

УДК 621.331

С. А. АЗЕМША, кандидат технических наук; В. Н. ГАЛУШКО, кандидат технических наук; С. В. СКИРКОВСКИЙ, магистр технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ

Приведен анализ возможностей программ моделирования дорожно-транспортных происшествий. Выполнен статистический анализ значимости отличий между результатами моделирования при помощи различных программ и проведена проверка адекватности полученных результатов. Предложен и реализован программный алгоритм проверки адекватности получаемых с помощью моделирования результатов.

Общим при проведении многих видов судебных экспертиз является выполнение расчетов по тем или иным формулам, в которые входят значения соответствующих табличных справочных данных, параметров и коэффициентов. Так, например, формулы, описывающие механическое движение, позволяют эксперту рассчитать параметры, связанные с эффективностью торможения автомобиля. При этом информацию о числовых значениях величин (времени, реакции водителя, коэффициенте сцепления, временных параметрах тормозной системы и др.), входящих в формулы, эксперт выбирает самостоятельно из научно-технической и справочной литературы, исходя из собственного опыта и существующих рекомендаций [1–4]. Однако получить надежные и достоверные результаты расчетов возможно лишь при условии подстановки в формулы достоверных числовых значений соответствующих исходных расчетных данных (результатов измерений, параметров и коэффициентов). Это обстоятельство связано с обоснованностью, объективностью и достоверностью выводов эксперта. Однако всегда ли выбор эксперта точен?

Исходя из требований действующего законодательства, выбор применяемой экспертом методики автотехнической экспертизы (АТЭ) дорожно-транспортных происшествий (ДТП) не регламентируется и прямо зависит от решения эксперта. Методики, применяемые в практике АТЭ, основаны на законах физики, теоретической механики, теории и конструкции автомобилей, теории соударения и т.д. При этом, как правило, происходит упрощение применяемых математических зависимостей. Это связано с тем, что при производстве экспертизы может быть ограничено число задаваемых исходных параметров и для упрощения процесса вычисления, что приводит к снижению достоверности результата. Поэтому актуальной задачей является повышения достоверности экспертных исследований и сокращения сроков их производства. Применение специального программного обеспечения позволяет значительно повысить эффективность выполняемых работ по решению поставленных задач по трем аспектам:

- ускоряется процесс расчетов;
- в качественном плане применение компьютерных программ уменьшает вероятность ошибок арифметического характера;
- имеется возможность визуализации результатов произведенного исследования.

В Европе можно выделить три компании, поставляющие подобное программное обеспечение:

– IbV Informatik GmbH, производящая компьютерные модули CARAT (Computer Assisted Reconstruction of Accidents in Traffic);

– Dr. Steffan Datentechnik, поставляющая на рынок программу PC-Crash и ей сопутствующие модули (PC-Rect);

– Dr. Werner Gratzler – ANALYSER PRO.

Находит применение простая программа расчетов “Экспресс-анализ ДТП”, позволяющая определять: скорости легковых автомобилей по данным о следе торможения; допустимой скорости по условиям видимости; удаления автомобиля, при наезде без торможения.

Анализ возможностей представленных программ. Математическая модель динамического перемещения основывается на применении известных дифференциальных уравнений движения. Анализ и моделирование столкновений являются основным модулем программы CARAT-3, 4. В ней известные из теоретической механики законы сохранения импульса и его момента дают в некоторых случаях погрешности. Поэтому математическая модель столкновения имеет основой гипотезу Кудлиха-Слибара (Kudlich-Slibar), дополняя ее уравнениями так называемого метода эквивалентных деформаций энергий по Бургу-Цайдлеру (Burg-Zeidler). Применяемые в программе CARAT модули предназначены для подтверждения и визуализации некоторой логической и обоснованной версии. Данная программа предполагает наличие специальных знаний и опыта.

Ввиду постоянно возрастающих объемов работ по автотехническим экспертизам, необходимости увеличения производительности труда экспертов-автотехников, повышения достоверности экспертных исследований и сокращения сроков их производства ГУ СЗРЦСЭ создало программу "AUTO-GRAF". Программа представляет собой графический редактор, позволяющий строить масштабные схемы ДТП с учетом требований экспертной практики. Программа располагает большой базой транспортных средств – более 170 автомобилей, содержит полную базу дорожных знаков и разметки, а также элементов дорожной обстановки на месте ДТП (дома, светофоры, деревья, пешеходы и т.д.). Кроме этого, в программу введен такой удобный инструмент, как шаблоны перекрестков, с необходимой конфигурацией и шириной проезжих частей. Программа проста в

использовании и легка в освоении, к тому же она в огромной степени повышает наглядность и достоверность экспертных исследований.

Учесть большое число влияющих на транспортные средства (ТС) параметров позволяет программа динамического моделирования австрийского разработчика "PC-Crash" и ее дополнение для преобразования двухмерных изображений (фотографий) "PC-RECT". Основные возможности программы "PC-Crash":

- динамическое моделирование движения и столкновений ТС (в виде трехмерной модели), при этом учитываются особенности технического состояния ТС, его загрузка, состояние поверхности дорожного покрытия;
- динамическое изображение реконструированного механизма ДТП в аксонометрической проекции, создание видеороликов с расположением камеры в произвольной точке пространства: на дороге, обочине, возвышении, двигающемся транспортном средстве, водителем месте в транспортном средстве;
- расчет скорости всех типов ТС по следу торможения, допустимой скорости по условиям видимости, остановочного пути при различных ДТП [5].

Программа PC-Crash используется частными фирмами во многих странах мира для независимых автотехнических экспертиз ДТП [6]. Важным достоинством программы является возможность определения скоростей движения ТС перед столкновением (на основании моделирования механизма столкновения) по известным исходным данным: месту столкновения, взаимному

положению ТС в момент столкновения, конечным положениям после столкновения и т.п. При моделировании движения ТС учитываются, в частности, следующие их параметры: техническое состояние, загрузка, особенности конструкции, модель шин каждого колеса, параметры работы подвески, распределение нагрузки в ТС, время срабатывания тормозной системы, а также характеристики работы двигателя и параметры трансмиссии (ее передаточные числа).

В PC-Crash разработан инструмент «оптимизатор столкновения» для минимизации времени реконструкции и возможных ошибок. Он автоматически изменяет выбранное число параметров столкновения, сравнивая полученные результаты моделирования для каждой комбинации параметров с фактическим ДТП. Для каждого моделирования оптимизатор столкновения вычисляет полную ошибку, основанную на отклонениях между фактическими положениями и углами транспортных средств и теоретическими, полученными в процессе моделирования. В каждом последующем моделировании оптимизатор изменяет величины с целью минимизации полной ошибки [6].

В таблице 1 и на рисунке 1 приведены исходные данные расчета скорости движения транспортного средства по длине следа торможения, выполненные программами экспресс-анализа ДТП (классические формулы расчета) и PC-Crash (учитываются дополнительные влияющие факторы).

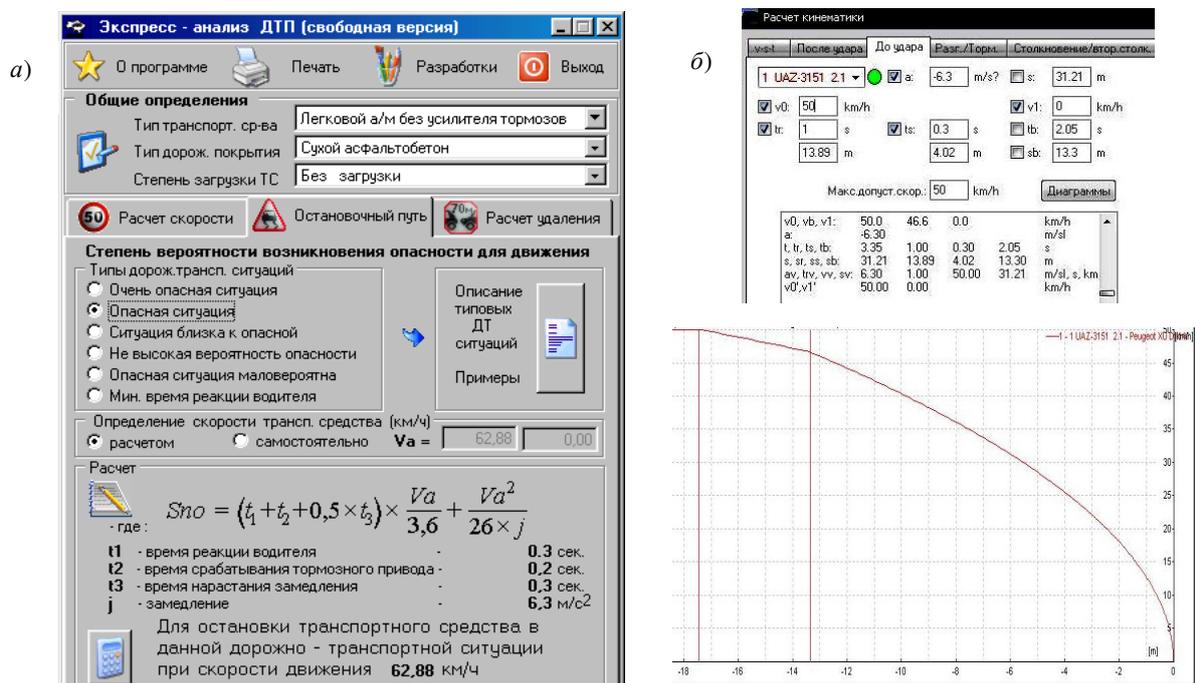


Рисунок 1 – Пример расчета движения транспортного средства по длине следа торможения в программах экспресс-анализа ДТП (а) и PC-Crash (б)

На основании результатов однофакторного дисперсионного анализа (таблица 2) процедура статистической значимости отличий между результатами программ экспресс-анализа ДТП и PC-Crash не выявила существенных отличий. Поэтому обоснованным видится

расчет скорости движения транспортного средства по длине следа торможения по формуле

$$v_a = 1,8 t_3 a_3 + \sqrt{26 a_3 S_T},$$

где t_3 – время замедления; a_3 – замедление; S_T – длина следов торможения.

Таблица 1 – Расчет скорости ТС по длине следа торможения

Длина следа торможения	Программа экспресс-анализа ДТП	PC-Crash
10	43,87	40,41
11	45,85	42,33
12	47,74	44,26
13	49,55	46,08
14	51,29	47,77
15	52,97	49,47
16	54,60	51,07
17	56,17	52,65
18	57,70	54,22
19	59,19	55,71
20	60,64	57,19
23	64,78	61,27
25	67,39	63,88
28	71,12	67,22
30	73,50	70,00
33	76,92	73,41
35	79,12	75,56
38	82,30	78,74
40	84,35	80,78

а)

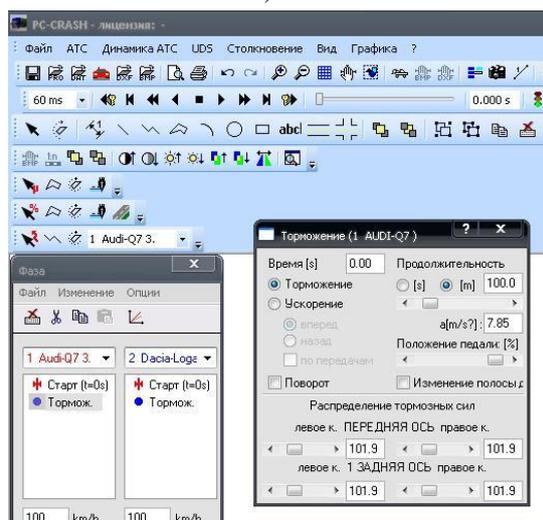


Рисунок 2 – Параметры фазы торможения двух разных автомобилей (а) и результаты моделирования тормозного пути в PC-Crash (б)

а)

Автомобиль	100 км/ч: холодные/перегрев	130 км/ч: холодные/перегрев	μ-Split: тормозной путь/стабильность торможения
Audi Q7	37,1/39,4	63,4/69,1	99,9/удов.
BMW 550i	36,7/37,1	62,5/63,5	98,1/хорошо
Dacia Logan	41,4/42,1	71,3/77,4	109,8/плохо
Mercedes Sprinter	42,6/43,6	70,9/75,2	122,2/удов.
Opel Astra	39,1/40,4	67,3/76,4	115,2/плохо
Peugeot 207	38,3/40,5	66,0/74,3	124,0/плохо
VW Caddy	41,1/44,5	70,6/75,9	112,7/хорошо

Рисунок 3 – Пример результатов испытаний (а) и моделирования в PC-Crash (б) тормозного пути

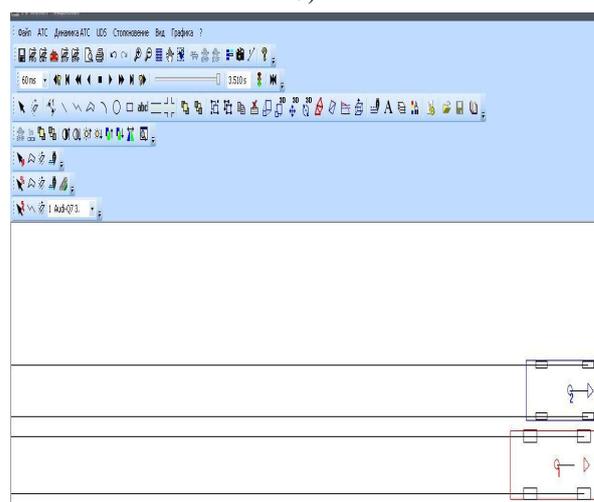
Таблица 2 – Результаты статистического анализа в программе Excel для значимости отличий между результатами программ экспресс-анализа ДТП и PC-Crash

Источник вариации	SS	MS	p	F критическое
Между группами	118,2	118,2	0,725812	0,4
Внутри групп	5864,5	162,9		
Итого	5982,8			

В ходе исследования результатов моделирования применяемого программного обеспечения был выявлен ряд недостатков, подлежащих доработке. Одним из них является отсутствие влияния таких существенных факторов, как масса автомобиля и состояние его тормозной системы на тормозной путь. На рисунке 2 приведены результаты тестов для Dacia Logan 1.6 HPI и Audi Q7 3 tdi для начальной скорости торможения 100 км/ч и положения педали тормоза на 100 %. Результаты испытаний и моделирования тормозного пути без внесения детальных сведений по типу шин, тормозной динамике и т.д. для разных автомобилей одинаковые, что неприемлемо.

Так как программа позволяет подобрать параметры резины на различные оси, для которых результаты моделирования тормозного пути близки заявленным при испытаниях, то на рисунке 3 результаты для разных автомобилей различны (данные натурных испытаний проводились специализированной компанией, а результаты представлены на Интернет-ресурсах).

б)



б)

	1-AUDI-Q7	2-BMW-548i	3-DACIA-LO	4-MERCEDES	5-OPEL-AST	6-PEUGEOT-	7-VW-CADDY
Время (s):	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14
Расстояние (m):	38.81	38.86	42.00	43.17	39.69	39.31	43.16
Скорость (km/h):	0.45	0.38	0.35	0.44	0.29	0.33	0.39

Наибольшие расхождения результатов испытаний и моделирования тормозного пути по абсолютной величине соответствуют автомобилю VW Caddy (2,06 м, относительная погрешность 5 %), затем Mercedes Sprinter (1,96 м, относительная погрешность 5,3 %), наименьшие – Dacia Logan (0,1 м, относительная погрешность 0,24 %), причем программа моделирования PC-Crash не учитывает температуру шин, которая влияет на тормозной путь.

На основании результатов однофакторного дисперсионного анализа по итогам испытаний и моделирования тормозного пути для холодных ($p = 0,312$) и перегретых ($p = 0,75$) шин нельзя однозначно по имеющейся выборке утверждать о значимости отличий в результатах.

Для дальнейшего использования результатов моделирования дорожно-транспортных ситуаций в реальном поведении транспортных средств приведем статистическую проверку адекватности на примере тормозных путей. Для адекватности математической модели реальному поведению оригинала рассогласование параметров должно удовлетворять двум критериям: *точности* и *непротиворечивости*, предварительно задав допустимую погрешность $\pm\delta$, уровни значимости α и доверительную вероятность γ , исходя из целей исследования.

Используем данные испытаний тормозных путей автомобилей, часть которых представлена на рисунке 3, и определим рассогласования результатов вычислительного и натурного экспериментов в тех же условиях: $\Delta u = u_{\text{модели}} - U_{\text{оригинала}}$.

1 Определим статистические оценки параметров распределения случайной величины Δu : выборочное среднее для холодных шин $a_{\text{х. ш}} = 1,214$ м, для перегретых – $a_{\text{п. ш}} = -0,364$ м и среднее квадратическое отклонение $\sigma_{\text{х. ш}} = 0,676$ м, $\sigma_{\text{п. ш}} = 0,84$ м.

2 Для проверки *непротиворечивости* выполним проверку распределения рассогласований нормальному закону распределения. Одним из наиболее широко используемых на практике критериев согласия является критерий χ^2 Пирсона. Применение критерия χ^2 основано на сопоставлении эмпирических m_i и теоретических np_i (вычисленных в предположении справедливости проверяемой гипотезы) частот попадания значений исследуемой случайной величины в рассматриваемые частичные разряды. В качестве меры расхождения эмпирического и теоретического распределений используется статистика:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - np_i)^2}{np_i},$$

которая при $n \rightarrow \infty$ независимо от вида предполагаемого распределения стремится к распределению χ^2 с $\nu = k - r - 1$ степенями свободы (здесь k – число разрядов разбиения, r – число параметров теоретического распределения, оцениваемых по выборке).

Необходимыми условиями применения критерия χ^2 являются достаточно большой объем выборки ($n \geq 30$) и отсутствие в теоретическом распределении разрядов с небольшим ($np_i < 5$) числом наблюдений.

По таблице критических точек распределения χ^2 определяется критическое значение $\chi_{\alpha, \nu}^2$, соответствующее заданному уровню значимости α и числу степеней свободы $\nu = k - r - 1$.

Если расчётное значение критерия попадает в критическую область, т. е. $\hat{\chi}^2 > \chi_{\alpha, \nu}^2$, то проверяемая гипотеза отвергается. В случаях, когда наблюдаемое значение $\hat{\chi}^2$ не превышает критического ($\hat{\chi}^2 \leq \chi_{\alpha, \nu}^2$), считают, что выдвинутая гипотеза не противоречит опытным данным. Подчеркнем, что полученный результат свидетельствует лишь о приемлемом согласовании проверяемой гипотезы с имеющимися выборочными данными и в общем случае не является доказательством истинности этой гипотезы.

В нашем исследовании $\hat{\chi}^2 > \chi_{\alpha=0,05, \nu=4}^2 = 9,488$ для холодных и перегретых шин, значит, данный расчет отвергает проверяемую гипотезу о нормальном законе распределения рассогласования результатов вычислительного и натурного экспериментов при $\alpha = 0,05$. На этом этапе можно прекратить статистическую проверку адекватности либо продолжить накапливать результаты, либо изменить α , если такая вероятность ошибки удовлетворит исследователя.

3 Для оценки систематической ошибки проверяется гипотеза о равенстве нулю математического ожидания ($a = 0$) рассогласования Δu . В предположении, что исследуемая величина имеет нормальный закон распределения (в нашем случае эта гипотеза не подтверждается при $\alpha = 0,05$), проверим гипотезу о равенстве математического ожидания числу $a = 0$ при альтернативной гипотезе $H_a: H_0: M[x] = 0; H_a: M[x] \neq 0$.

Так как точное значение среднееквадратического отклонения неизвестно и альтернативная гипотеза $H_a: a \neq a_0$, воспользуемся t -критерием с правосторонней критической областью. Вычислим значение t -критерия. В таблице квантилей распределения Стьюдента по уровню значимости $\alpha = 0,05$ и числу степеней свободы $\nu = n - 1 = 13$ находим $t_{\frac{\alpha}{2}, \nu-1} = t_{0,025; 13} = 2,16$. Так как

$|t| > t_{0,025; 13}$, то имеющиеся данные дают основания для отклонения гипотезы о равенстве математических ожиданий для холодных и перегретых шин.

4 Для оценки *точности* математической модели строится доверительный интервал для математического ожидания рассогласования при заданной доверительной вероятности γ (обычно 0,8; 0,9; 0,99 или 0,999). Если радиус доверительного интервала не превосходит допустимой погрешности (задает исследователь), то математическую модель можно считать достаточно точной по отношению к оригиналу. Если по п. 3 можно считать математическую модель не противоречащей оригиналу, а по п. 4 и достаточно точной, то результаты расчетов адекватны реальному поведению оригинала (для исходной выборки не все условия выполнены).

При этом следует отметить верифицированность зависимости тренда моделирования тормозного пути от температуры шин с результатами испытаний; и очевидный вывод, что при правильных начальных данных и возможности их внесения в программу можно получить очень близкие результаты в модели (для некоторых экспертов даже полученные результаты перегретых шин в некоторых случаях приемлемы, так как выборочное среднее для них $a_{\text{п. ш}} = -0,364$ м и среднее квадратическое отклонение $\sigma_{\text{п. ш}} = 0,84$ м).

На основании проведенного в данной статье анализа использования программ моделирования ДТП можно сказать, что в каждом конкретном случае совокупность необходимых исходных данных для применения программ различна, зависит от конкретных обстоятельств рассматриваемого ДТП и целей исследования. Недостаточность исходных данных является основной причиной, препятствующей использованию указанных программ в каждой экспертизе механизма ДТП.

Список литературы

1 **Иларионов, В. А.** Экспертиза дорожно-транспортных происшествий : учеб. для вузов / В. А. Иларионов. – М. : Транспорт, 1989. – 255 с.

2 Применение дифференцированных значений времени реакции водителя в экспертной практике : метод. рекомендации. – Мн. : М-во юстиции, НИИ проблем криминологии,

Получено 01.06.2014

S. A. Azemsha, V. N. Galushko, S. V. Skirkovski. Methods of validation of the results of traffic accidents simulation.

The analysis of capabilities of simulation programs for traffic accidents is given in the article. The statistical analysis of differences between results received from various programs is realized and model verification is done. The program algorithm of check on results received according to the simulation is proposed.

криминалистики и судебных экспертиз», М-во внутренних дел, Гос. экспертно-криминалистический центр, 1997. – 15 с.

3 Применение в экспертной практике экспериментально-расчетных значений параметров торможения автотранспортных средств в разных массовых состояниях на дорогах с различными сцепными качествами : метод. рекомендации. – Мн.: М-во юстиции, НИИ проблем криминологии, криминалистики и судебных экспертиз, М-во внутренних дел, Гос. экспертно-криминалистический центр, 1995. – 12 с.

4 Экспертное исследование выбора безопасного бокового интервала : метод. рекомендации. – Мн. : М-во юстиции, НИИ проблем криминологии, криминалистики и судебных экспертиз, М-во внутренних дел, Гос. экспертно-криминалистический центр, 1997. – 11 с.

5 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://avtotrasolog.ru/component/option.com_frontpage/Itemid.1. – Дата доступа: 2.03.2014.

6 **Cliff, W. E.** Реконструкция двадцати установленных столкновений с помощью оптимизатора PC-Crash / W. E. Cliff // MacInnis Engineering Associates (MEA) Richmond, BC, Canada. – 2000.