

В. А. Огородников¹
Т. Ф. Архипова¹
М. В. Кожушаный¹

ЭНЕРГИЯ ДЕФОРМАЦИЙ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В УСЛОВИЯХ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ

¹Винницкий национальный технический университет

В статье излагается метод оценки энергии деформаций автотранспортных средств в условиях дорожно-транспортных происшествий (ДТП). Интенсивность эксплуатации автотранспортных средств, а также рост их числа сопровождается многочисленными ДТП. В большинстве случаев они вызваны нарушением скоростных режимов. В связи с этим актуальными являются методы, способные оценивать энергию деформации, затраченную при ударах автотранспортных средств. Определение энергии деформации и разрушения элементов конструкции транспортных средств важно для определения скорости их движения перед столкновением. В настоящей работе решена задача оценки энергии перед ударом на основе натурных испытаний. На примере автотехнической экспертизы получены исходные данные для определения величин скоростей автомобилей, а также их энергии деформаций, поглощенной при ударе. Сущность модели оценки энергии деформаций заключается в том, что любой неупругий удар между транспортными средствами приводится к эквивалентному упругому удару, при котором учитываются суммарные энергетические затраты, включающие в себя работу деформации, работу сил сопротивления перемещениям транспортных средств в процессе отбрасывания после удара и кинетических потерь при ударе. Подтверждена достоверность разработанного метода оценки энергии деформаций автотранспортных средств в условиях ДТП. На основе натурных испытаний энергия деформации определена методом энергетического эквивалента и методом твердости. Показана удовлетворительная сходимость результатов расчета энергии деформаций двумя методами. Полученные результаты подтверждают надежность определения скорости, рассчитанной двумя методами, а также с помощью камеры видеонаблюдения. Метод твердости, предложенный в качестве альтернативы методу энергетического эквивалента, позволяет рассчитывать энергию в условиях ДТП любых транспортных средств, включая автомобили, "crash-tests"-испытания для которых не проводятся.

Ключевые слова: энергия деформации, автотранспортные средства, дорожно-транспортные происшествия, технологическое наследство, метод твердости, метод энергетического эквивалента.

Введение

Для определения величин скоростей автомобилей при их столкновении разработана модель, изложенная в работе [1]. Сущность модели заключается в том, что любой неупругий удар между транспортными средствами приводится к эквивалентному упругому удару, при котором учитываются суммарные энергетические затраты, включающие в себя работу деформации, работу сил сопротивления перемещениям транспортных средств в процессе отбрасывания после удара и кинетических потерь при ударе.

Главный недостаток указанной модели заключается в том, что используемые экспериментальные данные являются результатом «crash-tests», т.е. испытания разрушением. Это – дорогостоящие, малоинформативные испытания, проводимые в основном для легковых автомобилей.

Начиная с 2003 года, появились работы [2–5], в которых разработан экспериментально-расчетный способ идентификации поврежденных элементов конструкций транспортных средств измерением твердости поврежденного металла, позволяющий эффективно определить работу деформаций от этих повреждений.

Применение этой методики позволяет с достаточно высокой степенью точности [6] определить работу деформации поврежденных транспортных средств и тем самым устранить недостаток разработанной ранее модели [1].

Определение энергии деформации и разрушения элементов конструкции транспортных средств важно не только для определения скорости их движения перед столкновением. При конструировании и изготовлении современных автомобилей назрела необходимость создания безопасных конструкций,

прочность и жесткость которых управляема, прогнозируема и может быть обеспечена параметрами технологии обработки металлов давлением, т. е. технологическим наследством [5].

Ряд зарубежных фирм, например, германская фирма «MATFEM» (Германия, Мюнхен) разрабатывает программное обеспечение аварийного разрушения транспортных средств с целью прогнозирования, при известной скорости движения перед ударом, ожидаемых повреждений.

Результаты исследования

Развивая эти подходы, в настоящей работе решается задача оценки энергии перед ударом на основе натурных испытаний.

На примере автотехнической экспертизы, рассмотренном ниже, получены исходные данные для определения величин скоростей автомобилей, а также их энергии деформаций, поглощенной при ударе*.

Согласно протоколу, составленному работниками дорожно-патрульной службы, водитель автомобиля «Hyundai Accent» (в дальнейшем – автомобиль 1) выехал на полосу встречного движения, что привело к столкновению с автомобилем BMW (в дальнейшем – автомобиль 2), в результате чего оба автомобиля повреждены.

С целью оценки энергии деформации автомобилей 1 и 2 исследованы объемы повреждений элементов конструкций автомобилей. Эти элементы фотографировали, а также измеряли твердость в узлах предварительно нанесенной делительной сетки базой 50 мм с помощью переносного твердомера «Темп-3».

Следуя работам [2, 3], затраты на работу пластической деформации и разрушение элементов конструкций автомобилей определяли по формуле:

$$W_{y\partial} = W_0 \exp \frac{\ln k_H / D}{C}, \quad (1)$$

где $W_{y\partial}$ – удельная потенциальная энергия в Дж/см³; $k_H = \frac{(H_T)_i}{(H_T)_0}$; $W_0 = \frac{\sigma_{0.2}^2}{2E}$ – упругая удельная

потенциальная энергия в Дж/см³; $\sigma_{0.2}$ – предел текучести материала в Мпа; E – модуль упругости 1 рода в Мпа; D и C в формуле (1) – коэффициенты аппроксимации кривой $k_{HT}=f(k_W)$.

Величину $W_{y\partial}$ рассчитывали также с помощью формулы

$$W_{y\partial} = \int_0^e \sigma_u d\varepsilon_u, \quad (2)$$

где σ_u – интенсивность напряжений в Мпа; ε_u – интенсивность деформаций (безразмерная величина).

Кривую $\sigma_u = f(\varepsilon_u)$ в теории пластичности называют единой кривой течения, которая не зависит от вида напряженного состояния. Её аппроксимировали уравнением:

$$\sigma_u = A\varepsilon_u^n, \quad (3)$$

Тогда, подставив (3) в (2), получим:

$$W_{y\partial} = A \int_0^e \varepsilon_u^n d\varepsilon_u = A \frac{\varepsilon_u^{n+1}}{n+1}, \quad (4)$$

где A, n – коэффициенты аппроксимации кривой течения имеющие физический смысл: A – напряжение текучести (в МПа) при интенсивности деформаций $\varepsilon_u=1$, n – степень деформации, соответствующая максимальной нагрузке на условной диаграмме растяжения.

Величину ε_u в формуле (4) определяли в каждом конкретном случае либо по твердости (по k_H), либо по диаграмме пластичности или устойчивости [7].

Данные о свойствах материалов получили путем идентификации свойств материала [7].

Согласно этой работе исходный предел текучести $\sigma_{0.2}$ (МПа) ставится в соответствие с исходной твердостью Hm_0 , следуя уравнению

$$\sigma_{0.2} = B + 0,33Hm_0, \quad (5)$$

где коэффициент B при измерении твердости твердомером "Темп-3" равен $B=176$.

Исходный предел текучести $\sigma_{0,2}$ ставится в соответствие с коэффициентом аппроксимации кривой течения материалов, следуя уравнению:

$$A=1000\exp(-0,0008 \sigma_{0,2}), \quad (6)$$

где A – коэффициент аппроксимации уравнения (3).

Коэффициент n в формуле (3) для различных материалов, применяемых в автомобилестроении, находится в пределах $0,35 \leq n \leq 0,1$ и может быть найден из уравнения:

$$N=0,35\exp(-0,0008A), \quad (7)$$

Полученное по формулам (1) и (2) значение $W_{y\delta}$ умножали на объем деформированного металла элемента конструкции, что позволило рассчитать величину полной потенциальной энергии деформации

$$W_{def}=\Sigma(W_{y\delta})_i \cdot V_i. \quad (8)$$

В результате суммирования энергетических затрат по всем перечисленным поврежденным элементам конструкций автомобилей 1 и 2 получены следующие значения энергии деформации: $W_{def1}=(35500..36000)$ Дж и $W_{def2}=(23500..23950)$ Дж соответственно.

Определяем также работу деформаций автомобилей 1 и 2 по константам энергоемкости в соответствии с [2]. Данные расчеты проводились на программном комплексе "КНИИСЭ АВТОФОРМУЛА" по утвержденной Минюстом Украины методике.

Автомобиль 1 имел одно глобальное повреждение, а именно (рис. 1–4):

- сбоку – шириной $\delta_{21} = 1,3$ м и высотой $\lambda_{21} = 0,15$ м в форме прямоугольника;

$$W_{def2} = 23,010 \text{ Дж}.$$

Автомобиль 2 имел одно глобальное повреждение, а именно:

- спереди – шириной $\delta_{11} = 1,49$ м и высотой $\lambda_{11} = 0,2$ м в форме прямоугольника;

$$W_{def1} = 35,164 \text{ Дж}.$$

В дальнейшем пользуемся этими значениями, поскольку они ниже значений, полученных методом твердости, следовательно, покажут нижний предел скоростей движения автомобилей.

Пусть в момент столкновения в точке А первичного контакта автомобиля 1 и 2 имели скорости движения, обозначенные векторами \vec{V}_1 и \vec{V}_2 , приложенными к их центрам масс C_1 и C_2 и направленными вдоль их продольных осей соответственно. Задаем прямоугольной системой координат XOY на плоскости проезжей части дороги, направив ось OX по вектору скорости \vec{V}_1 . Угол между продольными осями транспортных средств согласно совместным повреждениям, а также информации камеры наблюдения составляет $\alpha \approx 90^\circ$.

В процессе движения после столкновения центр масс C_2 автомобиля 2 переместился на расстояние $l_2 \approx 0,3$ м в состоянии заноса (согласно схеме ДТП), имея некоторую начальную скорость этого движения, обозначенную вектором \vec{U}_{20} , приложенным к центру масс C_2 и направленным вдоль оси OX .

В процессе движения после столкновения с автомобилем 2 в точке А, центр масс C_1 автомобиля 1 переместился на расстояние $l_1 \approx 1,9$ м (согласно схеме ДТП), имея некоторую начальную скорость этого движения, обозначенную вектором \vec{U}_{10} , приложенным к центру масс C_1 и направленным под углом $\beta_1 \approx 10^\circ$ к направлению вектора начального движения \vec{V}_1 . Транспортные средства заняли положения 1 и 2, зафиксированные в схеме ДТП, составленной работниками ГАИ (рис. 5).

Поскольку направления скоростей движения автомобилей в момент столкновения известны, определяем их величины в соответствии со способом, изложенным в [2].



Рис. 1. Лівая часть поврежденного автомобиля 1



Рис. 2. Передняя левая дверь автомобиля 1



Рис. 3. Переднее левое крыло автомобиля 1



Рис. 4. Передняя часть поврежденного автомобиля 1

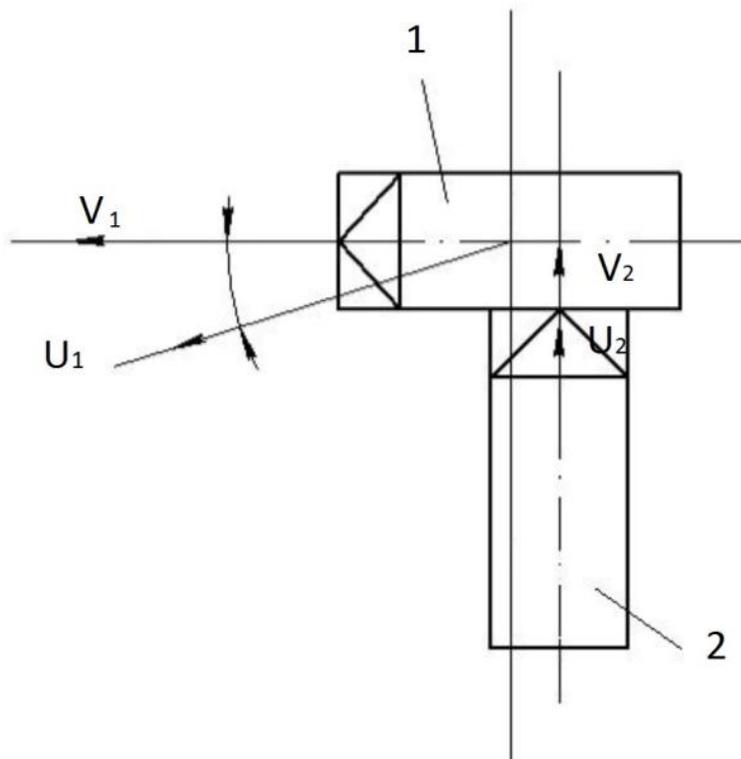


Рис. 5. Схема ДТП с участием автомобилей 1 и 2

Работы сил сопротивления перемещениям автомобилей 2 и 1 после удара определяются формулами:

$$W_{res1} = m_1 g l_1 f_1, \quad (9)$$

$$W_{res2} = m_2 g l_2 f_1', \quad (10)$$

где $m_1 = 1280 \text{ кг}$ – масса автомобиля 2 с учетом загрузки; $m_2 = 2100 \text{ кг}$ – масса автомобиля 1 с учетом загрузки; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; $f_1' = (0,56...0,64)$ – коэффициент трения бокового скольжения колес о сухую поверхность с асфальтобетонным покрытием [5].

Согласно расчету по формулам (9), (10) указанные параметры составляют:

$$W_{res1} = (13360..15269) \text{ Дж.}$$

$$W_{res2} = (3461..3955) \text{ Дж.}$$

Суммарные энергетические затраты на перемещения транспортных средств после столкновения, на их деформирование и разрушение отдельных деталей в процессе столкновения, определяются по формулам:

$$W_{\Sigma 1} = W_{res1} + W_{def1}; \quad (11)$$

$$W_{\Sigma 2} = W_{res2} + W_{def2}. \quad (12)$$

Подстановка численных значений параметров, входящих в эти формулы, дает

$$W_{\Sigma 1} = (48524..50433) \text{ Дж}, \quad W_{\Sigma 2} = (26471..26965) \text{ Дж};$$

Начальные скорости движения автомобилей при их перемещении после столкновения, эквивалентные суммарным энергетическим затратам, определяются по формулам:

$$U_{10} = \sqrt{\frac{2W_{\Sigma 1}}{m_1}}; \quad U_{20} = \sqrt{\frac{2W_{\Sigma 2}}{m_2}}. \quad (13)$$

Подстановка численных значений параметров, входящих в формулы (13), дает

$$U_{10} = (8,7..8,9) \text{ м/с}; \quad U_{20} = (5..5,1) \text{ м/с}.$$

На основании закона сохранения количества движения механической системы (состоящей из двух автомобилей) при ударе, эквивалентном абсолютному упругому удару, запишем векторное уравнение, связывающее скорости движения транспортных средств в моменты окончания и начала удара,

$$m_1 \vec{U}_{10} + m_2 \vec{U}_{20} = m_1 \vec{V}_1 + m_2 \vec{V}_2. \quad (14)$$

Проецируем это уравнение на ось ординат OY , и из полученного выражения находим формулу для определения скорости

$$V_2 = \frac{m_1 U_{10} \sin \beta_2}{m_2}. \quad (15)$$

Проецируем уравнение (14) на ось абсцисс OX , и из полученного выражения находим формулу для определения искомой скорости

$$V_1 = \frac{m_1 U_{10} \cos \beta_1 + m_2 U_{20}}{m_1}. \quad (16)$$

Подстановка численных значений параметров, входящих в эту формулу, дает

$$V_1 = (16,8..17,1) \text{ м/с} = (60,5..65,5) \text{ км/ч}.$$

Скорость автомобиля 1 в момент столкновения при ДТП составила $(60,5..65,5) \text{ км/ч}$.

Скорость автомобиля 1 до торможения определяется по формуле

$$V_{a1} = 1,8 (t_3 + t_{OT}) \cdot j + \sqrt{26 j \cdot S_{ю} + V^2}, \quad (17)$$

где t_3 – время нарастания замедления до максимального значения, $0,3 \text{ с}$; t_{OT} – время оттормаживания, $0,3 \text{ с}$; j – замедление автомобиля, $(6,9..7,5) \text{ м/с}^2$; $S_{ю}$ – длина тормозного пути, $16,3 \text{ м}$.

Подстановка численных значений в формулу (9) дает:

$$V_{a1} = (88..94,6) \text{ км/ч.}$$

Таким образом, учитывая характер движения автомобиля 1 в данной ситуации, а также повреждения транспортных средств, скорость его движения составляет $(88..94,6) \text{ км/ч}$.

Определим также скорость движения автомобиля 1, используя запись камеры видеонаблюдения. Автомобиль 1 появляется в зоне видимости камеры (на расстоянии около 152–160 м от места ДТП) в момент времени 23:24:59. Столкновение автомобилей происходит после второго кадра с момента времени 23:25:05, то есть по прошествии 6,2 с.

Скорость движения автомобиля 1 определяется соотношением пройденного пути ко времени, за которое автомобиль преодолел указанное расстояние и составляет $(152..160)/6,2 = (24,52..25,81) \text{ м/с} = (88,3..92,9) \text{ км/час}$, что практически совпадает со скоростью автомобиля с учетом повреждений и следовой информации.

Остановимся на результатах расчета энергии деформации, полученных методом твердости [2] и методом энергетического эквивалента [1].



Рис. 6. Появление в зоне видимости камеры автомобиля 1 (момент времени 23:24:59)



Рис. 7. Столкновение автомобилей (момент после второго кадра со времени 23:25:05)

По методу твердости энергия деформации

$$W_{def1} = 35,500...36,000 \text{ Дж}, W_{def2} = 23,500...23,950 \text{ Дж}.$$

По методу В. П. Байкова [1]

$$W_{def1} = 35,164 \text{ Дж}, W_{def2} = 23,010 \text{ Дж}.$$

Суммарное значение энергии деформации (11), (12) составляет соответственно по твердости

$$W_{\Sigma1} = 48,860...51,269 \text{ Дж}, W_{\Sigma2} = 26,961...27,905 \text{ Дж}.$$

По В. П. Байкову соответственно

$$W_{\Sigma 1} = 48,524...50,433 \text{ Дж}, W_{\Sigma 2} = 26,471...26,965 \text{ Дж}.$$

Скорость автомобиля 1 в момент потери курсовой устойчивости $V_{cp} = (88,85...92,05) = 90,45 \text{ км/час}$, по В. П. Байкову $V_{cp} = (88,58...91,47) = 90,025 \text{ км/час}$.

Полученные результаты подтверждают надежность определения скорости, определенной двумя методами, а также с помощью камеры видеонаблюдения.

Выводы

1. Разработан метод оценки энергии деформаций автотранспортных средств в условиях дорожно-транспортных происшествий. На основе натуральных испытаний энергия деформации может быть определена методом энергетического эквивалента и методом твердости. Показана удовлетворительная сходимость результатов расчета энергии деформаций двумя методами.

2. Метод твердости, предложенный в качестве альтернативы методу энергетического эквивалента, позволяет рассчитывать энергию в условиях ДТП любых транспортных средств, включая автомобили, "crash-tests" для которых не проводятся.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] В. П. Байков, В. Б. Киселев, К. А. Любарский, «Способ определения скоростей движения транспортных средств при столкновении», № 2275612, 01.03.2001.
- [2] В. А. Огородников, «Спосіб визначення швидкості транспортних засобів у момент зіткнення», Деклараційний патент, 14.04.2003.
- [3] В. А. Огородников, В. Б. Киселев, И. О. Сивак, «Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы)», Винница. Украина: ВНТУ, 2005.
- [4] Vitaliy A. Ogorodnikov, "The Physical Model of Motor Vehicle Destruction under Shock Loading for Analysis of Road Traffic Accident," in *Proc. SPIE 10808. Photonic Application in Astronomy, Communications Industry and High-Energy Physics Experiments*, 2018, pp. 186.
- [5] В. А. Огородников, Т. Ф. Архипова, В. А. Макаров, С. И. Сухоруков, «Штамповка листовых заготовок и создание безопасных конструкций», *Вісник машинобудування та транспорту*, Т. 10, № 2, с. 65–71. 2019. DOI <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2019-10-2-65-71>.
- [6] В. А. Огородников, М. И. Побережный, В. Б. Киселев, «Оценка точности определения энергии деформации и разрушения по распределению твердости в условиях чистого изгиба», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: тематичний збірник наукових праць*, Краматорськ, с. 24–32. 2005.

Огородников Виталий Антонович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов и прикладной механики, e-mail: v.a.ogorodnikow@gmail.com.

Архипова Татьяна Федоровна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры сопротивления материалов и прикладной механики, e-mail: tfarhipova@gmail.com.

Кожушаный Михаил Витальевич – студент.

Винницкий национальный технический университет, г. Винница.

V. Ogorodnikov¹
T. Arkhipova¹
M. Kozhushany¹

Motor vehicle deformation energy under conditions of road traffic accidents

¹Vinnitsia National Technical University

The article sets out a method for assessing the energy of deformations of vehicles in road traffic accidents (RTAs). The intensity of operation of vehicles, as well as the increase in their number is accompanied by numerous accidents. In most cases, accidents are caused by violation of speed limits. In this regard, relevant are methods capable of estimating the strain energy expended during impacts of motor vehicles. The determination of the energy of deformation and destruction of structural elements of vehicles is important for determining the speed of their movement before a collision. In addition, information on the energy used to deform vehicles in road accident conditions allows vehicle manufacturers to reduce the amount of expensive, uninformative, and extremely inflexible car tests. In the present work, the problem of estimating the energy before a shock based on full-scale tests is solved. By the example of automotive technical expertise, initial data were obtained to determine the values of the speeds of automobiles, as well as their deformation energy absorbed during impact.

The essence of the model for assessing the strain energy is that any inelastic shock between vehicles leads to an equivalent elastic shock, which takes into account the total energy consumption, which includes the work of deformation, the work of the forces of resistance to movement, vehicles in the process of rebound after impact and kinetic losses upon impact. The reliability of the developed method for assessing the energy of deformation of vehicles is confirmed in emergency conditions. Based on full-scale tests, the strain energy is determined by the energy equivalent method and the hardness method. Satisfactory convergence of the results of calculating the strain energy by two methods is shown. The results obtained confirm the reliability of determining the speed determined by two methods, as well as using a surveillance camera. The hardness method, proposed as an alternative

to the energy equivalent method, allows you to calculate the energy in the accident conditions of any vehicles, including cars for which crash tests are not carried out.

Key words: strain energy, vehicles, roadtraffic accidents, technological legacy, hardness method, energy equivalent method.

Ogorodnikov Vitalii – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of Department of Strength Materials and Applied Mechanics, e-mail: va.ogorodnikow@gmail.com.

Arkhypova Tetiana – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Strength Materials and Applied Mechanics, e-mail: tfarhipova@gmail.com.

Kozhushany Mike – student.

В. А. Огородніков¹

Т. Ф. Архіпова¹

М. В. Кожушаний¹

Енергія деформацій автотранспортних засобів в умовах дорожньо-транспортних пригод

¹Вінницький національний технічний університет

У статті викладено метод оцінки енергії деформацій автотранспортних засобів в умовах дорожньо-транспортних пригод (ДТП). Інтенсивність експлуатації автотранспортних засобів, а також зростання їх числа супроводжується численними ДТП. У більшості випадків ДТП викликані порушенням швидкісних режимів. У зв'язку з цим актуальними є методи, здатні оцінювати енергію деформації, витрачену при ударах автотранспортних засобів. Визначення енергії деформації та руйнування елементів конструкції транспортних засобів важливе для визначення швидкості їх руху перед зіткненням. Крім того, інформація про витрачену енергію деформації автотранспортних засобів в умовах ДТП дозволяє виробникам автотранспортних засобів зменшити обсяг дорогих, малоінформативних і екстремно гнучких випробувань автомобілів. У даній роботі вирішено задачу оцінки енергії перед ударом на основі натурних випробувань. На прикладі автотехнічної експертизи отримано вихідні дані для визначення величин швидкостей автомобілів, а також їх енергії деформації, поглиненої при ударі.

Сутність моделі оцінки енергії деформацій полягає в тому, що будь-який непружний удар між транспортними засобами наводиться до еквівалентного пружного удару, при якому враховуються сумарні енергетичні витрати, які включають в себе роботу деформації, роботу сил опору переміщенням транспортних засобів в процесі відкидання після удару і кінетичних втрат при ударі. Достовірність розробленого методу оцінки енергії деформацій автотранспортних засобів підтверджена в умовах ДТП. На основі натурних випробувань енергія деформації визначена методом енергетичного еквівалента і методом твердості. Показана задовільна збіжність результатів розрахунку енергії деформації двома методами. Отримані результати підтверджують надійність визначення швидкості, розрахованої двома методами, а також за допомогою камери відео спостереження. Метод твердості, запропонований в якості альтернативи методу енергетичного еквівалента, дозволяє розраховувати енергію в умовах ДТП будь-яких транспортних засобів, включаючи автомобілі, "crash-tests" – випробування для яких не проводяться.

Ключові слова: енергія деформацій, автотранспортні засоби, дорожньо-транспортні аварії, технологічна спадковість, метод твердості, метод енергетичного еквівалента.

Огородніков Віталій Антонович – д-р техн. наук, професор, зав. кафедри опору матеріалів та прикладної механіки, e-mail: va.ogorodnikow@gmail.com.

Архіпова Тетяна Федорівна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри опору матеріалів та прикладної механіки, e-mail: tfarhipova@gmail.com.

Кожушаний Михайло Віталійович – студент.