УДК 629.341.02
О.З.Горбай, К.Е.Голенко, О.В.Дубянський
Національний університет «Львівська політехніка»

ФОРМУВАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ МОДЕЛІ АВТОБУСА З НАПІВНЕСІВНИМ І НЕСІВНИМ ТИПОМ КУЗОВА

Розглянуто етапи створення кузовів автобусів напівнесівного і несівного типів. Проаналізовано особливості формування напружень в кузовах автобусів на базі автомобільного шасі та варіанту поєднання класичної задньої та низькопідлогової передньої частин кузова автобуса.

Постановка проблеми. Одним з основних відносних оціночних показників ефективності експлуатації міських автобусів виступає міцнісний аналіз каркасу кузова типу Low-entry в умовах статичного навантаження [1]. З точки зору скорочення загальної маси автобуса застосування несівного кузова представляється доцільнішим порівняно з напівнесівним. Ваговий показник рами в каркасі кузова автобуса складає приблизно 30% від загальної маси каркасу. Водночас зазначена третинна різниця повинна бути компенсована іншими посиленими елементами каркасу при дотриманні умови його рівноміцності. В силу існуючої ринкової конкуренції у галузі пасажироперевезень, забезпечуваних приватними та муніципальними автопарками, заводи-виробники змушені наслідувати вже сформовану тенденцію неминучого збільшенням корисного навантаження нових моделей за рахунок скорочення їх власної ваги переходячи до низькопідлогових компоновок у середньому класі міських автобусів. Реалії впровадження даного типу кузовів вимагають і відповідного науково-експериментального вивчення проблем напружено-деформованого стану їх каркасів.

Аналіз відомих досліджень. Додатковим стимулом появи нового типу Low-entry, проміжного між класичними та безпосередньо низькопідлоговими компоновками, являється введення вже діючих в країнах ЄС Правил №107 ЄЕК ООН у нормативні вимоги вітчизняного автобусобудування [2]. Перспективи завоювання ринку автобусних перевезень пасажирів в міському і приміському сполученні дедалі тісніше тепер пов’язано з максимально раціональним використанням внутрішнього об’єму салону та комфортом надання послуг. Показники надійності і довговічності в умовах гострої ринкової конкуренції стимулюють до розробки нових моделей на базі освоєних компоновочних рішень, які зарекомендували себе з позитивної сторони. Симбіоз каркасу кузова класичного виконання і кузова з низьким рівнем підлоги міжосьової і передньої частини у найпопулярнішому класі автобусів іноземних виробників достатньою швидко прогресує [3-5], а в умовах вітчизняного автобусобудування лише починає впроваджуватися [6,7].

Мета досліджень. Означити особливості формування каркасів автобусів з напівнесівним і несівним типом кузова на основі трьохвимірного моделювання з подальшою можливістю представлення методами кінцевих елементів (МКЕ), котрі справедливо вважаються найбільш ефективними при імітації натурної поведінки металоконструкції каркасу кузова при різних режимах навантажень.

Основний матеріал. Очевидно, що основним рушієм глибокої інтеграції МКЕ у робочий процес розробки нових моделей автобусів виступають фінансові та часові обмеження проектувальних та виробничих робіт і безумовно існуючий гострий фінансовий дефіцит етапу проведення реальних випробувань укомплектованих транспортних засобів за допомогою тензометрування. Тому об’єктами досліджень обрано поставлену на виробництво модель БАЗ-А079.23 з спорядженою масою 5540 кг та розподілом мас по осях: 2670 кг на передню вісь, 2870 кг – на задню та перспективну розробку ВАТ «Укравтобуспром» - модель 4289, що характеризується виконанням каркасу кузову в компонувальному рішенні Low-entry.

З математичної точки зору каркас кузова автобуса являє собою тверде тіло, яке при моделюванні найбільше строго можна описати як сукупність геометрично подібних елементів, пов'язаних між собою таким чином, щоб вони утворювали структуру, максимально близьку за формою до реального кузова. Таке представлення становить основу МКЕ і в нашому випадку передбачаються наступні допущення:

1) При виконанні статичних розрахунків матеріал представляється як однорідне суцільне середовище, що володіє ізотропними властивостями. Ізотропія властивостей припускає

©О.З.Горбай, К.Е.Голенко, О.В.Дубянський

незмінність характеристик матеріалу по будь-якому напрямку всередині нього. В розрахунковій моделі в основному використовуються наступні елементи:

- брусом вважаємо тверде тіло, сформоване паралельним переміщенням плоскої геометричної фігури вздовж однієї з осей, причому, один з його розмірів значно більше двох інших;

- стрижнем називаємо брус, який навантажується силами розтягу або стиску, причому сукупність стрижнів, з'єднаних шарнірами, утворює фермову конструкцію;

- балкою визначаємо брус, який в процесі навантаження переважно піддається згину, причому, сукупність балок, жорстко з'єднаних між собою, формують раму;

- оболонкою позначаємо тіло, утворене двома геометрично подібними й близько розташованими поверхнями, причому, якщо останні являються паралельними площини, то ми маємо справу з пластиною.

Слід підкреслити, що формально математична модель автобуса є одночасною сукупністю всіх вище перелічених складових елементів, кожен з котрих в процесі навантаження може проявляти властивості інших або об'єднувати в собі одразу декілька. Відтак, в умовах складного навантаженого стану сукупність всіх складових елементів каркасу кузова утворюють єдину цільну структуру.

2) Вплив зовнішнього облицювання нівелюється в рамках даного обсягу проведених розрахунків, виходячи з двох основних причин:

а) кінцевою метою виконання міцнісного аналізу є перевірка каркасу кузова по допустимих напруженнях, переміщеннях, оптимізація загальної рівноміцності;

- досягнення ефекту монококу у складі двигуна як міцнісної ланки, виконуючої розвантажувальну та замикаючу функції;

- ефект абсолютного сприйняття навантажень та їх подальшої «паразитної» передачі облицювальними листами та вікнами на інші елементи каркасу кузова у випадку застосуванні клейових з'єднань;

б) наявність модифікацій зі зварним з'єднанням облицювання з каркасом та гумовими ущільнювачами встановлення вікон в умовах експлуатації машин автопарками, позбавлених обладнання для виконання клейових робіт.

Варто глибше дослідити останню причину, оскільки згідно з даними існуючих наукових джерел [8] при сучасних клейових технологіях з'єднань за рахунок більш ефективного поглинання навантажень середній рівень напружень по всьому каркасу кузова може скорочуватись на 8-11% порівняно з традиційними методами закріплення облицювання. В такому випадку, факт існування різних модифікацій автобусів в рамках однієї моделі, наприклад без застосування клейових з'єднань, вимагає забезпечення каркасом кузова належного запасу міцності та жорсткості для компенсації часткового послаблення.

3) На етапі формування розрахункової моделі каркасу кузова наближено апроксимувались місця сходження різних стрижнів, тобто застосоване програмне 3D-середовище автоматично враховувало перехідні технологічні елементи, жорсткі вставки, оболонкові ефекти, продиктовані сполученням різного сортаменту у вузлах, депланацію відповідних поперечних січень, тощо. Дані геометричні особливості запозичені з інтегрованої бази даних застосованого програмного забезпечення, котрі попередньо доопрацьовуються у відповідності зі специфікою сортаменту кузова досліджуваної моделі автобуса. Таким чином, рівень отриманої апроксимації стрижневої моделі каркасу кузова максимально наближується до об'ємних, так званих solid-моделей, які в основному застосовуються для локальних розрахунків (елементів вузлів, агрегатів, рідше зборок, тощо).

4) Розрахунок проводився лише для статичного навантаження, яке являється основою оптимізації показників міцності каркасів кузовів нових моделей автобусів та торкається особливостей процесів, що мають місце при динамічних випробуваннях.

За виключенням вищезазначених допущень можна сказати, що МКЕ для конструкції, яка складається з набору стрижнів, не вносить додаткових помилок, оскільки при апроксимації переміщень у кінцевому елементі стрижня використовується точне рішення, що остаточно забезпечує точність результатів для всієї системи в цілому. В силу високого рівня пристосовуваності під складання технічної документації, робочих креслень, бібліотеки марок сталей та типових сортаментів труб, що застосовуються у вітчизняному автобусобудуванні,

виконання розрахунків доцільно виконувати на програмному забезпеченні APM WinMachine Structure 3D [9].

5) Статичний розрахунок заснований на матричному методі переміщень, метою якого є визначення невідомих переміщень вузлів конструкції. За основу взято рівняння рівноваги:

$$F = K \cdot x ,$$

де: K - матриця жорсткості системи;

F - вектор зовнішніх силових факторів;

x - вектор невідомих вузлових переміщень

Розмірність системи представляє собою кількість ступенів вільності конструкції. У загальному випадку в кожному вузлі є 6 ступенів вільності, тобто 3 лінійних переміщення і 3 кути повороту. Після рішення даної системи, тобто знаходження переміщень, визначаються всі інші невідомі параметри конструкції: деформації, зусилля в елементах, напруження, тощо. У статичному розрахунку схема конструкції вважається недеформованою, при цьому поздовжні сили у стрижнях та зусилля у площині пластин не впливають на величини моментів згину.

В програмному середовищі методу кінцевих елементів розрахункову модель каркасу кузова рамного типу моделі БАЗ-А079.23 представдено просторовою замкнутою стрижневою структурою, яка складається з 399 вузлів, що сполучають 596 стрижнів, представлених 9-ма видами сортаменту, виготовленого з сталі 10. Рамного типу каркас кузова умовно розділимо на наступні елементи:

- рамну ферму шасі вантажного авто виробництва TATA (рис.1), представлену двома поздовжніми лонжеронами (200х60х5 мм), сполученими п’ятьма поперечинами (80х60х3 мм), дві з котрих формують мотовідсік в передній частині автобуса, зварений з труб 40х28х2,5 мм (рис.2);
- надбудову кузова, що виконується з профілю 60х40х3 мм та 40х40х2 мм, в якій. пройми передніх та задніх дверей в нижній частині оснащені зварними фермами сходів з профілю 28х25х1,5 мм, а зверху замикаються надвіконними брусами 28х40х2 мм.

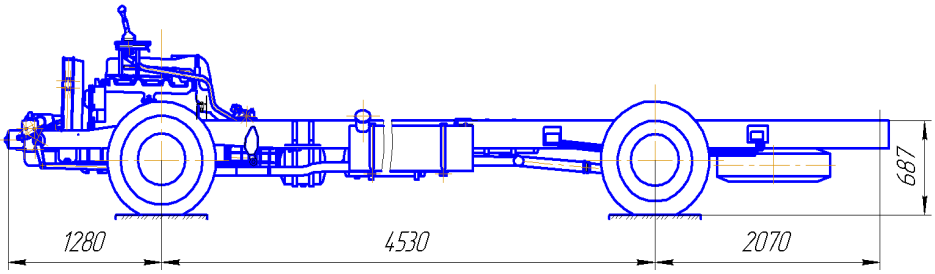
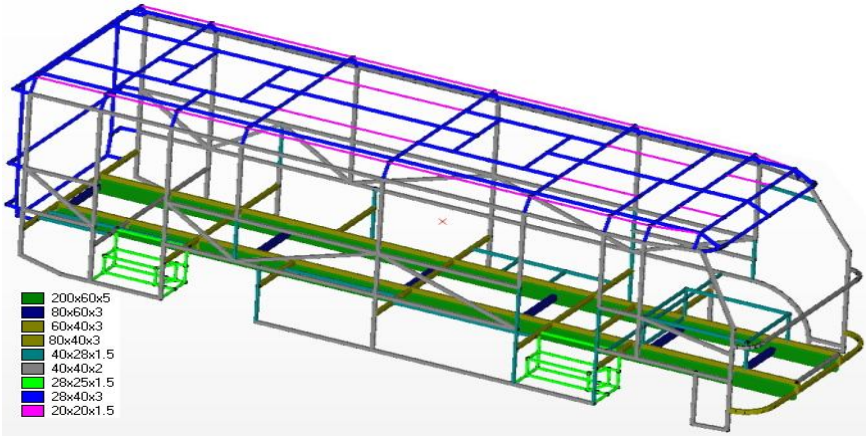


Рис.1 Параметри шасі вантажного автомобіля виробництва TATA, на базі якого виготовлено модель автобуса (БАЗ-А079.23)

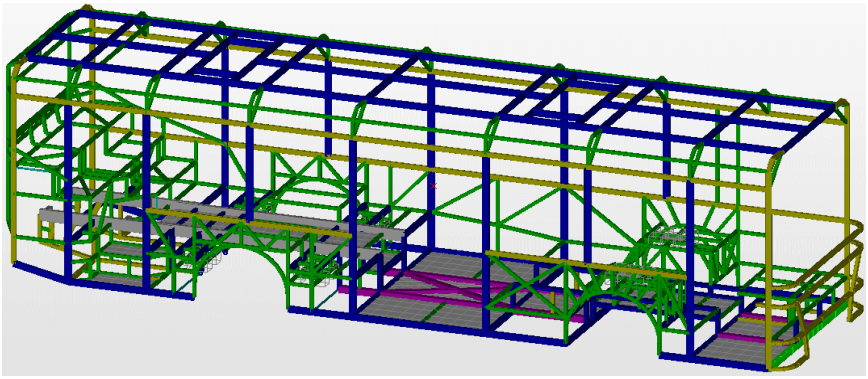
Забудова передньої частини автобуса виконана з аналогічного профілю, окрім поперечної замикаючої боковини з труби 60х40х3 мм, що слугує основою кріплення фронтальної маски з бампером та решта вузлів й агрегатів переднього звису. Задня ферма представлена трьома поперечними трубами 28х40х3 мм, розміщеними на рівні лонжеронів підлоги, над- та підвіконного брусів. Вертикальні замикаючі стійки, що формують пройму заднього вікна та багажного відсіку, виготовлені з аналогічного профілю. Каркас даху складається з восьми шпангоутів 28х40х3 мм, що переламуються у ребрах сходження з боковиною та сполучаються з відповідними міжвіконними стійками з профілю 40х40х2 мм, формуючи нерозривні контури силових ліній секцій кузова автобуса. Зазначені ребра, виконані у вигляді двох паралельних брусів через всю довжину даху, звужуються, починаючи від другої міжвіконної стійки в передній частині автобуса, що продиктовано донорством від шасі вантажінки. Крім того, конструкція даху передбачає наявність двох вентиляційних люків, встановлених у відповідні пройми.

На відміну від моделі, представленої на рис.1, в моделі 4289 є заднє розташування двигуна, і допускає осьове навантаження на ведучу вісь не більше 11,5 т.

Розрахункова модель несівного каркасу кузова, на базі котрої виконувалась оцінка напружено-деформованого стану, являє собою просторову замкнуту стрижневу конструкцію, що структурно представлена на рис.2 б.



а)



б)

Рис.2. Розрахункові 3D-модель каркасу кузова автобусів моделей А079.23 і 4289 для оцінки напружено-деформованого стану у програмному середовищі методу кінцевих елементів

Боковини складаються з віконного та підвіконного поясів, розділених поперечинами, що входять до складу силових контурів секції автобуса, представлених шпангоутами даху, міжвіконними стійками (80х40х3 мм) та вище зазначеними поперечинами основи. Основний пояс складається виконано у вигляді ферми, сформованої з нижньої обв'язки та брусів 40х3 мм, котрі розбивають площу боковини на трикутні контури з метою збільшення її крутильної жорсткості та підсилення сильно навантажених зон колісних арок та просторових забудов основи, відведених під кріплення мостів й підвісок – акцепторів навантажень всієї конструкції. На відміну від лівої боковини, права додатково посилена трубами 80х40х3 мм по периметру дверних пройм. Обидві боковини характеризуються міцними порогами нижньої обв'язки з профілю 80х40х3 мм, що розриваються контурами колісних арок (40х3 мм), та посиленим підвіконним брусом (60х40х3 мм), котрий обвиває каркас кузова по всьому його периметру включно з забудовою передка, причому по лівій боковині він конструкційно виконаний нерозривним і підпирає віконні пройми. Верхня частина боковин являє собою початок основи каркасу даху, що у випадку для типу кузова Low-entry частково виконує несівну функцію, тому шпангоути даху переходять у міжвіконні стійки боковин розділено по трубах 40х30 мм для розгалуження силових потоків ребра сходження боковин з дахом та досягнення «дублюючого ефекту». Крайні передня та задня вертикальні стійки, спільні з забудовою каркасу передка та задка, виконані з труби 60х40х3 мм.

Каркас даху являє собою просторову розгалужену ферму, представлену шпангоутами 80х40х3 мм та трьома поздовжніми брусами, центральною та двома боковими симетрично розташованими з аналогічного сортаменту, що сумісно з каркасами люків складають замкнений силовий контур. Вузли сходження боковин й даху виконані розгалуженими по всій довжині кузова автобуса й мають відмінний профіль 60х40х3 мм лише по краях – в зоні стикування каркасів передка та задка (рис.3). Для додаткового підсилення ребер, спільних для боковини й даху, вказані дубльовані вузли обв'язані поздовжнім брусом 40х30, що дозволяє значною мірою розвантажити надвіконний брус боковин та полегшити експлуатації склопакетів в умовах знакоперемінних навантажень

Каркас даху являє собою просторову розгалужену ферму, представлену шпангоутами 80х40х3 мм та трьома поздовжніми брусами, центральною та двома боковими симетрично розташованими з аналогічного сортаменту, що сумісно з каркасами люків складають замкнений силовий контур. Вузли сходження боковин й даху виконані розгалуженими по всій довжині кузова автобуса й мають відмінний профіль 60х40х3 мм лише по краях – в зоні стикування каркасів передка та задка (рис.3). Для додаткового підсилення ребер, спільних для боковини й даху, вказані дубльовані вузли обв'язані поздовжнім брусом 40х30, що дозволяє значною мірою розвантажити надвіконний брус боковин та полегшити експлуатацію склопакетів в умовах знакоперемінних навантажень.

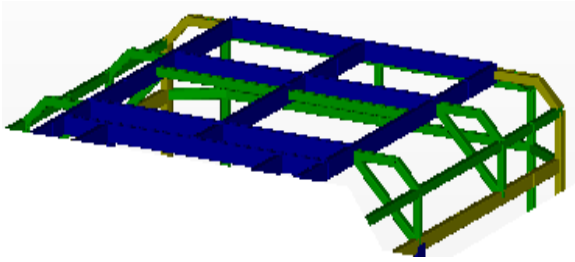


Рис. 3. Просторове представлення розгалужених вузлів сходження боковини з дахом

Просторовий каркас передньої та задньої частини функціонально підпорядкований вимогам по встановленню таких агрегатів, як склоочисники, освітлювальна техніка, елементи кріплення склопластикового облицювання, тощо. Водночас, його структура труб (40х30, 60х40х3 мм) зав'язана у вузли, спільні з боковинами та дахом для нерозривності силових ліній та посилена для забезпечення необхідної міцності в разі фронтального удару.

Певний комерційний інтерес представляють дрібносерійні туристські автобуси з несівними кузовами в котрих:

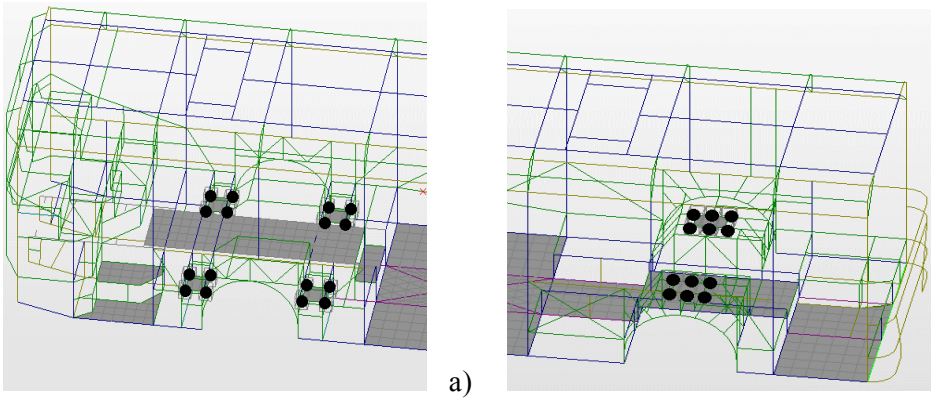
- нижній рівень відведено під місткі багажники в міжколісній базі, які виконані в основному з труб невеликого січення (до 60х40х3);
- центральний рівень представлений потужними лонжеронами несівної структури, що спадають до низу у задньому звисі для забезпечення основи мотовідсіку;
- верхній рівень відведено під пасажирський салон, ефективна площа котрого максимально заповнена виключно посадковими місцями, а каркас даху за своєю міцністю розрахований виключно на виконання Правил №66 ЄЕК ООН.

Для статичного розрахунку автобуса на міцність методом кінцевих елементів необхідним є представлення мас всіх складових агрегатів, вузлів та систем автобуса у вигляді зосереджених навантажень, прикладених у конструктивно визначених вузлах розрахункової моделі, що відповідають дійсним точкам їх кріплення. Формування крайових умов аналізу міцності каркасу кузова при режимі згину виконано на основі вхідних даних, де всі задіяні у розрахунку маси елементів автобуса розділено на складові від вузлів, агрегатів, елементів шасі, кузова та корисного навантаження. При цьому в розрахунку приймається згідно з ТУ величина повної маси автобуса 14000кг за виключенням непідресорених її складових, до котрих належать колеса, маточини та рухомі елементи підвіски.

Оскільки більшість вузлів або агрегатів формують відповідні системи зі спільними точками кріплення, котрі визначаються робочими кресленнями, для оптимізації прикладання навантажень до розрахункової моделі каркасу кузова виконано їх групування по номерам складових та обчислено питоме навантаження на опору від кожної системи. Питоме навантаження визначалось як відношення маси системи, збільшеної кратно сумарному коефіцієнту динамічності (Сд=2,5), до кількості опор – точок кріплення по каркасу кузова.

Окрім введення сумарного коефіцієнту динамічності у крайові умови режиму згину, характерною є також і особливість прикладання в'язей до каркасу кузова. Як вище зазначалось, непідресорена маса виключена з розрахункової моделі, відтак відсутні й маточини коліс, до котрих традиційно прикладаються в'язі. По причині негативного ефекту, обумовленого поглинанням пружними елементами підвіски частини діючих на кузов навантажень в'язі перенесено у точки кріплення фланців пневмобалонів до кузова. Таке рішення дозволяє отримати дані безпосередньо про поведінку каркасу кузова без додаткових демпферів та акцепторів навантажень, хоча можна прогнозувати прояв дещо вищих значень напружень та деформацій порівняно з традиційно прийнятими схемами.

Відтак, розрахункова модель фіксується в'язями з обмеженнями переміщень та обертань по осях X,Y,Z у 4-х вузлах кожної з чотирьох площадок кріплення фланців пневмобалонів задньої (рис.4а) та 6-ти вузлах кожної з двох площадок кріплення фланців пневмобалонів передньої підвіски (рис.4б)



а) б)

Рис.4. Схема прикладання в'язей до точок кріплення фланців пневмобалонів з відповідними фермами каркасу: а) задня підвіска; б) передня підвіска

Загалом розрахункова модель являє собою просторову конструкцію каркасу кузова, що складається з 7 сортаментів стрижнів загальною кількістю 1769. Вона спирається на 28 опор і має 1569 вузлів. Площа салону, відведена під стоячі місця, розбита на 540 сталевих пластин, серед котрих на 4-х вузлові приходиться 388, на 3-х вузлові – 152. Сумарна кількість точок прикладання навантажень складає 769. Розташування координат положення центру мас (ЦМ) змодельованого каркасу кузова відповідає відстані 4595 мм від переднього бамперу по довжині; 943 мм від рівня підлоги по висоті; 7 мм зміщення по ширині в лівий по ходу руху автобуса бік від осі симетрії. Фактично ЦМ припадає на центральну накопичувальну площадку і знаходиться ближче до задніх стійок середніх дверей, що може спричинити утворення підвищених напружень в цій зоні

Висновки. При переході до нелінійного розв'язку рівнянь рівноваги статичного навантаження у застосованому ПЗ зафіксовано розбіжність між отриманими результатами по основним оціночним критеріям в межах до 2-8%. Дана точність досягнена при закладанні у нелінійний розрахунок 6 ітерацій. Таким чином, приходимо до висновку, що за своєю конфігурацією розрахункова модель каркасу кузова достатньо ефективно піддається лінійному алгоритму обчислення, потребує менших ресурсів від ЕОМ та може бути також застосована за даною методикою для аналізу напружено-деформованого стану каркасу автобусного кузова [10].

Література

1. 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)
2. ДСТУ UN/ECE R 107-00:2008 Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження двоповерхових пасажирських транспортних засобів великої місткості стосовно загальної конструкції (Правила ЕЭК ООН № 107-00:1998, IDT.
3. Low-entry city buses from HESS AG. http://www.hess-ag.ch/en/busse/ linienbusse/ lowentry.php.
4. Solaris Urbino 12 low-entry. http://bus.tedom.eu/download/3/104/TEDOM-L12-G.pdf.
5. Volvo B7R Low Entry www.volvobuses.com/bus/global/ en-gb/products/Intercity.
6. Автобус „Богдан" А09280 повернувся з випробувань у Польщі. http://proautobus.com/?p=539.
7. ПКЦ "Оптима"– новые автобуси ЭТАЛОН, ПАЗ, БОГДАН. http://optima.dn.ua /новые-автомобили/богдан/городской/ а-09280.
8. Вдовин, Д. С. Разработка методики проектирования несущих систем колесных машин, выполненных с использованием сварных точечных и клеесварных соединений. Автореферат дис. Москва 2007.с.24.
9. Замрий, А. А. Проектирование и расчет методом конечных элементов в среде АРМ Structure3D: учебное пособие. - М.: АПМ, 2010. - 376 с.
10. Голенко К. Е., Горбай О.З., Крайник Л.В. Комп'ютерне моделювання і аналіз напружено-деформованого стану каркасу кузова автобуса типу low-entry//Вісник НУ «Львівська політехніка» №614. -2008. с.63-69.