

УДК 343.977

Бульбака Євгеній Богданович, старший науковий співробітник Одеського науково-дослідного інституту судових експертиз Міністерства юстиції України  
e-mail: eugene.bulbaka@gmail.com

## ОБЧИСЛЕННЯ ЕНЕРГОЕКВІВАЛЕНТНОЇ ШВИДКОСТІ (EES) ЗА ІНСТРУМЕНТАРИЄМ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ПІД ЧАС ЗІТКНЕННЯ З УРАХУВАННЯМ ЇХ ДЕФОРМАЦІЇ ТА РУЙНУВАННЯ

## ENERGY EQUIVALENT SPEED (EES) CALCULATION WITHIN THE TOOLKIT OF THE METHODOLOGY FOR DETERMINING THE SPEED OF THE VEHICLES DURING A COLLISION CONSIDERING THEIR DEFORMATION AND DESTRUCTION

**Анотація.** У статті розглядається метод обчислення енергоеквівалентної швидкості (EES) як одного з центральних контрольних параметрів під час реконструкції і моделюванні зіткнення, з використанням підходу щодо оцінки енергії деформацій, описаного в методиці визначення швидкості транспортних засобів під час зіткнення з урахуванням їх деформації та руйнування [Київський НДІСЕ, 2012; 10.1.01] [1].

**Ключові слова:** транспортний засіб, зіткнення, реконструкція, енергія деформацій, оцінка, EES, енергоеквівалентна швидкість, обчислення.

**Abstract.** The article deals with the technique of calculating the Energy Equivalent Speed (EES), as one of the central control parameters in collision reconstruction and simulation, – based on the deformation energy evaluation approach that is described in the methodology for determining the speed of the vehicles during a collision considering their deformation and destruction [Kyiv Forensic Research Institute, 2012; 10.1.01] [1].

**Key words:** vehicle, collision, reconstruction, deformation energy, evaluation, EES, Energy Equivalent Speed, calculation.

Програмний комплекс PC-Crash [2; 3], розробки австрійської компанії DSD є одним із найпоширеніших і функціональних інструментів комп'ютерного моделювання і реконструкції механізму ДТП в широкому ситуаційному спектрі на підставі закладених в основу програми складних наукомістких фізико-математичних алгоритмів, що реалізують реалістичні обчислення за декількома моделями, в тому числі за ударно-імпульсною моделлю зіткнення, моделлю зіткнення на основі жорсткості, кінетичною моделлю реалістичного обчислення руху транспортних засобів в динаміці з урахуванням фізичних параметрів, сил, моментів, конструктивних властивостей, впливів навколишнього середовища, прийомів керування, а також простою кінематичною моделлю традиційних розрахунків відстані в часі.

Енергоеквівалентна швидкість, скорочено EES (англ. Energy Equivalent Speed), є одним із центральних контрольних параметрів при моделюванні

зіткнення в PC-Crash за класичною моделлю Кудліха-Слібара (Kudlich-Slibar), в дефініції Бурга (Burg) і Цайдлера (Zeidler); основним методом чисельного визначення EES в практиці є порівняльний метод, коли предметний транспортний засіб деформований в умовах ДТП зіставляється за критеріями взаємної відповідності деформацій з іншими транспортними засобами з відомими EES, зібраними в спеціалізованих признаних базах даних, наприклад, Dr. Melegh Catalog [4], NHTSA, Transport Canada, AZT EES Catalog, Crashtest Iservice тощо, номенклатура яких постійно оновлюється та розширюється.

Енергоеквівалентна бар'єрна швидкість, скорочено EBS (англ. Equivalent Barrier Speed; або інакше Energy Equivalent Barrier Speed, EEBS; Barrier Equivalent Velocity, BEV), є подібним до EES параметром, традиційним для США, де розроблені та апробовані різні практичні методи його чисельного визначення, зокрема за профілем ушкоджень, отриманим простими послідовними вимірами які відображують розмір ушкодженої ділянки і глибину деформацій на транспортному засобі, що обумовлює зручність практичного використання цього параметру (в тому числі EBS може бути обчислений за алгоритмом CRASH3, модуль якого входить до пакету PC-Crash, та перерахований далі в EES в тому ж модулі тощо).

У першому наближенні, якщо маємо предметний транспортний засіб, деформований в умовах ДТП, що аналізується, то поняття EES і EBS можуть бути виражені як швидкість, яку повинен мати ідентичний предметному транспортний засіб, щоб отримати ідентичні предметним залишкові деформації при контакті з фіксованим жорстким бар'єром (перешкодою).

Іншою мовою EES і EBS можуть бути виражені як міра енергії, подана в одиницях швидкості (км/год тощо).

EES і EBS несуть у собі відмінність, обумовлену змістовним наповненням підходу до врахування впливу ефекту реституції (відновлення) енергії при зіткненні в розумінні, що гранично спрощено полягає в нижчеприведеному.

EBS уявляється як величина, що відображує еквівалент всієї енергії разом, іншою мовою визначається так, якби умовно прийняти, що вся кінетична енергія, яку мав автомобіль перед ударом, при ударі перетворилась в енергію деформацій, без виділення складової відновлення,

EES є величиною, що визначає еквівалент кінетичної енергії, яка при ударі перетворилась в енергію залишкових деформацій, але передбачає окреме врахування енергії відновлення; тобто застосування EES полягає в реалізації моделювання зіткнення із забезпеченням обчислення обох зазначених принципових енергетичних складових частин.

У розширеному розумінні визначення EBS і EES та їх співвідношення можна виразити таким чином:

EBS є мірою кінетичної енергії ( $E_K$ ), яку мав транспортний засіб перед ударом, частина якої відображує пластичну складову частину і перетворюється

в енергію залишкових деформацій ( $E_D$ ), тоді як інша її частина відображує пружну складову частину ( $E_E$ ) і знов перетворюється в кінетичну енергію (в об'ємі, що обумовлює відкидання транспортного засобу після контакту з бар'єром), та з урахуванням маси ( $m$ ) описується залежністю:

$$E_K = E_D + E_E = m \times EBS^2 / 2.$$

EES є мірою частини кінетичної енергії, яку мав транспортний засіб перед ударом, що відображує пластичну складову частину і перетворюється в енергію залишкових деформацій ( $E_D$ ), без врахування пружної складової частини ( $E_E$ ), та описується залежністю:

$$E_D = m \times EES^2 / 2,$$

що, у підсумку, характеризує наступне співвідношення EBS і EES:

$$E_K = E_D + E_E = m \times EBS^2 / 2 = m \times EES^2 / 2 + E_E,$$

тобто:

$$m \times EBS^2 / 2 = m \times EES^2 / 2 + E_E,$$

або через коефіцієнт реституції ( $k$ ):

$$EES = EBS \sqrt{1 - k^2}.$$

Як видно, в теорії, величини EES і EBS співпадають у випадку абсолютно непружного удару (при  $k = 0$ ).

На практиці вважається що EES і EBS можуть прямо порівнюватися в числовому вираженні, тобто розглядатися як ідентичні, у випадках EBS близько 10 міль/год (16 км/год) і вище (що як правило властиво зіткненням легкових автомобілів з відносними швидкостями 20...30 км/год і вище, і до речі, охоплює переважну більшість реальних ДТП, що потребують експертних досліджень), коли ефектами енергії відновлення (що враховуються тільки в обчисленнях з EES) можна знехтувати через їх практичну незначущість, беручи до уваги типові похибки при вимірюванні профілю деформацій.

Водночас меншим EBS властиві суттєві числові розбіжності з EES. У такому разі для оцінки енергії зіткнення доцільно визначати EES вручну за доступними методами та, зокрема, утриматися від обчислень за алгоритмом CRASH3, через небезпеку втрати точності в даному діапазоні, в особливості в аспекті врахування фактичного наповнення бази даних креш-тестів NHTSA в переважній більшості випадками типових EBS 30 міль/год (48 км/год) або 35 міль/год (56 км/год), тобто поза межами даного діапазону.

Енергія залишкових деформацій транспортного засобу може бути виражена як кінетична енергія у віртуальній швидкісній величині EES.

Для забезпечення достовірності оцінки величини EES необхідно проведення чисельних різних креш-тестів через різноманіття факторів,

параметрів, що можуть впливати на поглинання енергії в умовах зіткнень транспортних засобів.

За визначенням міжнародного стандарту ISO 12353 енергоеквівалентна швидкість (EES) – це «еквівалентна швидкість, яку потрібен мати конкретний транспортний засіб при ударі в будь-який нерухомий жорсткий об'єкт, для того, щоб розсіяти енергію деформацій відповідну до залишкових деформацій предметного транспортного засобу» (англ. “equivalent speed at which a particular vehicle would need to contact any fixed rigid object in order to dissipate the deformation energy corresponding to the observed vehicle residual crush”).

EES – це скаляр, тобто величина, що набуває числових значень і не характеризується напрямком у просторі.

Параметр EES може бути визначений методом порівняння з використанням референсних матеріалів [2; 3], таких як спеціалізовані бази даних EES [4]. Такі бази даних EES містять фотографії пошкоджених транспортних засобів, що структуровані за категоріями у відповідності до моделі транспортного засобу, типу зіткнення, ступеня пошкоджень. Це дозволяє користувачу здійснити оцінку параметру EES для предметного транспортного засобу за принципами порівняльного аналізу пошкоджень.

Величина EES може бути обчислена для різних транспортних засобів, їх типів, з використанням різноманітних рівнянь з різним ступенем апроксимації. Так само можливо визначити енергію деформацій для випадків удару транспортного засобу в нерухому перешкоду що деформується.

У разі недоступності креш-тестів, придатних для цілей порівняльного аналізу, енергія деформацій може бути обчислена на підставі результатів вимірювання деформацій на предметному транспортному засобі з подальшим використанням таких методів: за методом графічної кривої «швидкість-деформація», що отримується за чисельними результатами зіткнень в різних діапазонах швидкостей, або за методом графічної кривої «сила-переміщення (зсув)», що отримується за результатами єдиного тесту зіткнення.

У числі розрахункових підходів обчислення EES можна виділити метод енергетичних растрів [5] або методи апроксимованих рівнянь, коли величина EES може бути оцінена, якщо прийняти до уваги такі фактори [6]:

- 1) максимальна величина (глибина) залишкових деформацій;
- 2) ширина зони залишкових деформацій;
- 3) мінімальна величина залишкових деформацій;
- 4) величина зсуву блоку двигуна;
- 5) величина деформації кабіни;
- 6) будь-які інші структурні зміни основних елементів конструкції.

Обчислення EES також може бути здійснено із застосуванням методів, опрацьованих КНДІСЕ в рамках розробки експертної методики визначення



швидкості руху транспортних засобів під час зіткнення з урахуванням їх деформування та руйнування [1], з урахуванням роботи [6], про приклад якої йдеться далі.

Маємо предметний легковий автомобіль, ушкоджений в умовах зіткнення транспортних засобів на косоперехресних курсах, із залишенням слідів безпосередньої контактної взаємодії зосереджених у лівій передній частині, поданих характерними деформаціями металу в основному напрямку зліва направо і дещо спереду назад (у супроводі деформаціями і руйнуваннями пластмаси, руйнуваннями застібки, ушкодженнями фарбового покриття зі сторонніми нашаруваннями).

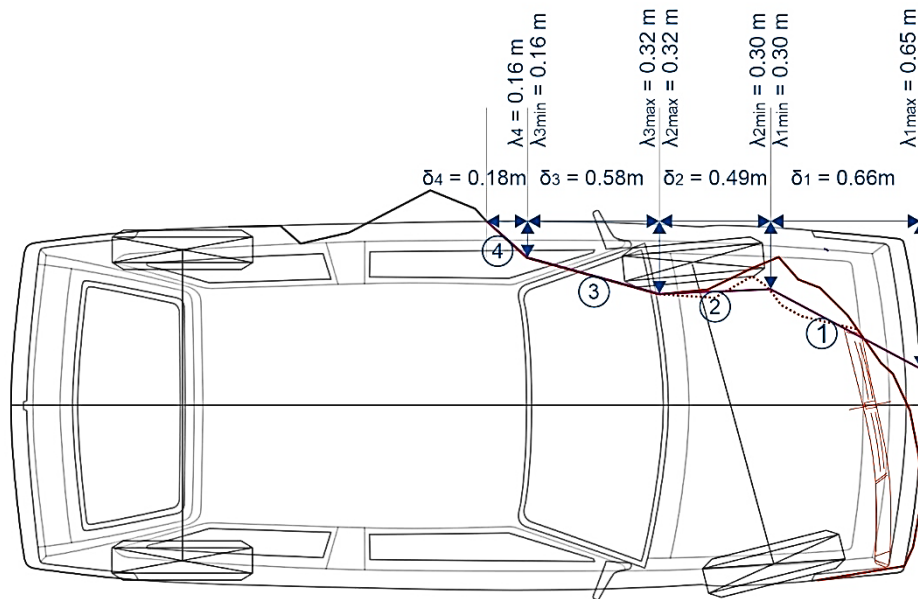
Зовнішній вид автомобіля в ушкодженому стані після зіткнення показаний нижче на рис. 1, 2, 3:

Результуюча геометрія автомобіля, що характеризує в плані локалізацію, розміри, напрямок і глибину деформацій в розглянутій області, з використанням результатів комплексу вимірів характерних позицій у прямокутній системі координат, реконструйована на площинній масштабній моделі, як показано нижче на рис. 4.

Виходячи з конфігурації області деформацій, величина EES визначається за інструментарієм, описаним в методиці [1] і роботі [6] таким чином:



Рис. 1, 2, 3. Зовнішній вид автомобіля в ушкодженому стані



**Рис. 4. Результуюча геометрія автомобіля в ушкодженному стані (з виділенням в загальній області деформацій чотирьох простих складових частин, що описуються елементарними фігурами у формі трапеції або трикутника)**

Загальна область деформацій складної конфігурації на предметному автомобілі може бути розбита на чотири прості складові частини, що описуються елементарними фігурами у формі трапеції (зони 1, 2, 3) або трикутника (зона 4).

Для областей за формою трапеції робота деформацій визначається за формулою 1:

$$W_{defj} = \frac{\delta_j}{\lambda_{jmax} - \lambda_{jmin}} \times \left[ A_j \times \frac{\lambda_{jmax}^2 - \lambda_{jmin}^2}{2} + B_j \times \frac{(\lambda_{jmax} - \lambda_{j0B})^{k_{jB}+2} - (\lambda_{jmin} - \lambda_{j0B})^{k_{jB}+2}}{(k_{jB} + 2) \times (k_{jB} + 1)} + C_j \times \frac{(\lambda_{jmax} - \lambda_{j0C})^{k_{jC}+2} - (\lambda_{jmin} - \lambda_{j0C})^{k_{jC}+2}}{(k_{jC} + 2) \times (k_{jC} + 1)} \right], \quad (1)$$

Для областей за формою трикутника робота деформацій визначається за формулою 2:

$$W_{defj} = \frac{\delta_j}{\lambda_j} \times \left[ A_j \times \frac{\lambda_j^2}{2} + B_j \times \frac{(\lambda_j - \lambda_{j0B})^{k_{jB}+2}}{(k_{jB} + 2) \times (k_{jB} + 1)} + C_j \times \frac{(\lambda_j - \lambda_{j0C})^{k_{jC}+2}}{(k_{jC} + 2) \times (k_{jC} + 1)} \right], \quad (2)$$

де  $W_{defj}$  – шукана робота деформацій для  $j$  області;

$A_j, B_j, C_j$  – константи енергоємності при деформуванні транспортного засобу залежно від напрямку дії ударного імпульсу при зіткненні;

$\lambda_{j0B}, \lambda_{j0C}, k_{jB}, k_{jC}$  – коефіцієнти апроксимації підінтегральної функції;

$\delta_j, \lambda_j, \lambda_{jmin}, \lambda_{jmax}$  – параметри ширини і глибини деформацій  $j$  області.

Для зони 1, за формою трапеції з геометрією  $\delta_1 = 0.66$  м,  $\lambda_{1max} = 0.65$  м,  $\lambda_{1min} = 0.30$  м, при деформуванні з фронту під кутом до подовжньої осі автомобіля з виходом на бокову поверхню, константи і коефіцієнти становлять:

$$\begin{aligned} A_1 &= 116 \dots 120 \text{ кДж/м}^2; \\ B_1 &= -7 \dots 13 \text{ кДж/м}^{1.9 \dots 1.7}; \\ C_1 &= 0; \\ \lambda_{10B} &= 0,3 \dots 0,5 \text{ м}; \\ k_{1B} &= -0,1 \dots 0,3; \end{aligned}$$

за співвідношенням величин  $\lambda_{1\max} = 0,65 \text{ м} > \lambda_{10B} = 0,3 \dots 0,5 \text{ м}$  і  $0 \leq \lambda_{1\min} = 0,30 \text{ м} \leq \lambda_{10B} = 0,3 \dots 0,5 \text{ м}$ , складова  $(\lambda_{1\min} - \lambda_{10B})^{k_{1B} + 2}$  перетворюється на нуль (0), іншою мовою  $(\lambda_{1\min} - \lambda_{10B})^{k_{1B} + 2} = 0$ ;

тобто формула 1 (для зони 1) в чисельному вираженні приймає вид:

$$\begin{aligned} W_{def1} &= \frac{0,66}{0,65 - 0,30} \times \\ &\times \left[ 116 \dots 120 \times \frac{0,65^2 - 0,30^2}{2} + (-7 \dots 13) \times \frac{(0,65 - 0,3 \dots 0,5)^{-0,1 \dots 0,3+2} - 0}{(-0,1 \dots 0,3 + 2) \times (-0,1 \dots 0,3 + 1)} + 0 \right] = \\ &= 35,3 \dots 36,8 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

Для зон 2, 3, за формою трапеції з геометрією  $\delta_2 = 0,49 \text{ м}$ ,  $\lambda_{2\max} = 0,32 \text{ м}$ ,  $\lambda_{2\min} = 0,30 \text{ м}$  і  $\delta_3 = 0,58 \text{ м}$ ,  $\lambda_{3\max} = 0,32 \text{ м}$ ,  $\lambda_{3\min} = 0,16 \text{ м}$  відповідно, при деформуванні збоку під кутом до подовжньої осі автомобіля без виходу на торцеві поверхні, та також для зони 4, за формою трикутника з геометрією  $\delta_4 = 0,18 \text{ м}$ ,  $\lambda_4 = 0,16 \text{ м}$ , зазначені константи і коефіцієнти становлять:

$$\begin{aligned} A_2 &= A_3 = A_4 = 46 \dots 50 \text{ кДж/м}^2; \\ B_2 &= B_3 = B_4 = 114 \dots 118 \text{ кДж/м}^{2,3 \dots 2,34}; \\ C_2 &= C_3 = C_4 = 0; \\ \lambda_{20B} &= \lambda_{30B} = \lambda_{40B} = 0,05 \dots 0,15 \text{ м}; \\ k_{2B} &= k_{3B} = k_{4B} = 0,3 \dots 0,34; \end{aligned}$$

тобто формула 1 (для зон 2, 3) в чисельному вираженні приймає вид:

$$\begin{aligned} W_{def2} &= \frac{0,49}{0,32 - 0,30} \times \\ &\times \left[ 46 \dots 50 \times \frac{0,32^2 - 0,30^2}{2} + 114 \dots 118 \times \frac{(0,32 - 0,05 \dots 0,15)^{0,3 \dots 0,34+2} - (0,30 - 0,05 \dots 0,15)^{0,3 \dots 0,34+2}}{(0,3 \dots 0,34 + 2) \times (0,3 \dots 0,34 + 1)} + 0 \right] = \\ &= 14,4 \dots 11,3 \text{ кДж}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{def3} &= \frac{0,58}{0,32 - 0,16} \times \\ &\times \left[ 46 \dots 50 \times \frac{0,32^2 - 0,16^2}{2} + 114 \dots 118 \times \frac{(0,32 - 0,05 \dots 0,15)^{0,3 \dots 0,34+2} - (0,16 - 0,05 \dots 0,15)^{0,3 \dots 0,34+2}}{(0,3 \dots 0,34 + 2) \times (0,3 \dots 0,34 + 1)} + 0 \right] = \\ &= 12,3 \dots 9,1 \text{ кДж}, \end{aligned}$$

а формула 2 (для зони 4) в чисельному вираженні приймає вид:

$$\begin{aligned} W_{def4} &= \frac{0,18}{0,16} \times \left[ 46 \dots 50 \times \frac{0,16^2}{2} + 114 \dots 118 \times \frac{(0,16 - 0,05 \dots 0,15)^{0,3 \dots 0,34+2}}{(0,3 \dots 0,34 + 2) \times (0,3 \dots 0,34 + 1)} + 0 \right] = \\ &= 0,9 \dots 0,7 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

Сумарна робота деформацій в n зонах визначається за формулою 3:

$$W_{def} = \sum_{j=1}^n W_{defj} = W_{def1} + W_{def2} + W_{def3} + \dots + W_{defn}, \quad (3)$$

яка для чотирьох ( $n = 4$ ) зазначених зон 1, 2, 3, 4 в чисельному вираженні приймає вид:

$$W_{def} = 35.3 \dots 36.8 + 14.4 \dots 11.3 + 12.3 \dots 9.1 + 0.9 \dots 0.7 = 62.9 \dots 57.9 \text{ кДж},$$

$$\text{або } W_{def} = 62900 \dots 57900 \text{ Дж}.$$

З урахуванням отриманих даних енергоєквівалентна швидкість EES визначається за формулою 4:

$$EES = \sqrt{\frac{2 \times E_D}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times W_{def}}{m}}, \quad (4)$$

де  $EES$  – шукана енергоєквівалентна швидкість, км/г;

$E_D = W_{def}$  – енергія залишкових деформацій ( $E_D$ ), вона ж визначена вище як сумарна робота (залишкових) деформацій ( $W_{def}$ ), – 62900...57900 Дж;

$m$  – маса предметного автомобіля з урахуванням спорядженої маси транспортного засобу за технічними характеристиками, та навантаження в умовах події (маси водія і пасажирів) – 1195 кг,

тобто формула 4 в чисельному вираженні приймає вид:

$$EES = \sqrt{\frac{2 \times 57900 \dots 62900}{1195}} = 9.8 \dots 10.3 \text{ м/с}, \text{ або } 35 \dots 37 \text{ км/г}.$$

Таким чином, за результатами проведеного аналізу в рамках розглянутої методології визначена енергоєквівалентна швидкість EES для предметного транспортного засобу (що може бути використана в якості контрольного параметра при моделюванні зіткнення в програмі PC-Crash), оціночна величина якої складає близько 35...37 км/г.

#### Перелік використаних джерел:

1. Методика визначення швидкості руху транспортних засобів під час зіткнення з урахуванням їх деформування та руйнування (код 10.1.01). Київ : Київський науково-дослідний інститут судових експертиз, 2012.
2. Бульбака Є. Звіт про науково-дослідну роботу IV.1.1-2019/3 «Розробка методики експертного дослідження окремих типових завдань з реконструкції обставин ДТП з використанням сучасного спеціального комп'ютерного програмного забезпечення». Одеса : Одеський науково-дослідний інститут судових експертиз, 2022.
3. Wach W., Moser A. Simulation of Vehicle Accidents using PC-Crash. Kindle ed. Linz : Dr. Steffan Datentechnik GmbH, 2012. 968 p. URL: <https://www.amazon.com/Simulation-Vehicle-Accidents-using-PC-Crash-ebook/dp/B009VJC5AO/>
4. EES Catalogue / by G. Melegh. URL: <https://ees-catalog.com>
5. Zeidler F., Schreier H.-H., Stadelmann R. Accident Research and Accident Reconstruction by the EES-Accident Reconstruction Method. *SAE Technical Paper*. 1985. DOI: 10.4271/850256. URL: <https://saemobilus.sae.org/content/850256/>
6. Danner M., Halm J. Technische Analyse von Verkehrsunfällen. Pfäffikon : Eurotax (International) AG, 1994. 570 S.



**References:**

1. Kyiv Scientific and Research Institute of Forensic Expertise (2012). *Metodyka vyznachennia shvydkosti rukhu transportnykh zasobiv pid chas zitknennia z urakhuvanniam yikh deformuvannia ta ruinovannia (kod 10.1.01) [The method of determining the speed of movement of vehicles during a collision, taking into account their deformation and destruction (code 10.1.01)]*. Kyiv [in Ukrainian].
2. Bulbaka, Ye. (2022). *Zvit pro naukovo-doslidnu robotu IV.1.1-2019/3 "Rozrobka metodyky ekspertnoho doslidzhennia okremykh typovykh zavdan z rekonstruktsii obstavyn DTP z vykorystanniam suchasnoho spetsialnoho komp'iuternoho prohramnoho zabezpechennia" [Report on research work IV.1.1-2019/3 "Development of the methodology of expert research of certain typical tasks for the reconstruction of road accident circumstances using modern special computer software"]*. Odesa: Odesa Scientific and Research Institute of Forensic Expertise [in Ukrainian].
3. Wach, W., & Moser, A. (2012). *Simulation of Vehicle Accidents using PC-Crash* (Kindle ed.). Linz: Dr. Steffan Datentechnik GmbH, 968 p. Retrieved from: <https://www.amazon.com/Simulation-Vehicle-Accidents-using-PC-Crash-ebook/dp/B009VJC5AO/> [in English].
4. Melegh, G. (n. d.). EES Catalogue. Retrieved from: <https://ees-catalog.com> [in English].
5. Zeidler, F., Schreier, H.-H., & Stadelmann, R. (1985). Accident Research and Accident Reconstruction by the EES-Accident Reconstruction Method. *SAE Technical Paper*, DOI: 10.4271/850256. Retrieved from: <https://saemobilus.sae.org/content/850256/> [in English].
6. Danner, M., & Halm, J. (1994). *Technische Analyse von Verkehrsunfällen [Technical analysis of traffic accidents]*. Pfaffikon: Eurotax (International) AG, 570 p. [in German].

