

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ЖИТТЄВОГО ПРОСТОРУ СЕКЦІЙ КУЗОВІВ АВТОБУСІВ КЛАСІВ М2 ТА М3 ПІД ЧАС ЇХ ВИПРОБУВАНЬ НА МІЦНІСТЬ

© Голенко К.Е., Горбай О.З., Крайник Л.В., 2009

**Проаналізовано поведінки секцій кузовів автобусів в умовах напружено-деформованого стану під час їх випробувань на міцність, виконані дослідження факторів впливу на результуючу пасивну безпеку, визначену залишковим життєвим простором салону внаслідок нормативних випробувань.**

**It was made the buses body-structure analysis in stress-deformed conditions of their strength test, besides it was spent the influence factors investigations of the passive safety, defined by salon residual vital volume in the result of normative tests conditions.**

**Постановка проблеми.** Згідно з Правилами №66 ЕЖ ООН, всі модельні ряди одноповерхових транспортних засобів для перевезення 16 і більше пасажирів потрібно перевірити на збереження залишкового життєвого простору під час перекидання на бік. В умовах сучасного вітчизняного автобусобудування, для якого характерним є перехід на новий, продиктований вже чинними в країнах ЄС Правилами №107 ЄЕК ООН, тип кузова Low-entry [1], проблема досліджень міцнісних характеристик структури каркасу постає дуже гостро. Водночас, міцність верхньої частини конструкції кузова визначається згідно з запропонованим заводом-виробником методом, котрим може виступати:

- перекидання повнокомплектного екземпляру типоряду;
- перекидання секції або секцій кузова, які характерні для досліджуваного модельного ряду;
- випробування секції або секцій кузова на маятниковому копрі;
- оцінка поглинаючої здатності кузова на основі тестування окремих вузлів та з'єднань;
- перевірка верхньої частини конструкції кузова розрахунковим методом.

**Аналіз відомих досліджень.** Надійні результати випробувань на міцність верхньої частини каркасу кузова автобуса є можливим отримати під час випробувань на перекидання серійного екземпляру автобуса за нормативно регламентованим методом “Full-Scale Vehicle Rollover Test” (“Тест на перекидання повнокомплектного транспортного засобу”) [2]. Цей тип випробувань характеризується неможливістю подальшої комерційної реалізації зруйнованого зразка автобуса, низьким рівнем інтеграції отриманих результатів у просторову конструкцію його кузова за неможливості проведення повторних краш-тестів з введеними структурними змінами. Оцінка міцності верхньої частини кузовів типу Low-entry на основі тестування поглинаючої здатності вузлів та з'єднань за нововведеним методом “Component Testing + Numerical Simulation” (“Тестування компонентів + симуляція складових”) набирає все більшої актуальності з погляду створення бібліотеки даних, які характеризують поведінку різних матеріалів під час прикладення до них статичних/динамічних навантажень (також допустимі фіксації можливих статичних, динамічних та залишкових деформацій) у типових вузлових з'єднаннях каркасів несучих систем автобусів. Проміжну позицію між натурним аналізом міцності у разі перекидання повнокомплектного екземпляру транспортного засобу та методом дослідження лише основних вузлових з'єднань його структури каркасу займають такі види випробувань секцій кузова:

- безпосереднє перекидання секції, структурно типової для каркасу кузова досліджуваної моделі (“Bay Section Rollover Test”);
- експеримент обраної характерної секції на маятниковому копрі (“Bay Section Pendulum Impact Test”).

**Постановка задачі.** Аналіз особливостей методів перевірки міцності верхньої частини конструкції кузова типу Low-entry згідно з Правилами №66 ЕЕК ООН на основі проведення випробувань обраної секції, структурно характерної для каркасу кузова автобуса.

**Основний матеріал.** За погодженням з технічною службою, відповідальною за виконання випробувань, перевірка поведінки каркасу кузова автобуса на відповідність Правилам № 66 ЕЕК ООН може бути замінена випробуванням секції каркасу кузова методом перекидання або маятникового копру [3]. Вибір можливого методу залежить від поставлених задач оцінки показників пасивної безпеки: перекидання характеризується можливістю відображення поведінки манекенів під час випробувань, дослідження на маятниковому копрі – здатністю створення умов, за яких здійснюється деформація матеріалу каркасу кузова практично до межі текучості. З врахуванням швидкісних можливостей сучасних ЕВМ з’являється можливість не тільки визначати місця, у яких відбувається пластична деформація, а також й послідовність процесу пластичного деформування. Зазначений метод дає змогу враховувати зміни геометрії конструкції, що відбуваються саме на стадії деформації, визначити, чи вони не перевищують допустимих меж. Економічна доцільність секційного аналізу поведінки кузова в умовах нормативних вимог проявляється не тільки під час виконання натурних випробувань, а також і методом комп’ютерної імітації у середовищі МКЕ (методу кінцевих елементів) [4] з точним дотриманням динамічних показників перевертання повнокомплектного зразка автобуса.

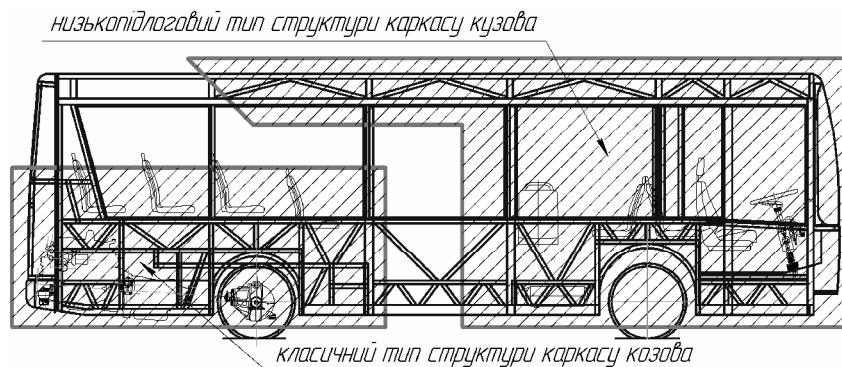


Рис. 1. Структурне зображення концепції кузова типу Low-entry

Як відомо, ферма каркасу кузова типу Low-entry (рис.1) характеризується своєю структурною складністю в результаті симбіозу низькопідлогової та класичної концепції автобусів [5]. Оскільки результати експерименту на основі даних, отриманих під час випробування однієї секції кузова, можуть бути використані для визначення прийнятності іншої, структурно неідентичної досліджуваної секції, то вибір загальної кількості секцій кузова типу Low-entry, для яких необхідно виконати перевірку на відповідність Правилам №66 ЕЕК ООН, мотивується такими запропонованими правилами:

- кожна секція кузова повинна складатися не менше ніж з двох секторів каркасу силової структури;
- всі конфігурації секцій силової структури, що різняться між собою, повинні бути включені хоча б в одну з них;
- секції кузова повинні бути еквівалентні аналогічним конструкціям силової структури в плані їх міцності, жорсткості та поведінки;

- в секції кузова співвідношення маси будь-якого сектора до маси іншого не повинно перевищувати їх сукупної маси;
- конструкція каркасу даху повинна повною мірою бути відображеною в секції, враховуючи такі конструктивні особливості, як: наявність кондиціонера, газових балонів, багажних полицок, зміни рівня підлоги тощо;
- геометричні розміри, характеристики і форми матеріалів та з'єднань секції-аналога повинні бути еквівалентними досліджуваному зразку;
- жорсткі елементи, які не входять в силову структуру, але можуть проникати в залишковий простір під час деформації, повинні бути встановлені у секціях кузова;
- залишковий простір пасажирського салону, утворений шляхом переміщення по прямій або прямим лініям шаблону [6], повинен бути поданий належно нормативно визначено, включаючи будь-які особливі поєднання, обумовлені конфігурацією кузова.

Висунуто додаткові вимоги щодо виконання випробувань: секції кузова мають складатися з секторів типової структури з вмонтованими елементами (багажні полиці, вентиляційні канали тощо), якщо такі передбачено; всі двері й вікна, які відкриваються, повинні бути закриті на засувку, але не на замок; спинки крісел з регульованим нахилом встановлюються у вертикальне положення, а регульовані по висоті сидіння встановлюються на максимальний верхній рівень, конструктивно визначений на заводі-виробнику.

Перед остаточним вибором досліджуваної секції виконують попередній аналіз конструкції з метою визначення можливих місць пластичних деформацій: перевіряються розміри складових елементів та фізико-хімічні властивості застосовуваного в них матеріалу. Наступним кроком визначається швидкість деформації та динамічна межа текучості, яка відповідає цій швидкості. Якщо розрахунки не дозволяють визначити, коли відбудеться механічний розрив матеріалу, у такому разі необхідно дослідно на підставі окремих аналізів або відповідних динамічних випробувань встановити, до яких значень результуючих напружень та пластичних деформацій зберігається цілісність матеріалу.

Під час випробувань кожна секція (рис.2) міцно та надійно фіксується на стенді відповідно до нормативних вимог Правил №66 ЄЕК ООН за допомогою жорсткої конструкції так, щоб місце та метод закріплення не перешкождали формуванню передбачуваних зон пластичної деформації і функціонуванню пластичних шарнірів, а навколо місць кріплення не відбувалося місцевих пластичних деформацій.

Перекидання досліджуваної секції починається з її піднімання до положення нестійкої рівноваги, коли кутова швидкість дорівнює нулю. Приведену енергію цієї секції можна визначити з виразу [8]:

$$E_R = M \cdot g \cdot h_1 = M \cdot g \left[ 0.8 + \sqrt{h_0^2 + (B \pm t)^2} \right], \quad (1)$$

де  $M = M_k$  – маса конкретного типу автобуса у спорядженому стані, кг. До розрахунків можна прийняти значення  $M_t$  – загальна приведена маса автобуса зі встановленими ременями безпеки:

$$M_t = M_k + kM_m,$$

де  $k$  – коефіцієнт навантаження ( $k = 0,5$ );  $M_m$  – загальна маса пасажирів, кг;  $h_0$  – висота центра ваги автобуса для обраного значення маси ( $M$ ), мм;  $t$  – відстань по перпендикуляру до центра ваги автобуса від його поздовжньої вертикальної площини симетрії, мм;  $B$  – відстань по перпендикуляру від поздовжньої вертикальної площини симетрії до осі обертання під час випробувань на перекидання, мм;  $g$  – константа сили тяжіння ( $9,81 \frac{M}{c^2}$ );  $h_1$  – висота центра ваги автобуса в його початковому нестійкому положенні щодо нижньої горизонтальної площини кювету, мм.

Енергію  $E_T$ , яку повинна поглинути секція каркасу кузова, визначимо з рівності

$$E_T = 0,75 M g \Delta h, \quad (2)$$

де  $\Delta h$  – різниця рівнів положення центра ваги на початку втрати стійкості під час перекидання (верхня точка дуги траєкторії руху) та у момент завершення удару об опорну поверхню кювету;

$\Delta h = h_1 - h_2$  – висота центра тяжіння автобуса в момент контакту каркасу з горизонтальною поверхнею кювету, м.

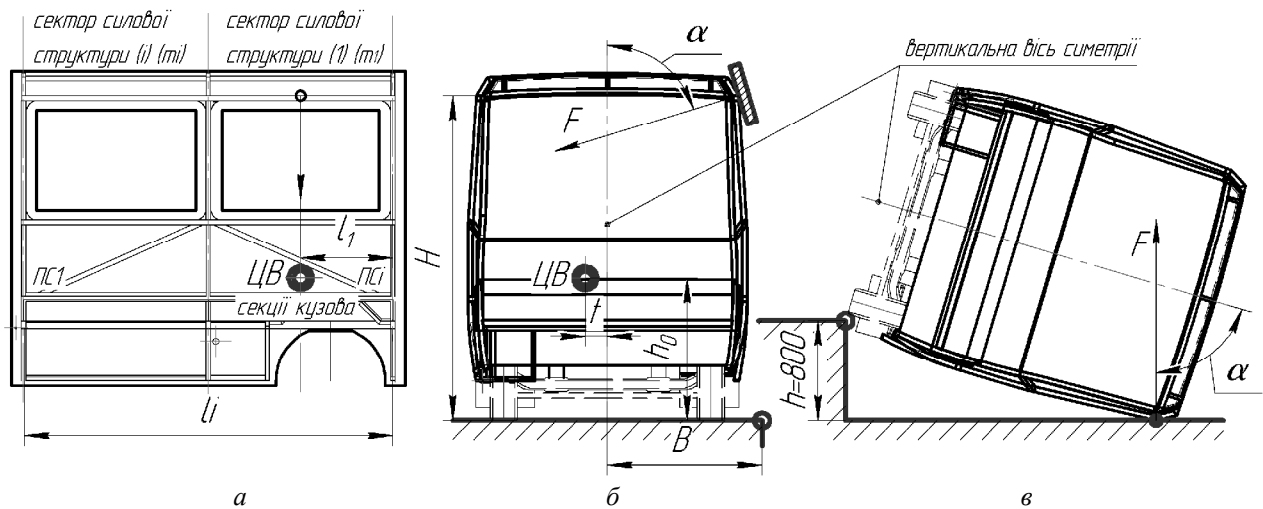


Рис. 2. Розрахунково-аналітична схема процесу випробувань секції кузова методом аналізу: а – секції; б – маятниковим копром; в – перекиданням

В умовах специфіки формування несівної структури каркасу кузова типу Low-entry, визначення результуючої енергії поглинання удару секцією можливо визначати також за такою залежністю:

$$E_T = 0.75 \cdot Mg \left( \sqrt{\left(\frac{W}{2}\right)^2 + H_3^2} - \frac{W}{2H} \sqrt{H^2 - 0.8^2} + 0.8 \frac{H_3}{H} \right), \quad (3)$$

де  $W$  – загальна ширина транспортного засобу, мм;  $H_3$  – висота центра ваги порожнього транспортного засобу, мм;  $H$  – висота транспортного засобу, мм.

Причому ця частина загальної енергії повинна розподілятися між секціями силової структури пропорційно з їх масами так:

$$E_i = E_T \frac{m_i}{M}, \quad (4)$$

де  $E_i$  – енергія, поглинена “i-ю” секцією силової структури, Н·м;  $m_i$  – маса “i-ї” секції силової структури, кг.

Мінімальна енергія, яка повинна бути поглинена секцією кузова, визначається, як сума енергій секторів силової структури, які входять до її складу:

$$E_{\min} = \sum_{i=1}^s E_i \quad (5)$$

Вважається, що секція кузова успішно проходить випробування під навантаженням, коли збережено недоторканність шаблону залишкового життєвого простору у пасажирському салоні. Ця умова означає, що під час та після виконання перекидання жодні елементи кузова, такі, як панелі, полички для багажу, вентиляційне обладнання тощо, не порушили його цілісність, а також жодна частина шаблону не виступала за межі деформованої конструкції. Після випробувань інструментально визначають величини фактичних динамічних і залишкових деформацій бокових стійок в контрольованих точках на висоті 750 мм від точки “R” шаблону залишкового життєвого простору.

Перекидання секції можливо виконувати як без, так і за участю манекенів, проте їх наявність впливає на зростання маси досліджуваного автобуса, збільшення висоти положення його центра ваги, а отже, неминучого росту величини кінетичної енергії обертового руху. (рис. 3). Розрізняють три їхні види закріплення у посадкових місцях: з дво-, триточковим ременем безпеки

кріпленням ременя безпеки або незафіксоване вільне переміщення. На основі аналізу випробувань секції експериментальної моделі 56-місного автобуса отримуємо такі закономірності по деформаціях обраної міжвіконної стійки [7]:

- 197 мм за відсутності пасажирів;
- 212 мм за наявності манекенів, зафіксованих двоточковими ременями;
- 272 мм за наявності манекенів, зафіксованих триточковими ременями безпеки.

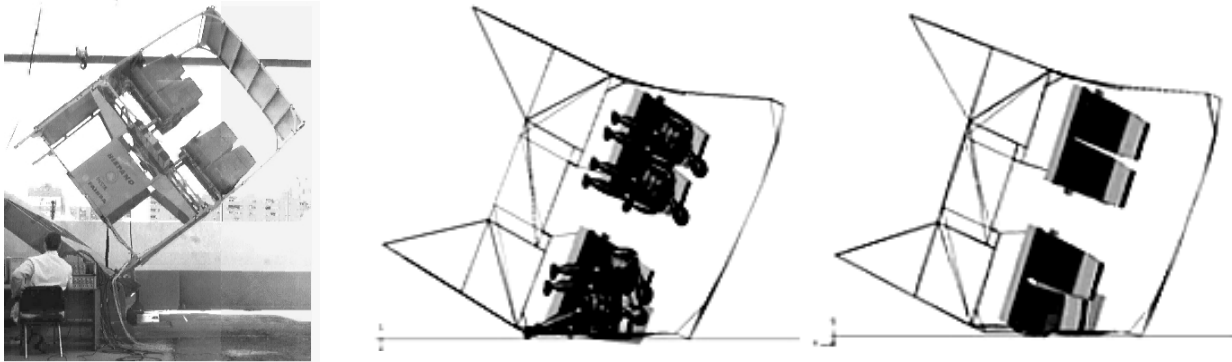


Рис. 3. Стендове та комп'ютерне моделювання перекидання секції автобуса з і без участі манекенів

Тенденція до росту деформацій відповідальної за необхідний залишковий простір стійки боковини проявляється у збільшенні результуючих напружень, отриманих під час удару об поверхню кювету при зростанні величини кінетичної енергії. Своєю чергою енергія абсорбції удару (кінетична обертального руху) залежить не тільки від прикладання додаткового навантаження в якості пасажирів, але й від характеру згрупованості їх центрів ваги та незмінного положення під час перекидання автобуса. Очевидно, під час перекидання автобуса на манекени діє сила інерції, напрямлена протилежно до результуючого прискорення обертального руху, тому за можливого їх ковзання у посадкових місцях, змінюється схема навантаження: замість однієї спільної (сумарна маса автобусу та пасажирів) виникають дві різні інерційні системи. Причому сумарна енергія поглинання каркасом кузова удару спільної інерційної системи не дорівнює сумі енергій систем окремо, оскільки частину енергії від перекидання поглинають самі пасажирів. Саме цей випадок має найнебезпечніший характер з боку пасивної безпеки, оскільки процес перекидання розкладається на два етапи: першим поглинає удар каркас кузова автобуса з врахуванням частини енергію мас манекенів, а на другому – їхня залишкова маса вдаряється у zdeформований вже на той момент кузов та поглинається ними як потенціальна енергія.

Отже, про внутрішню безпеку салону можемо судити по величині залишкової потенціальної енергії, поглинутої пасажирами: чим меншим виникає її значення, тим безпечніші умови перевезень; чим надійніше пасажири будуть зафіксовані у кріслах, тим більше значення своєї маси вони передадуть у спільну з автобусом кінетичну енергію інерційної системи, удар від якої поглине ферма кузова, але не пасажири. Науково підтверджено, що метод закріплення манекена істотно впливає на величину загальної маси, яку необхідно враховувати під час визначення енергії поглинання: якщо під час перекидання автобуса з вільно сидячими манекенами на кузов автобуса передається лише 18 % їх маси (решта поглинається ними), то при фіксації їх на дво- та триточкові ремені безпеки фермою кузова абсорбується 71 та 93 % їх маси. Для автобусів типу Low-entry відношення максимально абсорбованої до кінетичної енергії повинно перебувати в межах 0,465–0,69 [7].

Енергія удару по конкретній секції кузова повинна створюватися сумою рівнорозподілених по довжині прикладання сил, зазначених заводом-виробником для кожної стійки незалежно, чи випробування проводиться на перекидання на бік, чи за допомогою маятника.

На заводі-виробнику вказують, які стійки верхньої частини конструкції розглядаються як такі, що збільшують її міцність, а також зазначають величину сили, яку повинна витримати кожна стійка. Ці величини повинні відповідати таким критеріям:

$$\sum_{i=1}^{i=m} E_i > E^* \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{i=n} E_{iF} \geq 0.4E^* \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^{i=p} E_{iR} \geq 0.4E^* \quad (8)$$

де  $m$  – загальне число зазначених стійок;  $n$  – число зазначених стійок перед центром ваги транспортного засобу;  $p$  – число зазначених стійок за центром ваги автобуса;  $E_i$  – зазначена величина енергії, яку може витримати  $i$ -та стійка конструкції;  $E_{iF}$  – зазначена величина енергії, яку може витримати  $i$ -та стійка перед центром ваги автобуса;  $E_{iR}$  – зазначена величина енергії, яку може витримати  $i$ -та стійка за центром ваги автобуса;  $E^*$  – загальна величина енергії, яку може витримати вся конструкція автобуса;  $d_{\max}$  – найбільша величина деформації секції, зафіксована після поглинання енергії удару;  $d_{\min}$  – найменша величина прогину секції конструкції кузова, обмірювана в напрямку удару у тій самій точці відсіку, як і для  $d_{\max}$  після поглинання енергії удару, зазначеної для цієї секції

$$L_F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (E_{iF} \cdot l_{iF})}{\sum_{i=1}^{i=n} E_{iF}} \quad (9)$$

$$L_R = \frac{\sum_{i=1}^{i=p} (E_{iR} \cdot l_{iR})}{\sum_{i=1}^{i=p} E_{iR}} \quad (10)$$

де  $L_F$  – середньозважена відстань між зазначеними стійками перед центром ваги транспортного засобу;  $L_R$  – середньозважена відстань між зазначеними стійками за центром ваги транспортного засобу;  $l_{iF}$  – відстань між центром ваги та  $i$ -ю стійкою перед центром ваги;  $l_{iR}$  – відстань між центром ваги транспортного засобу й  $i$ -ю стійкою за даним центром ваги;  $l_f$  – відстань між передньою частиною транспортного засобу й центром ваги;  $l_r$  – відстань між задньою частиною транспортного засобу й центром ваги.

Навантаження повинно рівномірно розподілятися по всій поверхні через жорсткий брус, довжина якого більша від верхньої обв'язки (для імітації поверхні землі під час випробувань на перекидання), та який відповідає геометричним характеристикам верхньої забудови. У таких крайових умовах, напрям прикладання навантаження повинен створювати з подовжною вертикальною площиною симетрії транспортного засобу кут  $\alpha$  (рис. 4), який визначимо з такої геометричної залежності:

$$\alpha = 90^\circ - \arcsin\left(\frac{800}{H}\right), \quad (11)$$

де  $H$  – висота верхньої обв'язки автобуса (у мм), вимірювана від горизонтальної опорної поверхні, мм.

Варто зазначити, що кут  $\alpha$  під час випробувань на маятниковому копрі відповідає за своїм значенням куту між вертикальною віссю поперечного перерізу автобуса та реакцією опори від поверхні кювета при перекиданні автобуса згідно з правилом переносу сил та збереженням напрямку вектора (рис. 2).

Поверхня маятника виготовляється зі сталі або фанери товщиною 20–25 мм та рівномірним розподілом маси по всій його довжині. Поверхня, через яку прикладається зусилля, є плоскою і має

прямокутну форму. Її ширина повинна бути не менша від ширини випробовуваної секції кузова, висота становити 800 мм, а краї мають бути заокруглені ( $R > 15$  мм). Корпус маятника нерухомо кріпиться до двох твердих штанг, осі котрих перебувають на відстані не менш 3 500 мм від геометричного центра корпусу маятника. Його швидкість у момент удару по секції кузова повинна становити 3–8 м/с.

Навантаження повинно прикладатися до маятника в центрі мас секції кузова, визначуваному по масах складових та з'єднувальних елементів. Розміщення секції кузова може бути визначене за такою формулою:

$$l_{\text{цт}} = \frac{\sum_{i=1}^s m_i l_i}{\sum_{i=1}^s m_i}, \quad (12)$$

де  $s$  – кількість секторів у секції;  $m_i$  – маса  $i$ -го сектора силової структури;  $l_i$  – відстань від центра ваги  $i$ -го сектора силової структури до обраної точки повороту;  $l_{\text{цт}}$  – відстань від центра мас секції силової структури до вибраної точки повороту.

Для випробування з застосуванням маятникового копру є можливим прикладення активного навантаження, яке повинне збільшуватися поступово, квазіоднорідними порціями з замірюванням величин деформації ( $d_i$ ) через регулярні інтервали (не менше 100 замірів) у ряді відповідальних точок трьох рівнів, позначених відповідно 1, 2, 3 (рис. 5): рівень підлоги, підвіконного бруса та каркасу даху (ребро сходження боковини з дахом). Під час експерименту трапеція залишкового життєвого простору повинна залишатись нерухомою та не мати контакту з найближчими елементами облицювання салону. Дана методика дозволить побудувати безперервну криву залежності поглинутої енергії від деформацій за отриманими експериментально даними (рис. 6). Для коректності проведення експерименту мають дотримуватись умови, визначені залежностями (4), (5).

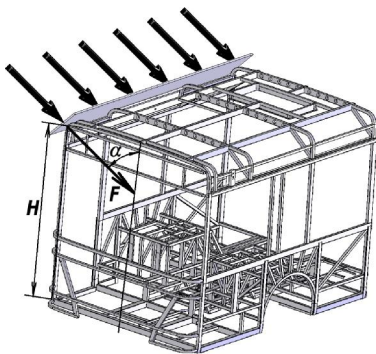


Рис. 4. Розрахункова схема прикладення навантажень до секції автобуса

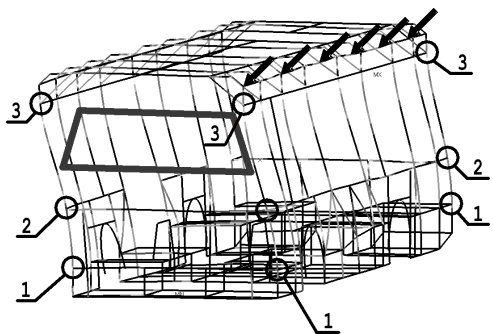


Рис. 5. Розрахункова схема оцінки показників пасивної безпеки

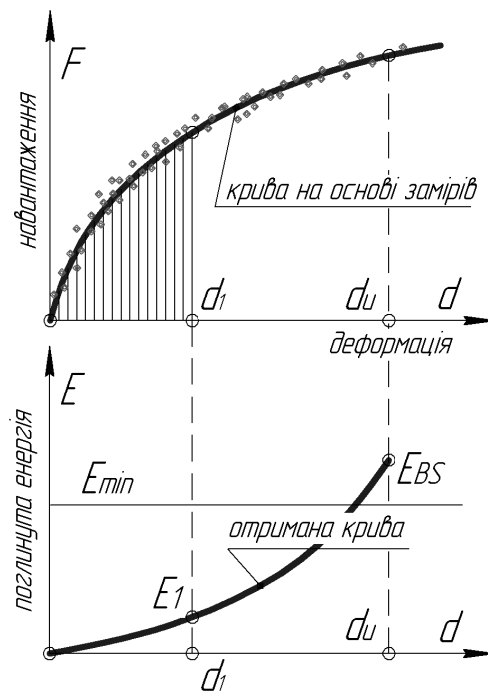


Рис. 6. Графік енергії поглинання залежності деформації елементів каркасу кузова від прикладеного навантаження

**Висновки.** Вітчизняне автобусобудування перебуває на етапі інтеграції нових, продиктованих вже чинними у країнах ЄС, нормативними вимогами Правил №107 ЄЕК ООН у розробку та сертифікацію автобусів типу Low-entry, тому актуальність дослідження методів оцінки показників пасивної безпеки становить інтерес не тільки наукової, але й для економічної сфери. Через значну кількість розроблених та офіційно регламентованих методик випробування пасажирських транспортних засобів на перекидання в умовах Правил № 66 ЄЕК ООН, необхідно проводити ґрунтовні дослідження кожного з них для виявлення оптимального способу проведення експерименту з точки зору балансу між фінансовими витратами та наближенням до натурального перекидання (руйнування) серійного зразку автобуса без можливої його подальшої реалізації.

У межах цієї роботи встановлено, що метод випробування на маятниковому копрі є актуальним лише на етапі дослідження міцнісних характеристик каркасу кузова, оцінки його напружено-деформованого стану, проте, з деяких причин, непридатний для аналізу пасивної безпеки автобуса з врахуванням пасажирів. Встановлено, що наявність пасажирів у салоні досліджуваного автобуса впливає на висоту положення його центра ваги, значення кінетичної енергії, а отже, ступінь поглинання удару.

1. Голенко К.Е., Крайник Л.В. Особливості формування несівних структур каркасу автобуса типу low-entry // Вісн. Нац. ун-ту "Харківський політехнічний інститут". – 2008. – 152 с. 2. Craig K.J. University of Pretoria. Multidisciplinary Design Optimization of Automotive Crashworthiness And NVH Using LS-OPT/ 7<sup>th</sup> International LS-DYNA Users Conference, May 19–21, Dearborn, Michigan, 2002. 3. ДСТУ UN/ECE R 66-00:2002 Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження великогабаритних пасажирських дорожніх транспортних засобів стосовно міцності верхньої частини їхньої конструкції (Правила ЕЭК ООН № 66-00:1987, IDT). 4. Голенко К.Е. Формування крайових умов аналізу поведінки каркасу кузова автобуса типу Low-entry в умовах Правил ЄЕК ООН № 66 // Наук. вісник НЛТУ України: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: НЛТУУ, 2008. Вип. 18.10. 5. Голенко К.Е., Горбай О.З., Крайник Л.В. Комп'ютерне моделювання і аналіз напружено-деформованого стану каркасу кузова автобуса типу Low-entry // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2008. – № 614: Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. 6. Голенко К.Е., Горбай О.З., Крайник Л.В. Аналіз відповідності Правилам ЄЕК ООН №66 каркасу кузова автобуса типу Low-entry – Сільськогосподарські машини. Зб. наук. ст. Вип. 17. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2008. – 144 с. 7. Dr. R Hashemi UN-ECE Regulation 66: Strength of Super-structure during Rollover APSN Workshop on Bus & Truck Passive Safety, Prague, 24th March 2005. – P. 32. 8. Предложение по поправкам серии 01 к правилам № 66. Европейская экономическая комиссия. Комитет по внутреннему транспорту. Всемирный форум для согласования правил в области транспортных средств (WP.29). – 71 с.