

но до одного з випробувань комп'ютерними засобами. Розв'язання здійснено на основі нелінійної математичної моделі, що включає три види одночасно діючих нелінійностей (геометричну, фізичну та структурну), з використанням методу скінченних елементів. Наведено аналіз отриманих результатів. У ході досліджень установлені залежності прогину силового каркасу від величини діючого зусилля. Визначено, що початковий варіант силової структури кузова автобуса не відповідає вимогам пасивної безпеки. Запропоновані рекомендації щодо підсилення каркасу. На конкретному прикладі продемонстрована ефективність комп'ютерних засобів, що дають змогу створити віртуальний випробувальний стенд на пасивну безпеку автобусів.

**Ключові слова:** кузов автобуса, оцінка міцності, напружено-деформований стан, метод скінченних елементів, нелінійна математична модель

**Вступ.** Компоненти транспортного засобу, які повинні запобігати травмуванню його пасажирів при потраплянні в дорожно-транспортну пригоду, є об'єктами технічного регулювання. По відношенню до автобусів такими об'єктами є міцність сидінь та їх кріплень (Правила ЄЕК ООН 80-01), вимоги до пасків безпеки (Правила ЄЕК ООН 16-04 та ЄЕК ООН 14-06), безпечне скло (Правила ЄЕК ООН 43-00). Та найбільш суттєвий вплив на внутрішню пасивну безпечність транспортного засобу має міцність верхньої частини конструкції. Цей показник дозволяє мінімізувати ДТП зі смертельними випадками.

**Аналіз стану питання.** Оцінка міцності верхньої частини каркасів кузовів автобусів проводиться згідно з правилами ЄЕК ООН № 66 [1] (динамічний тест) та відповідно до вимог стандарту FMVSS № 220 [2] (квазістатичний тест). Додаток 5 Правил як базовий метод передбачає проведення натурних випробувань транспортного засобу на перекидання, після якого проводиться оцінка залишкового простору пасажирського салону і деформацій основних елементів конструкції. Відповідно до другого тесту на дах конструкції кузова транспортного засобу діє пласка плита силою, що дорівнює 1,5 його спорядженої маси, помноженої на 9,8 м/с<sup>2</sup>. При цьому переміщення плити вертикально вниз не повинні перевищити 130 мм, а також повинна залишитися можливість відкриття всіх аварійних виходів, крім того, що знаходиться на даху. Хоча автобус витримує квазістатичний тест FMVSS № 220, той самий автобус може не пройти динамічний тест.

**Постановка задачі.** Для комп'ютерного моделювання було обрано другий вид випробувань. *Об'єкт досліджень* – типова конструкція каркасу кузова пасажирського автобуса середнього класу. Для розв'язання поставленої задачі було використано метод скінченних елементів. Теоретичні відомості про нього можна отримати з книги [3]. Питанню оцінки пасивної безпеки комп'ютерними засобами присвячені роботи [4, 5].

**Побудова розрахункової моделі.** Першим і найбільш трудомістким етапом при застосуванні методів математичного моделювання є побудова розрахункової моделі. Адже потрібно, щоб модель якомога точніше копіювала фізичні процеси та стани, що спостерігаються і зафіксовані, але, водночас, її вимоги до ресурсів та час розв'язання повинні бути прийнятними. Також треба відмітити, що розв'язання задач такого типу потребує нелінійної постановки. Зокрема, необхідно використовувати нелінійні геометричні співвідношення (1) та фізичні рівняння (2), а також співвідношення контактної взаємодії (3) [6].

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right); \quad i, j, k = 1, 2, 3; \quad (1)$$

© М.О. Бондаренко, 2014

УДК 629.0: 539.3

**М.О. БОНДАРЕНКО**, стажист-викл. каф. ТММ і САПР НТУ „ХПІ”

### ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КАРКАСУ КУЗОВА АВТОБУСА В УМОВАХ МОДЕЛЮВАННЯ ЙОГО ТЕСТОВОГО ВИПРОБУВАННЯ НА ПАСИВНУ БЕЗПЕЧНІСТЬ

У статті розглянуто види натурних випробувань пасажирських автобусів на пасивну безпечність та детально описана методика визначення реакції каркасу пасажирського автобуса на тестове зусилля відповід-

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl}; \quad i, j, k, l = 1, 2, 3; \quad (2)$$

$$\left( u_v^{(1)} + u_v^{(2)} \right) \Big|_{s_c} \leq \Delta, \quad (3)$$

де  $u, \varepsilon, \sigma$  – компоненти вектора переміщень, тензорів деформацій та напружень відповідно,  $C_{ijkl}$  – компоненти тензора пружних констант, а  $v$  – напрям нормалі до тіл 1, 2.

Оскільки передбачається розв'язання цілої множини задач аналізу складних машинобудівних конструкцій та у подальшому синтез їх конструктивних рішень за критеріями міцності та жорсткості, то потрібно застосувати методологію досліджень, яка дає змогу варіювати досліджуваній об'єкт. З цією метою була застосована та адаптована технологія узагальненого параметричного моделювання, яка запропонована у роботах [7-11].

Поведінку конструкції було проаналізовано на основі результатів розрахунків скінченно-елементної моделі (СЕМ) з використанням оболонкових елементів. Це зумовлено тим, що вона, на відміну від стрижневої моделі, більш детально описує конструкцію і тому дозволяє отримувати більш повну картину результатів, в даному випадку, – пластичні деформації на стінках труб, з яких побудований каркас автобуса. Це було продемонстровано у статті [12] та в роботі [13]. Детальніше СЕМ досліджуваного об'єкта представлена на рис. 1. При її побудові враховані підходи, викладені у посібнику [14].

Указане в стандарті навантаження ( $F \approx 96$  кН) було реалізоване прикладенням переміщень до плити вертикально вниз. При цьому конструкція була навантажена кінематично (рис. 2). Це сприяє задовільній збіжності задачі. Статична визначеність конструкції досягнута жорстким закріпленням нижньої частини рами.

**Аналіз результатів.** Як результати було отримано переміщення та напруження у каркасі кузова автобуса. На рис. 3 представлено графік залежності напружень від прикладених переміщень.

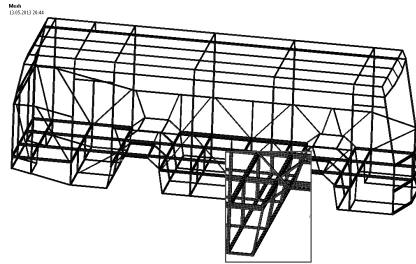


Рисунок 1 – Скінченно-елементна модель каркасу кузова автобуса

Steps	Time [s]	X [m]	Y [m]	Z [m]
1	0,	0,	0,	0,
1	1,	0,	0,	0,
2	2,	= 0,	-2, e-002 = 0,	
3	3,	= 0,	-4, e-002 = 0,	
4	4,	= 0,	-6, e-002 = 0,	
5	5,	= 0,	-8, e-002 = 0,	
6	6,	= 0,	-0,1 = 0,	
7	7,	= 0,	-0,12 = 0,	
8	8,	= 0,	-0,14 = 0,	
9	9,	= 0,	-0,16 = 0,	
10	10,	= 0,	-0,18 = 0,	

Рисунок 2 – Таблиця навантаження за кроком

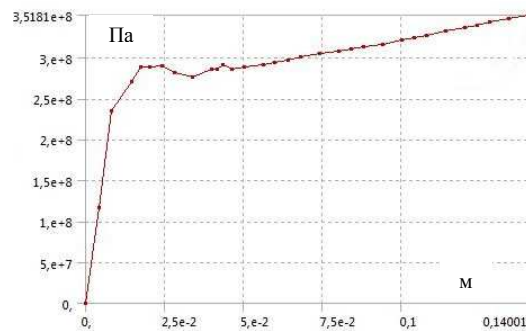


Рисунок 3 – Графік залежності напружень (Па) від прикладених переміщень (м)

На рис. 4, 5 представлено розподіл переміщень та напружень на останньому кроці розрахунку (див. рис. 2). Отже, максимальні переміщення на останньому кроці розв'язання склали приблизно 0,14 м, а максимальні напруження – 352 МПа. Для аналізу результатів було виведено реакції в опорі, вони дорівнюють діючим на автобус навантаженням (рис. 6). Максимальна реакція в опорі складала 45,3 кН, а потрібно було досягти 96 кН. При цьому допустимі переміщення були перевищені вже після прикладання навантаження силою 45 кН.

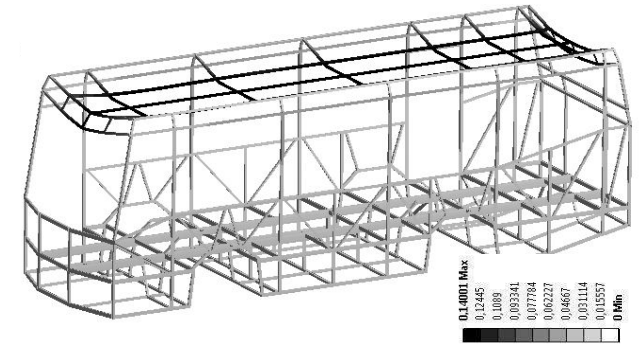


Рисунок 4 – Переміщення на останньому кроці розрахунку, м



Рисунок 5 – Напруження за Мізесом на останньому кроці розрахунку, Па

**Висновки.** Як засвідчують наведені результати, у роботі запропоновано дієвий інструмент комп'ютерного моделювання реакції силової структури автобусів на дію тестових навантажень. Однією з його переваг є те, що він потребує менше комп'ютерних ресурсів, ніж, наприклад, описаний в статті [4], бо виконується в модулі статичних процесів. Створена нелінійна математична модель більш адекватно порівняно із традиційними (лінійними) відображає процес тестових випробувань. На конкретному прикладі проведені розрахунки напружено-деформованого стану каркасу кузова автобуса середнього класу.

Таким чином, результати дали підставу зробити висновок, що досліджувана конструкція каркасу автобуса не відповідає вимогам стандарту FMVSS 220. У подаль-

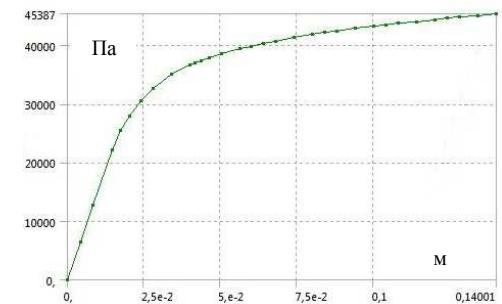


Рисунок 6 – Графік залежності діючої на автобус сили (Па) від прикладених переміщень (м)

ших дослідженнях будуть визначені заходи з підсилення каркасу кузова.

**Список літератури:** 1. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения крупногабаритных пассажирских транспортных средств в отношении прочности их силовой структуры: Правила ЕЭК ООН № 66., дата вступления в силу 01.12.86 2. FMVSS 220: School bus rollover protection, effective April 1, 1977. 3. *Галлагер Р.* Метод скінчених елементів. Основи М. Мир, 1984 г. – 428 с. 4. *Cezary Bojanowski, Bronislaw Gepner, Leslaw Kwasniewski, Christopher Rawl, Jerry Wekezer* Roof Crush Resistance and Rollover Strength of a Paratransit Bus // 8th European LS-DYNA® Users Conference – Strasbourg, 2011. 5. *Орлов, Л.Н.* Оценка пассивной безопасности, прочности кузовных конструкций автомобилей и автобусов: монография / Л.Н. Орлов; НГТУ. Н. Новгород, 2005. – 230 с. 6. *Васидзу К.* Вариационные методы в теории упругости и пластичности. М. Мир, 1987 г. – 542 с. 7. *Ткачук А.В., Васильев А.Ю., Мартыненко А.В., Веретельник Ю.В.* Влияние конструктивных факторов на напряженно-деформированное состояние корпусов гидрообъемных передач // Механіка та машинобудування. – 2004. – №1. – С.78-84. 8. *Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Глуценко Э.В., Ткачук А.В.* Решения задач расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2004. – № 2, т. 2. – С.85-96. 9. *Ткачук А.В., Гладких В.И.* Конечно-элементные модели элементов железобетонных опор // Механіка та машинобудування. – 2006. – №1. – С.51-56. 10. *Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Чепурной А.Д., Орлов Е.А., Ткачук Н.Н.* Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания // Механіка та машинобудування. – 2006. – №1. – С.57-79. 11. *Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Чепурной А.Д., Орлов Е.А., Ткачук Н.Н.* Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания // Механіка та машинобудування. – 2006. – №1. – С.57-79. 12. *Тумасов А.В.* Оценка несущей способности каркаса кузова автобуса по результатам компьютерного моделирования / А.В. Тумасов, Л.Н. Орлов, П.С. Рогов и др. // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева / НГТУ. □ 2012. - № 3 (96). – С. 150-156. 13. *Бондаренко О.О., Бондаренко М.О., Грабовський А.В., Кохановський В.І.* Проведення оцінки стійкості автобусної конструкції аналітичними методами моделювання // Доповідь на XXI міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (MicroCAD-2014), Харків, 21-23 травня 2014 р. – С. 190. 14. *Орлов, Л.Н.* Основы разработки конечно-элементных моделей кузовных конструкций автотранспортных средств. Расчеты на безопасность и прочность: учеб. пособие / Л.Н. Орлов, А.В. Тумасов, Е.В. Кочанов [и др.] / под ред. Л.Н. Орлова; Нижегород. гос. техн. ун-т. им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2009. – 153 с.

*Поступила до редколегії 26.04.2014*

УДК 629.0: 539.3

Дослідження напружено-деформованого стану каркасу кузова автобуса в умовах моделювання його тестового випробування на пасивну безпечність / М.О. Бондаренко / Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Машинознавство та САПР. – Х.: НТУ "ХПІ". - 2014. – № 29 (1072). – С.13-17. – Бібліогр.: 14 назв. ISSN 2079-0075.

В статье рассмотрены виды натурных испытаний пассажирских автобусов на пассивную безопасность и подробно описана методика определения реакции каркаса пассажирского автобуса на тестовое усилие согласно одному из испытаний компьютерными средствами. Решение осуществлено на основе нелинейной математической модели, включающей три вида одновременно действующих нелинейностей (геометрическую, физическую и структурную), с использованием метода конечных элементов. Приведен анализ полученных результатов. В ходе исследований установлены зависимости прогиба силового каркаса от величины действующего усилия. Определено, что первоначальный вариант силовой структуры кузова автобуса не соответствует требованиям пассивной безопасности. На конкретном примере продемонстрирована эффективность компьютерных средств, позволяющих создать виртуальный испытательный стенд на пассивную безопасность автобусов.

**Ключевые слова:** кузов автобуса, оценка прочности, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, нелинейная математическая модель

The article considers the types of field tests of passenger buses on passive safety and describes in detail a method of determining the reaction for bodyshell of passenger bus in the test effort according to one of the tests by computer means. The solution is based on a nonlinear mathematical model, which includes three types of simultaneously active nonlinearities (geometrical, physical and structural) using the finite element method. The analysis of the results are shown. During the research was set dependings on the frame deflection force of the current value of the effort. Was determined that the original version of the power bus body structure does not meet the passive safety. In a specific example was demonstrated the effectiveness of computer tools that allow to create a virtual test bed in the passive safety of buses.

**Keywords:** bodyshell of the bus, estimation of strength, stress-strain state, finite element method, nonlinear mathematical model