607,3	71182,8	257790,1	69,3	65364,3	34,9
8	88985,3	29668,1	118653,4	41,1	67510,8	31,0
9	107794,7	12754,1	120548,9	40,0	81020,8	32,8
10	67431,5	17855,7	85287,2	43,4	34012,9	27,4

Были отобраны случаи, где имело место только перемещение в пределах покрытия с одним состоянием без выезда на обочину и/или грунт, а также где не было опрокидывания ТС и/или его переезда через бордюрные камни. Во всех десяти примерах были определены путем графического построения схемы места ДТП. Сравнение полученных значений показано в таблице.

Кроме того, были выбраны пять натурных краш-тестов по [8] и семь натурных краш-тестов по данным Национального управления безопасностью движения на трассах (National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)), для которых известны скорости в момент контакта, а также затраты скорости на деформации, на перемещения и разворот после выхода из контакта. Для всех выбранных тестов были произведены расчеты работы сил по действующей методике и по предлагаемой. Результаты расчета скорости показаны на рисунке.

Из приведенных результатов сравнения значений расчетной скорости к моменту выхода из контакта (для выбранных случаев, где отсутствовало движение по участкам с покрытиями, отличными от исходного, а также не было переезда бордюрного камня и/или опрокидывания), определенных по действующей и предлагаемой методике расчета, наглядно следует, что используемая в общей практике производства экспертиз методика расчета работ сил на перемещение и разворот существенно завышает (в среднем на 15–20 км/ч) фактическое значение скорости в момент выхода из контакта и, как следствие,

Результаты сравнения методов расчета с данными краш-тестов

оказывает влияние на дальнейший расчет скорости к моменту столкновения. Это позволяет сделать вывод, что использование расчета работы сил на перемещение и разворот ТС по методике, предполагающей использование формул (1) и (2), существенно улучшает точность и достоверность экспертного исследования и полученных выводов.

Вывод о завышении расчетных значений скоростей к моменту выхода из контакта также следует из [7], исходя из представленных там результатов расчета. Показанное сравнение значений, полученных по предложенной методике расчета, с тестовыми значениями показывает меньшее отклонение расчетной скорости к моменту выхода из контакта от фактического значения относительно стандартной методики расчета работы сил на перемещение и разворот ТС.

Таким образом, предложенный метод расчета в сравнении со стандартным общепринятым методом показывает свою допустимую для судебной экспертизы точность и может быть применен в экспертной практике при решении задач, связанных с реконструкцией механизма ДТП, и в частности при расчете скорости движения ТС до ДТП.

Библиографический список

1. Кристи Н. М. Решение отдельных типовых задач судебной автотехнической экспертизы / отв. ред. В. Ф. Алексеев. М.: ВНИИСЭ МЮ СССР, 1988. 37 с.
2. Боровский Б. Е. Безопасность движения автомобильного транспорта: Анализ дорожных происшествий. Л.: Лениздат, 1984. 305 с.
3. Суворов Ю. Б. Судебная дорожно-транспортная экспертиза: Судеб.-эксперт. оценка действий водителей и других лиц, ответств. за обеспечение безопасности дорож. движения, на участках ДТП. М.: Экзамен: Право и закон, 2003. 202 с.
4. Пучкин В. А. Основы экспертного анализа дорожно-транспортных происшествий: база данных, экспертная техника, методы решений. Ростов н/Д: ИПО ПИ ЮФУ, 2010. 398 с.
5. Евтюков С. А., Васильев Я. В. Реконструкция и экспертиза ДТП в примерах. СПб.: ИД «Петрополис», 2012. 324 с.
6. Евтюков С. А., Васильев Я. В. Справочник по экспертизе дорожно-транспортных происшествий. СПб.: ИД «Петрополис», 2020. 516 с.
7. Маркошвили Ю. И., Чава И. И., Чернов В. И. Определение скорости движения ТС по следам торможения при его движении в заторможенном состоянии с заносом и разворотом // Судебная автотехническая экспертиза: сб. науч. тр. / редкол.: В. Ф. Алексеев [и др.]. М.: ВНИИСЭ, 1986. 174 с.
8. Cliff W. E., Montgomery D. T. Validation of PC-Crash — A Momentum-Based Accident Reconstruction Program. SAE Technical Paper 960885, 1996. 34 p.

References

1. Kristi N. M. *Reshenie otdel'nykh tipovykh zadach sudebnoy avtotekhnicheskoy ekspertizy* [Solution of certain typical tasks of the forensic automotive expertise]. Ed. by Alekseev V. F. Moscow, VNIISE MYu SSSR Publ., 1988, 37 p.
2. Borovskiy B. E. *Bezopasnost' dvizheniya avtomobil'nogo transporta. Analiz dorozhnykh proissheshtviy* [Traffic safety of motor transport. Examination of road traffic accidents]. Leningrad, Lenizdat Publ., 1984, 305 p.
3. Suvorov Yu. B. *Sudebnaya dorozhno-transportnaya ekspertiza: Sudeb.-ekspert. otsenka deystviy voditeley i dr. lits, otvetstv. za obespechenie bezopasnosti dorozh. dvizheniya, na uchastkakh DTP* [Forensic road transport expertise. Forensic expert assessment of the actions of drivers and other persons responsible for ensuring the road traffic safety on the road accident sites]. Ekzamen. Pravo i zakon [In: Road traffic examination. Right and duty]. Moscow, 2003, 202 p.
4. Puchkin V. A. *Osnovy ekspertnogo analiza dorozhno-transportnykh proissheshtviy: baza dannykh, ekspertnaya tekhnika, metody resheniy* [Fundamentals of expert analysis of road traffic accidents: database, expert equipment, methods of solutions]. Rostov-on-Don, IPO PI YuFU Publ., 2010, 398 p.
5. Evtyukov S. A., Vasil'ev Ya. V. *Rekonstruktsiya i ekspertiza DTP v primerakh* [Reconstruction and examination of road accidents in examples]. St. Petersburg, Petropolis Publ., 2012, 324 p.
6. Evtyukov S. A., Vasil'ev Ya. V. *Spravochnik po ekspertize dorozhno-transportnykh proissheshtviy* [Reference book on the examination of road accidents]. St. Petersburg, Petropolis Publ., 2020, 516 p.
7. Markoishvili Yu. I., Chava I. I., Chernov V. I. *Opredelenie skorosti dvizheniya TS po sledam tormozheniya pri ego dvizhenii v zatormozhennom sostoyanii s zanosom i razvorotom* [Determination of the vehicle speed by braking traces when it is moving in a braked state with skidding and turning]. *Sb. nauch. tr. «Sudebnaya avtotekhnicheskaya ekspertiza»* [In: Coll. of sci. works "Forensic auto-technical expertise"]. Eds. Alekseev V. F., et al. Moscow, VNIISE Publ., 1986, 174 p.
8. Cliff W. E., Montgomery D. T. *Validation of PC-Crash — A Momentum-Based Accident Reconstruction Program*. SAET Technical Paper 960885, 1996, 34 p.