

УДК 629.113.011

Е.В. Яковенко**А.В. Бабкин****А.А. Ветрогон, доцент, канд. техн. наук.***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053***ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ДВУХ АВТОМОБИЛЕЙ**

Рассматриваются пути совершенствования методики определения скоростей транспортных средств перед столкновением, основанные на законе сохранения импульса и законе сохранения энергии. Получены аналитические решения задачи.

Ключевые слова: столкновение двух автомобилей, закон сохранения импульса, закон сохранения энергии, погрешность экспертизы.

Постановка проблемы. Оценочный расчет скорости движения автомобилей перед столкновением можно произвести как на основании теоремы о сохранении количества движения, так и с помощью законов сохранения импульса и кинетической энергии. При этом ряд величин, входящих в систему уравнений движения, может быть определен с некоторой погрешностью, что сказывается на точности результатов экспертизы. При этом использование системы уравнений, учитывающей только закон сохранения импульса, не дает информации о правильности полученных результатов.

Цель и постановка задачи. Целью настоящей работы является совершенствование методики определения скоростей транспортных средств перед столкновением, основанной на законе сохранения импульса и законе сохранения энергии, а также обоснование преимуществ использования данной методики.

Для достижения этой цели необходимо:

- произвести сравнительный анализ погрешностей методик;
- проанализировать решения систем уравнений в локальных системах координат;
- разработать методику поиска решения для системы уравнений, учитывающей как закон сохранения импульса, так и закон сохранения энергии.

Анализ публикаций. В работе [1] приведена методика определения начальной скорости автомобиля до столкновения с другим транспортным средством, учитывающий как закон сохранения импульса, так и закон сохранения энергии. Основной проблемой использования подобной методики является сложность определения части кинетической энергии, которая переходит в другие виды энергии (энергию деформации и разрушения элементов конструкций). Методика определения энергии деформации и разрушения элементов конструкций автомобиля показана в работах [2-4] и многих других.

Материалы и результаты исследования. Система уравнений учитывающая как закон сохранения импульса, так и закон сохранения энергии, имеет следующий вид

$$\begin{cases} 0,5(m_1V_1^2 + m_2V_2^2) = \\ = E_{yup1} + E_{nl1} + E_{yup2} + E_{nl2} + 0,5(m_1U_1^2 + m_2U_2^2 + I_1w_1^2 + I_2w_2^2) \\ m_1V_1(\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1) + m_2V_2(\sin \beta_1 + \cos \beta_1) = \\ = m_1U_1(\sin \alpha_2 + \cos \alpha_2) + m_2U_2(\sin \beta_2 + \cos \beta_2), \end{cases} \quad (1)$$

где m_1 – масса ТС1; m_2 – масса ТС2; α_1 – угол предконтактного движения ТС1; β_1 – угол постконтактного движения ТС1; α_2 – угол предконтактного движения ТС2; β_2 – угол постконтактного движения ТС2; I_1, I_2 – моменты инерции вращения ТС1 и ТС2; w_1, w_2 – угловые скорости ТС1 и ТС2 в конце столкновения; $E_{yup1}, E_{yup2}, E_{nl1}, E_{nl2}$ – энергия упругой и пластической деформации ТС1 и ТС2 соответственно.

Решение системы сводится к нахождению корней квадратного уравнения вида

$$aV_1^2 + bV_1 + c = 0. \quad (2)$$

Коэффициенты квадратного уравнения равны соответственно

$$a = 0,5m_1 + 0,5 \frac{1}{m_2} \left(\frac{m_1(\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1)}{\sin \beta_1 + \cos \beta_1} \right)^2;$$

$$b = - \frac{m_1(\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1)}{m_2(\sin \beta_1 + \cos \beta_1)^2} (m_1 U_1 (\sin \alpha_2 + \cos \alpha_2) + m_2 U_2 (\sin \beta_2 + \cos \beta_2));$$

$$c = 0,5 \frac{1}{m_2} \left(\frac{m_1 U_1 (\sin \alpha_2 + \cos \alpha_2) + m_2 U_2 (\sin \beta_2 + \cos \beta_2)}{(\sin \beta_1 + \cos \beta_1)} \right)^2 - (E_{yup1} + E_{nl1} + E_{yup2} + E_{nl2}) - 0,5(m_1 U_1^2 + m_2 U_2^2 + I_1 w_1^2 + I_2 w_2^2).$$

Для того, чтобы обосновать преимущества энергетического подхода в экспертизе столкновения двух автомобилей, по сравнению с использованием закона сохранения импульса, воспользуемся результатами численного эксперимента, описанного в работе [5]. Результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты численного эксперимента

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
m_1 , кг	25	30	30	25	20	25	25	25
m_2 , кг	30	25	25	25	30	25	30	25
V_1 , м/с	3,00	3,00	2,00	2,00	3,50	3,50	2,50	2,50
V_2 , м/с	2,00	2,00	3,00	3,00	2,00	2,50	2,00	3,00
U_1 , м/с	1,23	1,41	0,95	1,04	1,57	0,84	2,45	2,58
U_2 , м/с	1,26	1,43	1,60	1,59	1,60	1,21	0,94	2,76
α_1 , град	75,0	75,0	75,0	75,0	60,0	60,0	90,0	74,9
α_2 , град	25,0	40,7	6,0	-5,5	14,1	6,9	56,3	60,6
β_2 , град	-45,0	-45,0	-45,0	-45,0	-45,0	-85,0	0,0	45,0
β_2 , град	26,7	42,1	2,8	-3,2	12,6	21,3	23,6	54,8
w_1 , с ⁻¹	5,93	5,93	6,91	6,59	4,99	5,18	6,71	3,36
w_2 , с ⁻¹	-5,43	-5,40	-3,17	-2,80	-6,86	-2,79	-2,35	-2,81
I_1 , кг·м ²	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
I_2 , кг·м ²	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
E_{nl1} , Дж	44,2	44,3	77,7	72,6	42,8	76,6	14,3	9,1
E_{nl2} , Дж	52,9	52,8	22,7	20,5	45,4	82,5	18,8	0,0
E_{yup1} , Дж	8,04	8,02	8,74	8,20	6,17	15,10	1,05	0,59
E_{yup2} , Дж	8,54	8,62	2,53	2,30	6,62	21,00	1,61	0,07

По данным таблицы 1 находим скорости V_1 и V_2 , решая две системы уравнений:

- учитывающую только закон сохранения импульса;
- учитывающую как закон сохранения импульса, так и закон сохранения энергии.

При этом варьируем углы предконтактного и послеконтактного перемещения в пределах $\pm 5^\circ$ с шагом 1° , скорости автомобилей после удара в пределах ± 5 с шагом 1% , а также энергию, затраченную на деформацию в пределах ± 10 с шагом 1% .

Анализируя полученное множество решений (около 40 миллионов) ищем минимальное и максимальное значения скорости V_1 и V_2 . Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты сравнения погрешности методик

№ опыта		Методика	V_{1min}	V_{1max}	V_{2min}	V_{2max}
1	значение, м/с	энергия	2,60	3,33	1,55	2,39
		импульс	2,42	3,71	1,46	2,69
	погрешность, %	энергия	-13,3%	11,1%	-22,5%	19,6%
		импульс	-19,2%	23,7%	-27,2%	34,3%
2	значение, м/с	энергия	2,67	3,28	1,49	2,44
		импульс	2,56	3,57	1,27	2,95
	погрешность, %	энергия	-10,9%	9,2%	-25,5%	22,0%
		импульс	-14,8%	18,9%	-36,7%	47,7%
3	значение, м/с	энергия	1,59	2,36	2,57	3,35
		импульс	1,46	2,69	2,42	3,71
	погрешность, %	энергия	-20,7%	18,2%	-14,2%	11,8%
		импульс	-27,2%	34,3%	-19,4%	23,6%
4	значение, м/с	энергия	1,52	2,42	2,57	3,35
		импульс	1,36	2,80	2,48	3,60
	погрешность, %	энергия	-23,8%	20,8%	-14,2%	11,7%
		импульс	-31,8%	39,8%	-17,2%	20,1%
5	значение, м/с	энергия	2,94	3,96	1,46	2,48
		импульс	2,82	4,27	1,51	2,57
	погрешность, %	энергия	-16,0%	13,1%	-27,2%	23,9%
		импульс	-19,4%	22,0%	-24,4%	28,3%
6	значение, м/с	энергия	2,96	3,96	1,65	3,19
		импульс	2,68	4,97	1,55	4,12
	погрешность, %	энергия	-15,4%	13,1%	-33,9%	27,4%
		импульс	-23,5%	42,0%	-37,9%	64,8%
7	значение, м/с	энергия	1,94	2,98	1,46	2,47
		импульс	1,93	3,06	1,52	2,48
	погрешность, %	энергия	-22,3%	19,0%	-27,1%	23,7%
		импульс	-22,6%	22,3%	-23,8%	23,9%
8	значение, м/с	энергия	0,25	3,97	0,98	4,11
		импульс	0,46	4,32	1,29	5,15
	погрешность, %	энергия	-90,0%	59,0%	-67,2%	37,0%
		импульс	-81,6%	72,7%	-57,0%	71,7%

Из таблицы 2 видно, что в большинстве случаев методика, учитывающая только закон сохранения импульса может дать гораздо большую погрешность, чем методика учитывающую как закон сохранения импульса, так и закон сохранения энергии.

Также необходимо отметить некоторые особенности решения системы уравнений (1):

- система имеет два решения
- углы предконтактного и послеконтактного перемещения, скорости автомобилей после удара, а также энергия, затраченную на деформацию могут быть определены с некоторой погрешностью.

С учетом того, что мы решаем двухмерную задачу, поворот системы координат дает нам следующие результаты:

- если углы предконтактного и послеконтактного перемещения, скорости автомобилей после удара, а также энергия, затраченную на деформацию определены точно или с минимальной погрешностью, то решение не зависит от угла поворота системы координат. В зависимости от угла поворота системы координат искомым решением может быть одна или другая пара корней системы уравнений (см. горизонтальные участки графиков на рисунке 1).

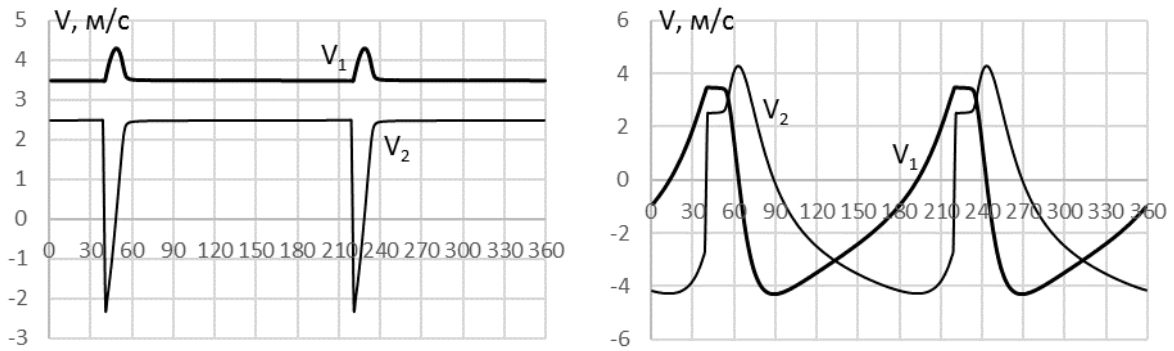


Рисунок 1 – Решение системы уравнений в локальных системах координат (все величины, входящие в систему определены с минимальной погрешностью)

– если углы предконтактного и послеконтактного перемещения, скорости автомобилей после удара, а также энергия, затраченную на деформацию, определены со значительной погрешностью, то решение сильно зависит от угла поворота системы координат (см. рисунок 2).

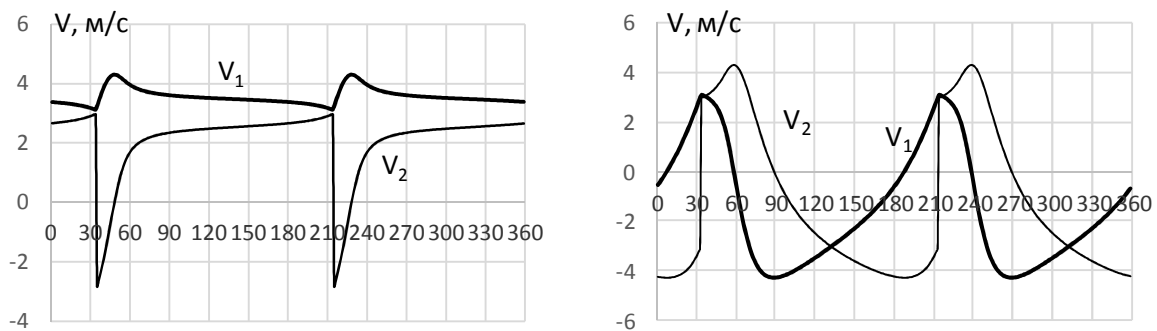


Рисунок 2 – Решение системы уравнений в локальных системах координат (все величины, входящие в систему определены со значительной погрешностью)

В ряде случаев возможны варианты когда есть участки А и В, в которых корни могут представлять собой комплексные числа (рисунок 3)

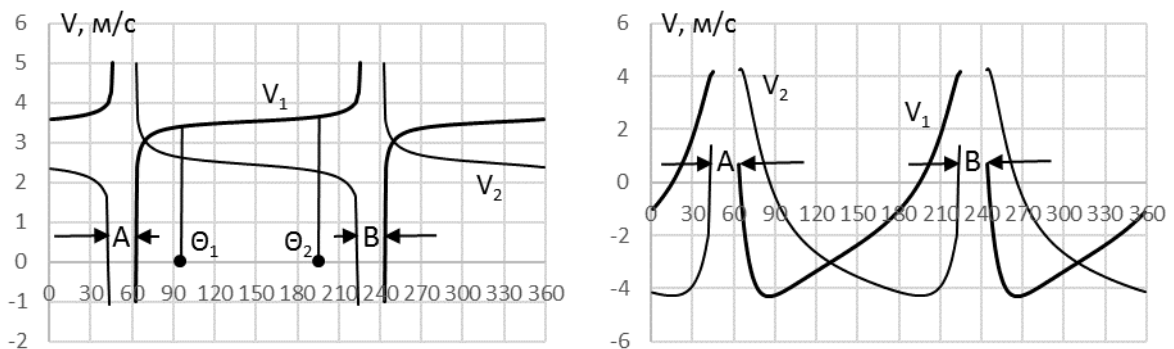


Рисунок 3 – Решение системы уравнений в локальных системах координат (все величины, входящие в систему определены со значительной погрешностью, есть участки А и В, в которых корни представляют собой комплексные числа)

С учетом особенностей решения системы уравнений можно сформулировать общую последовательность действий при проведении экспертизы столкновения двух автомобилей с помощью системы уравнений (1):

1. Производим анализ множества решений системы путем поворота системы координат на угол от 0 до 360 градусов с заданным шагом.
2. Выявляем участки А и В (рисунок 3), в которых корни представляют или могут представлять собой комплексные числа.

3. Приймаємо два значення кутів повороту системи координат Θ_1 і Θ_2 , лежачі між ділянками А і В (рисунок 3). Значення повинні знаходитися як можна далі од одного.

4. Варіюючи кути передконтактного і післяконтактного переміщення, швидкості автомобілів після удару, а також енергію, витрачену на деформацію, в заданому діапазоні з заданим кроком розв'язуємо систему рівнянь поворачивая систему координат на кути, прийняті в п. 3.

5. Аналізуючи отримане множинство рішень іщем такі значення кутів передконтактного і післяконтактного переміщення, швидкостей автомобілів після удару, і енергії, витраченої на деформацію, при яких різниця коренів рівнянь в різних системах координат намагається к 0 – т.е. іщем таке рішення, яке не залежить від кута повороту системи координат.

Використовуючи розроблену методику, для всіх 8 спроб, наведених в таблиці 1, виробимо пошук рішення. Помилки визначення початкових величин підбираємо випадковим чином, такими, щоб помилки визначення швидкостей до зіткнення були не менше 15-20%. В результаті пошуку рішення помилка знайденого рішення не перевищала 6%, що пояснюється достатньо великим кроком, взятим при варіюванні початкових величин, що, в свою чергу, пояснюється значущим машинним часом, витраченим на пошук рішення.

Висновки. Розроблена методика дозволяє підвищити точність автотехнічної експертизи, але має наступні недоліки:

- необхідність трудомісткої процедури визначення енергії деформації кузова автомобіля;
- значущий машинний час, витрачений на пошук рішення при зменшенні кроку варіювання початкових величин.

Напрямки подальших досліджень. Точність визначення швидкостей можна підвищити, більш точно визначаючи початкові величини, зокрема, енергію, витрачену на деформацію. Т. е. одним з напрямків подальших досліджень є вдосконалення методик визначення енергії деформації і руйнування елементів конструкцій автомобіля.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Байков В.П. Ударне взаємодія транспортних засобів при їх зіткненні // Безпека дорожнього руху України / В.П. Байков, В.Б. Киселев. – 2000. – №1(6). – С. 81-96.
2. Ксенофонтова В.А. Дослідження процесу деформації кузова легкового автомобіля при наїзді на нерухоме перешкода / В.А. Ксенофонтова, А.В. Бабкін, В.Н. Торлін // Збірник наукових праць ХГАДТУ «Автомобільний транспорт». – Харків: РІО ХГАДТУ. – 2001. – №7-8. – С. 36-38.
3. Торлін В.Н. Кінцевоелементний аналіз енергопоглинаючої здатності кузова автомобіля / В.Н. Торлін, А.А. Ветрогон, Е.А. Яковенко // Вісник Східноукраїнського національного університету ім.В.Даля. – 2006. – №7(101). – С.115-119.
4. Огородников В.А. Енергія. Деформація. Руйнування. (Задачі автотехнічної експертизи) / В.А. Огородников, В.Б. Киселев, І.О. Сивак. – Вінн.: Універсум. 2005. – 204с.
5. Яковенко Е.В. Оцінка помилки визначення швидкості при зіткненні двох автомобілів // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт. Зб. наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2012. – Вип.135. – С. 176-179

Поступила в редакцію 26.05.2013 г.

Яковенко Є.В., Бабкін О.В., Ветрогон О.А. Підвищення точності визначення швидкості при зіткненні двох автомобілів

Розглядаються шляхи вдосконалення методики визначення швидкостей транспортних засобів перед зіткненням, засновані на законі збереження імпульсу й законі збереження енергії. Отримані аналітичні рішення завдання.

Ключові слова: зіткнення двох автомобілів, закон збереження імпульсу, закон збереження енергії, помилковість експертизи.

Jakovenko E.V., Babkin A.V., Vetrogon A.A. Increasing the accuracy of determining the rate of the collision of two cars

We consider ways of improving the methodology for determining the speed of the vehicle prior to the collision, based on the law of conservation of momentum and energy conservation law. The analytical solution of the problem.

Keywords: collision of two vehicles, the law of conservation of momentum, conservation of energy, the error assessment.