

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 004.92:621.01

Л. О. НЕДУЖА^{1*}, А. О. ШВЕЦЬ^{2*}

^{1*}Каф. «Будівельна механіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (067) 810 51 65, ел. пошта nlorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

^{2*}СКТБ МСУБ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (050) 214 14 19, ел. пошта angela_shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-8469-3902

ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ARM WINMACHINE ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ТА РОЗРАХУНКАХ У МАШИНОБУДУВАННІ

Мета. Для проведення досліджень на всіх етапах проектування, розробки, експлуатації, визначення остаточного ресурсу (а саме: попереднього дослідження, вибору принципів дії, розробок ескізного та технічного проектів, їх оптимізації, підготовки конструкторської документації та керуючої інформації для автоматизованих виробництв, всебічного інженерного аналізу) необхідно використовувати найсучасніші комп'ютерні технології. Їх використання дозволяє не лише відтворювати дані й відомості тим чи іншим способом, а також надає можливість ефективно та безпосередньо взаємодіяти з інформаційним об'єктом, що створюється або демонструється. Метою дослідження є аналіз теоретичних підходів та механізмів здійснення практичних розрахунків у галузях промисловості для вирішення сучасних задач за допомогою програмних комплексів. **Методика.** При виконанні інженерних розрахунків, пов'язаних із аналізом міцності машин, механізмів, конструкцій на практиці використовують як аналітичні, так і чисельні методи. Найбільшого поширення при аналізі напружено-деформованого стану моделей об'єктів, отримання їх динамічних характеристик і характеристик стійкості при постійних та змінних режимах зовнішнього навантаження отримав метод кінцевих елементів, який реалізовано в багатьох відомих й широко розповсюджених програмних продуктах, що забезпечують міцнісний розрахунок моделей машин, механізмів, конструкцій. **Результати.** Обґрунтовано використання розглянутого сучасного програмного комплексу для проектування деталей машин й різноманітних видів їх з'єднань та міцнісного аналізу конструкцій. Кольорові карти розподілу напружень, переміщень, внутрішніх зусиль, коефіцієнтів запасу міцності та ін. дозволяють дуже точно і швидко визначати найбільш небезпечні місця в конструкції. Програма забезпечує можливість «заглянути» всередину елементів та побачити розподіл виникаючих внутрішніх силових чинників. **Наукова новизна.** Розглянуто недосліджені на даний період аспекти, що пов'язані з сучасним станом та перспективами розвитку промислового виробництва, використання програмного комплексу при проектуванні та розрахунках у машинобудівній галузі. Розроблено обґрунтування застосування програмного комплексу для розв'язання задач, які спрямовані на використання результатів досліджень для різних практичних завдань у конкретних галузях машинобудування. **Практична значимість.** У порівнянні з іншими програмними комплексами популярність даного полягає у легкому засвоєнні системи, швидкому впровадженні як у навчальний, так і у виробничий процес. Організаційна структура й «дружній» графічний інтерфейс, доступність мови роблять вивчення та

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

застосування програми дуже зручним. Ці та інші чинники реально скорочують час на реалізацію проектів, підкреслюють актуальність та практичне значення програмного комплексу, що повинно бути гідно оцінено його користувачами при проведенні подальших досліджень.

Ключові слова: сучасний програмний комплекс; машинобудування; машина; механізм; конструкція; інженерний розрахунок; міцність

Вступ

Промислове виробництво є однією з головних ланок національної економіки будь-якої країни, яка забезпечує життєві інтереси, економічну безпеку, соціальний, культурний рівень населення, визначає технічний та економічний потенціал [15, 18].

Однією із найскладніших та найвідповідальніших галузей промисловості є машинобудування. Його частка в загальному обсязі промислового виробництва, а також розміри експорту машинобудівної продукції відносять до показ-

ників, які найбільш точно визначають загальний рівень економічного розвитку держави. В сучасних умовах машинобудуванню належить важлива роль в прискоренні науково-технічного прогресу, оскільки значною мірою визначає його загальні напрями та є основою економіки, грає вирішальну роль у створенні та оновленні її матеріально-технічної бази.

Машинобудування – це провідна галузь, частка якої за вартістю становить близько 1/3 світової промислової продукції (рис. 1, а) [15].

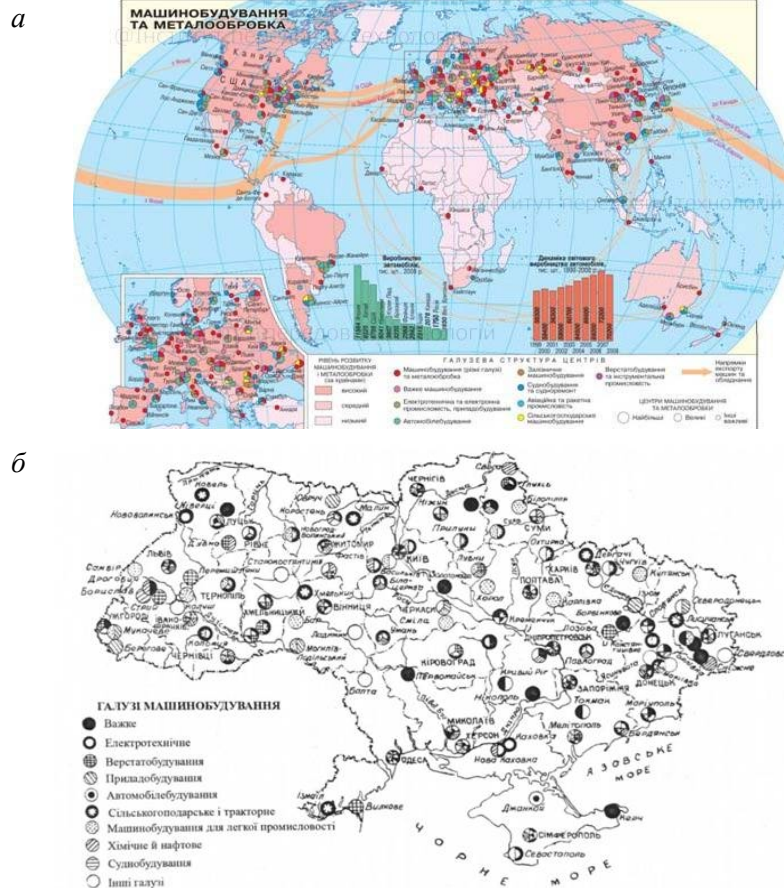


Рис. 1. Стан географії розвитку:
а – машинобудування та металообробки світу;
б – галузей машинобудування України

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Міжгалузевий господарський комплекс України об'єднує систему науково-дослідних, конструкторсько-технологічних організацій, підприємств, продукція яких має загально економічне призначення, виробничу та експлуатаційну спільність. На розміщення підприємств різних галузей машинобудування впливають такі фактори, як рівень розвитку науки, наявність відповідних трудових ресурсів, сировини, споживача (рис. 1, б) [18].

Мета

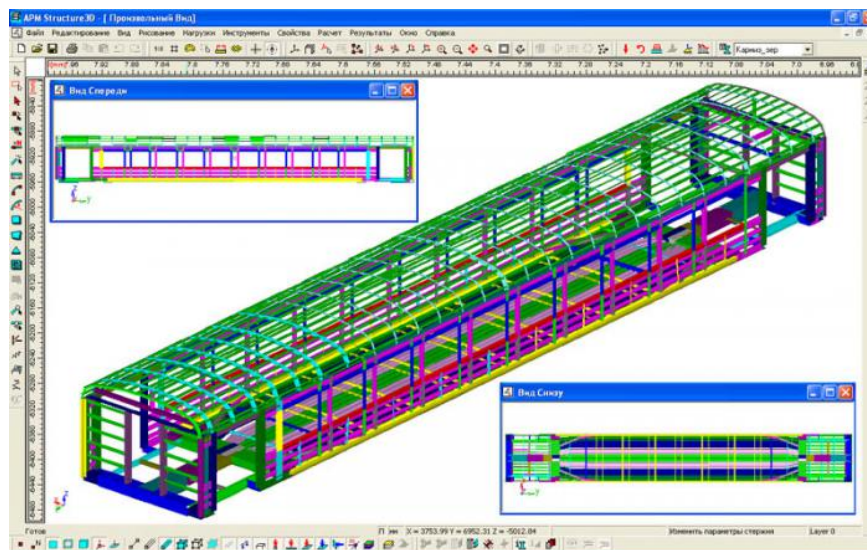
У наш час – час стрімкого розвитку комп'ютерних інформаційних технологій – жодна галузь народного господарства для виконання складних інженерних розрахунків та прийняття правильних рішень не може обійтись без застосування сучасних програмних комплексів. Для виконання досліджень на всіх етапах проектування, розробки, експлуатації, визначення остаточного ресурсу, а саме: попереднього дослідження, вибору принципів дії, розробок ескізного та технічного проектів, їх оптимізації, підготовки конструкторської документації та керуючої інформації для автоматизованих виробництв, всебічного інженерного аналізу необхідно використовувати найсучасніші комп'ютерні технології.

Метою дослідження є аналіз теоретичних підходів та механізмів здійснення практичних розрахунків у галузях промисловості для вирішення сучасних завдань за допомогою програмних комплексів.

Актуальність. У сучасному світі комп'ютерні інформаційні технології стрімко проникають в усі сфери діяльності – сьогодні успіх буде мати тільки та галузь народного господарства, тільки той навчальний заклад чи комерційна фірма, які володіють найсучаснішими комп'ютерними технологіями. За останні десятиріччя вони зазнали такого глобального поширення, що зараз уже важко уявити життя та виробничу діяльність людини без них.

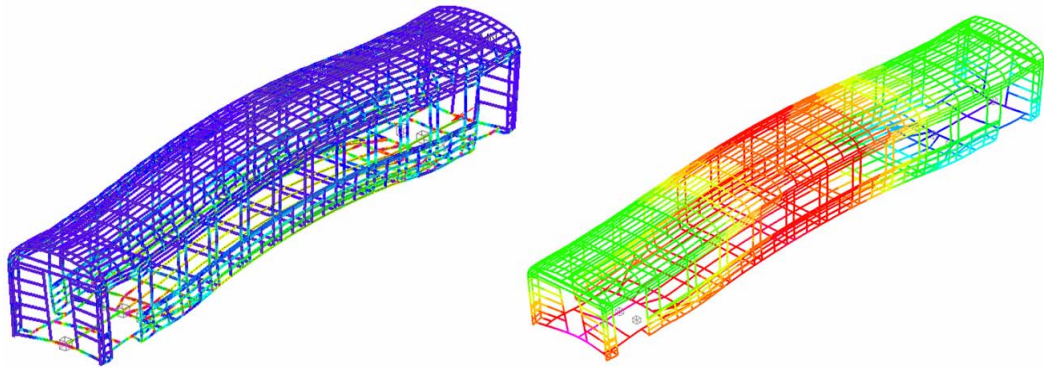
На цьому етапі можна без особливих труднощів навести приклади використання інформаційних технологій в усіх галузях: від освіти до менеджменту. Значний прогрес досягається в галузі освіти із впровадженням відповідних комп'ютерних технологій, які зможуть зробити процес здобуття знань доступним, дистанційним, гнучким, індивідуальним [13]. Не стоїть осторонь і машинобудування, зокрема транспортне (рис. 2), оскільки складність інженерних розрахунків та прийняття правильних рішень вимагає все більшого застосування сучасних комп'ютерних комплексів і технологій [1, 7]. Їх використання дозволяє не лише відтворювати дані й відомості тим чи іншим способом, а також надає можливість ефективно та безпосередньо взаємодіяти з інформаційним об'єктом, що створюється або демонструється. Ці та багато інших завдань вирішують за допомогою сучасних інформаційних технологій, що підтверджує актуальність їх застосування.

а



РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

б, в



г

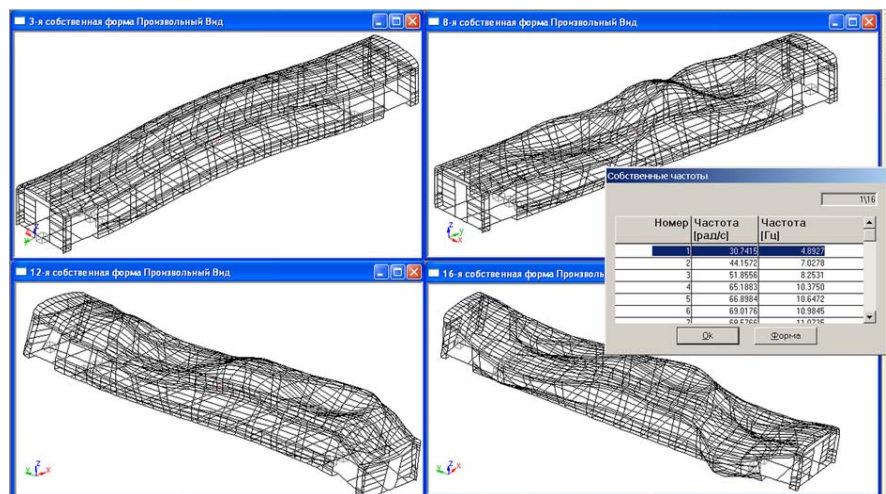


Рис. 2. Кузов вагона електропоїзда:

a – розрахункова модель; *б* – діаграма напружено-деформованого стану;
в – діаграма розподілу сумарних лінійних переміщень; *г* – діаграми частот власних коливань

Програмні комплекси різного призначення, вміло застосовують сучасні комп'ютерні технології (математичне моделювання, бази даних та знань, комп'ютерні мережі, експертні системи та системи прийняття рішень, мультимедійні інформаційні технології, інформаційні ресурси мережі Internet) на всіх етапах проектування, розробки, експлуатації, для визначення остаточного ресурсу, а саме: попереднього дослідження, вибору принципів дії, розробок ескізного та технічного проектів, їх оптимізації, підготовки конструкторської документації та керуючої інформації для автоматизованих виробництв, всебічного інженерного аналізу тощо [14, 23–25].

Методика

Під час виконання інженерних розрахунків, пов'язаних з аналізом міцності машин, механізмів, конструкцій на практиці використо-

вують як аналітичні, так і числові методи [4, 19, 22].

Найбільш поширеним під час аналізу напружень та деформацій є метод кінцевих елементів (МКЕ) [2, 11, 17, 21]. Перші його розробки були виконані в 50-х роках ХХ ст. для вирішення завдань опору матеріалів. Як відомо, опір матеріалів є наукою про інженерні методи розрахунків елементів машин, механізмів, споруд на міцність, жорсткість, стійкість та належить до фундаментальних дисциплін загально інженерної підготовки фахівців з вищою технічною освітою. Це перша дисципліна, яка встановлює зв'язок між фундаментальними науковими дисциплінами (фізикою, математикою, теоретичною механікою) та прикладними задачами й методами їх розв'язання, що виникають під час проектування машин, механізмів, будівельних конструкцій [8].

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Під час експлуатації машин та споруд їхні елементи так чи інакше зазнають дії різних сил – навантажень. Для забезпечення нормальної роботи конструкція повинна задовольняти необхідним умовам міцності, жорсткості та стійкості:

– міцність – це здатність елементів конструкції витримувати певне навантаження, не руйнуючись;

– жорсткість – це здатність елементів конструкції спричиняти опір деформуванню від дії зовнішнього навантаження, при чому деформації не повинні перевищувати допустимих;

– стійкість – це здатність елементів конструкцій зберігати певну початкову форму пружної рівноваги.

Основна задача опору матеріалів – задача забезпечення міцності конструкції. Вона зустрічається у вигляді прямої та зворотної задачі: пряма задача (проектувальний розрахунок) – знайти надійні (з погляду міцності) розміри елемента машини, конструкції чи споруди так, щоб він зміг витримувати задане навантаження протягом потрібного строку при мінімальній вартості; зворотна задача (перевірний розрахунок) – перевірити, чи зможе елемент вже існуючого механізму або конструкції задовольнити умови міцності у випадку зміни заданого навантаження, чи він потребує заміни або зміцнення [8].

Завдяки вченим, починаючи з 1970 р., МКЕ стає все більш популярним серед інженерів всіх спеціальностей; тоді ж були розроблені перші програмні комплекси, в яких реалізувався метод кінцевих елементів. Зараз це основний метод обчислювальної механіки, що лежить в основі переважної більшості сучасних програмних комплексів, призначених для виконання інженерних задач в різноманітних галузях [2, 11, 17, 21].

Отже, підвищення якості створюваного механічного устаткування й конструкцій необхідно пов'язувати, насамперед, із зменшенням їх ваги і вартості, збільшенням надійності та покращенням низки інших характеристик. Наразі актуальною є проблема поєднання в процесі проектування двох взаємовиключних тенденцій: економії матеріалу, з одного боку, і забезпечення необхідних характеристик міцності конструкцій, з іншого.

Все це можна забезпечити за рахунок використання комп'ютерних технологій. Сьогодні не можна створити якісне, надійне та конкурентоспроможне обладнання без всебічного інженерного аналізу проєктованих об'єктів за допомогою сучасних програмних засобів і прийняття на його основі грамотних конструктивних рішень. Під інженерним аналізом розуміють, насамперед, дослідження проєктувальником напружено-деформованого стану (НДС) моделей проєктованих об'єктів, отримання їх динамічних характеристик і характеристик стійкості при постійних та змінних режимах зовнішнього навантаження. Для оцінки НДС потрібно знати розподіл напружень в елементах проєктованих машин та конструкцій, величини переміщень окремих точок як при статичному характері зовнішнього навантаження, так і в умовах дії навантажень, що змінюються в часі.

На сьогодні, у зв'язку з активним впровадженням в інженерну практику обчислювальної техніки, найбільш ефективним наближеним методом розв'язання прикладних задач такого класу механіки є метод кінцевих елементів (МКЕ) [5, 10, 20].

Ключова ідея МКЕ полягає в тому, що суцільне середовище (модель конструкції) замінюється дискретною шляхом розбиття її на кінцеві елементи (КЕ). Поведінка кожного середовища описується за допомогою окремого набору функцій, які являють собою напруження й переміщення. Кінцеві елементи з'єднуються вузлами; взаємодія КЕ один з одним здійснюється тільки через вузли. Розташовані певним чином, залежно від конструкції об'єкта, та закріплені відповідно до граничних умов, кінцеві елементи дозволяють адекватно описати все різноманіття моделей деталей і конструкцій [9].

До кінцевого елемента можуть бути прикладені зовнішні навантаження (зосереджені та розподілені сили й моменти), які приводяться до вузлів цього елемента і носять назву вузлових навантажень.

Під час розрахунків методом кінцевих елементів спочатку визначаються переміщення вузлів моделі. Величини внутрішніх зусиль в елементі пропорційні переміщенням у вузлах елемента. Коефіцієнтом пропорційності виступає квадратна матриця жорсткості елемента,

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

кількість рядків якої дорівнює числу ступенів свободи елемента (у загальному випадку це є добуток числа ступенів свободи у вузлі на кількість вузлів елемента). Всі інші параметри кінцевого елемента, такі як внутрішні зусилля, напруження, поле переміщень і т. ін. обчислюються на підставі його вузлових переміщень.

Метод кінцевих елементів дозволяє практично повністю автоматизувати розрахунок механічних систем, хоча, як правило, вимагає виконання значно більшої кількості обчислювальних операцій порівняно з класичними методами механіки. Сучасний рівень розвитку обчислювальної техніки відкриває широкі можливості для впровадження МКЕ в інженерну практику [9].

МКЕ реалізовано в багатьох відомих й широко розповсюджених програмних продуктах, що забезпечують міцнісний розрахунок моделей машин, механізмів, конструкцій.

Для повноцінного кінцево-елементного аналізу необхідно:

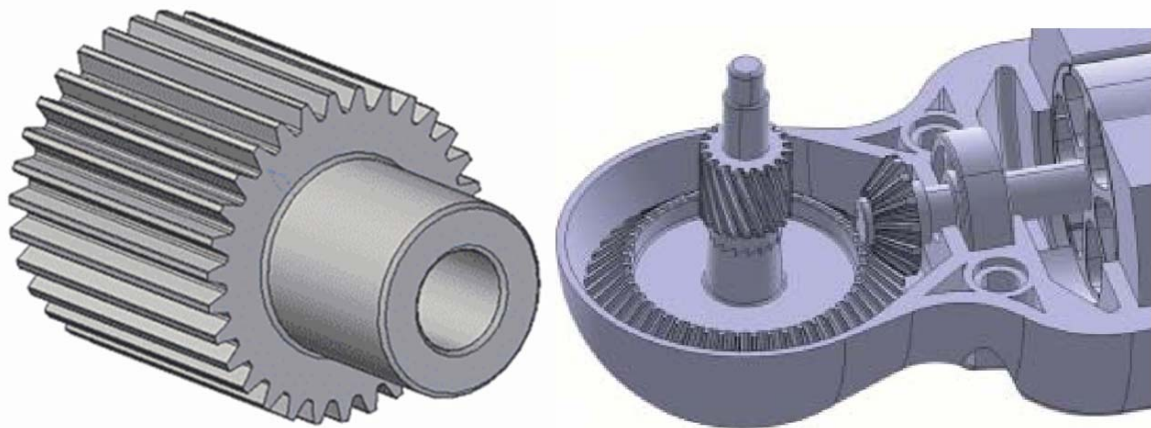
- вибрати тип кінцевих елементів (для всієї моделі або її окремих частин), за допомогою яких буде адекватно змодельована реальна конструкція;

- побудувати модель проєктованого об'єкта в тривимірному просторі;

- виконати розбиття моделі на кінцеві елементи;

- виконати весь комплекс необхідних обчислювань;

a



– візуалізувати отримані результати й коректно інтерпретувати їх з метою прийняття правильних конструкторських рішень.

Результати

В сучасних умовах для підвищення ефективності роботи, досягнення найвищої якості та техніко-економічного рівня результатів серед багатьох сучасних програмних комплексів широко застосовують АРМ WinMachine – це наукомісткий програмний продукт, створений на базі сучасних інженерних методик проєктування, числових методів механіки, математики та моделювання, який гармонійно поєднує досвід попередніх поколінь конструкторів, інженерів-механіків та інших фахівців з можливостями комп'ютерної техніки, максимально адаптований для робіт з проєктування та конструювання об'єктів машинобудівної та будівельної галузей [1, 9].

Програмний комплекс АРМ WinMachine надає користувачеві широкі можливості по створенню моделей довільних тривимірних машин, механізмів, конструкцій (рис. 3). Моделі складаються зі стержневих, оболонкових й твердотільних елементів; моделі конструкцій оболонкового й твердотільного типів можна імпортувати з будь-яких сторонніх тривимірних графічних редакторів, використовуючи стандартний формат обміну.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

б

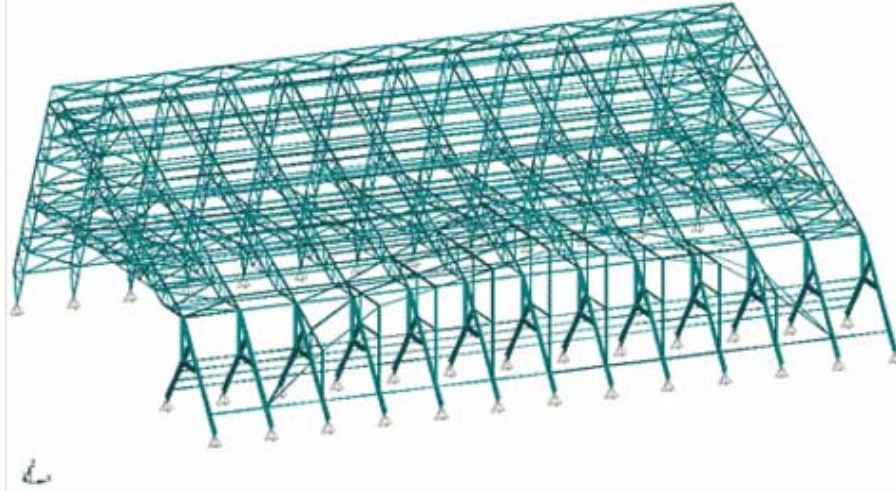


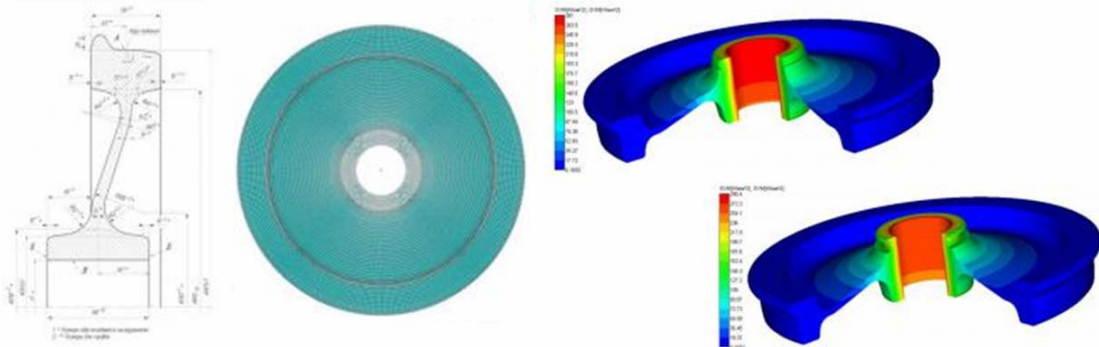
Рис. 3. Приклади створення:

а – твердотільних моделей; б – моделі несучої конструкції спортивного комплексу

Система ARM WinMachine складається з набору модулів [1, 9]:
 – ARM Graph – плоский креслярсько-графічний редактор для оформлення

конструкторської документації, що має зручні функції параметричного завдання геометричних об'єктів (рис. 4) [12, 16];

а



б

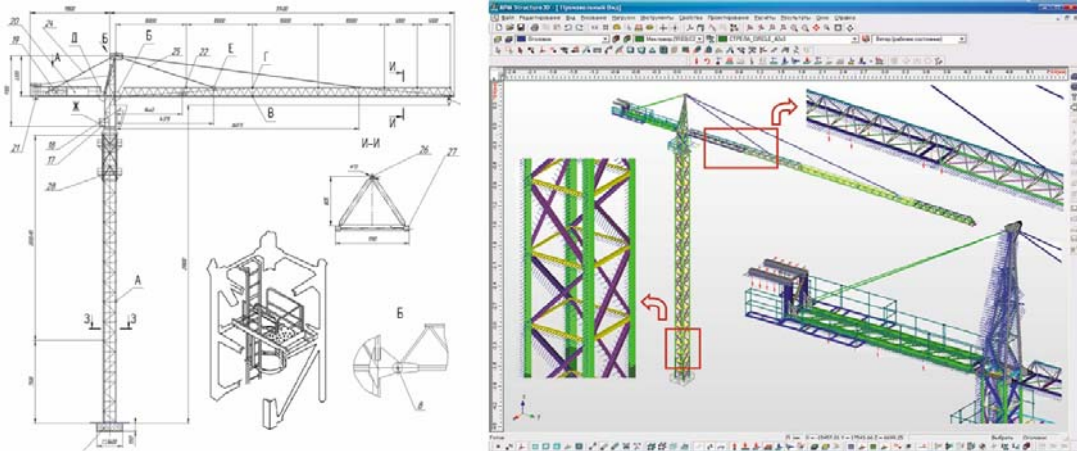
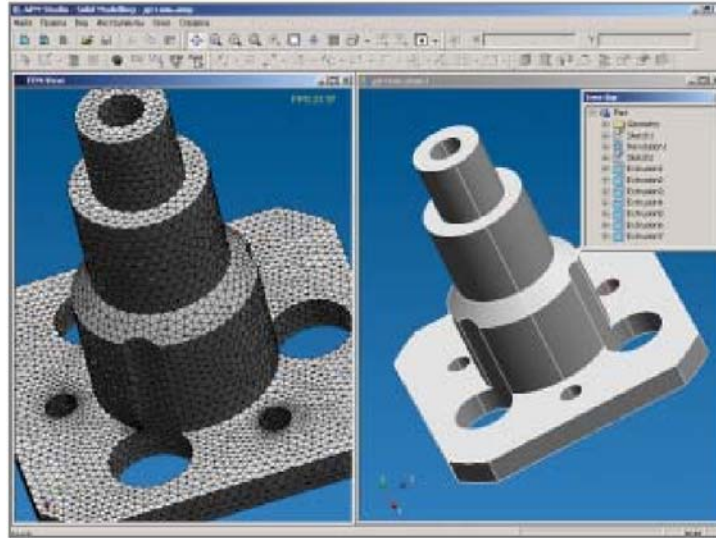


Рис. 4. Креслення та кінцево-елементна модель: а – залізничного колеса; б – баштового крана

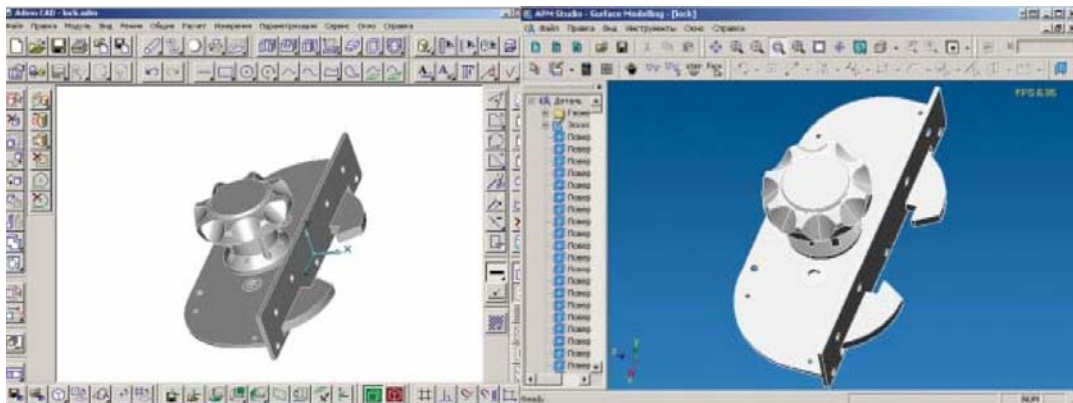
РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

– APM Studio – модуль створення тривимірних поверхневих і твердотільних моделей з вбудованим генератором розбивки на кінцеві елементи (рис. 5, а, б) [1, 9];

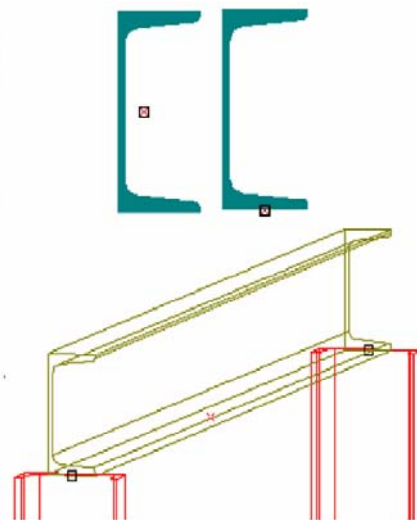
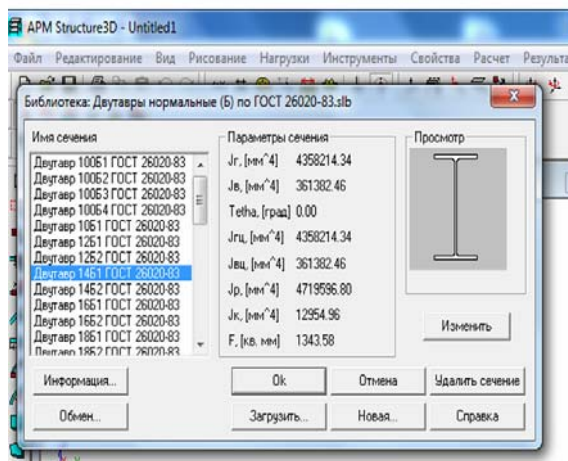
а



б



в



РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

2

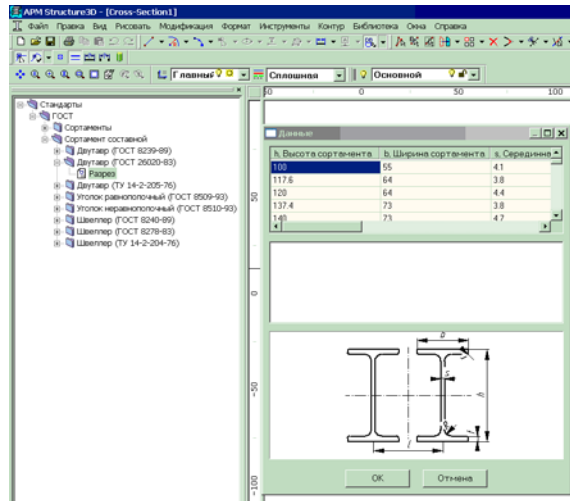


Рис. 5. Приклади відтворення на екрані:

- a* – результат роботи автоматичного генератора КЗ-сітки в режимі адаптивної розбивки;
- б* – передача з використанням формату STEP тримірної моделі з AdemCAD в модулі просторового проектування APM Studio; *в* – база даних та приклад точки прив'язки перерізу прокатного профілю;
- г* – приклад вставки параметричної моделі перерізу з бази даних

– APM Mechanical Data – база даних стандартних деталей та вузлів, довідникових даних по загальному машинобудуванню (рис. 5, *в*);

– APM Material Data – модуль зберігання і редагування параметрів матеріалів;

– APM Construction Data – база даних графічної інформації по стандартних деталях і елементах будівельних конструкцій (рис. 5, *г*);

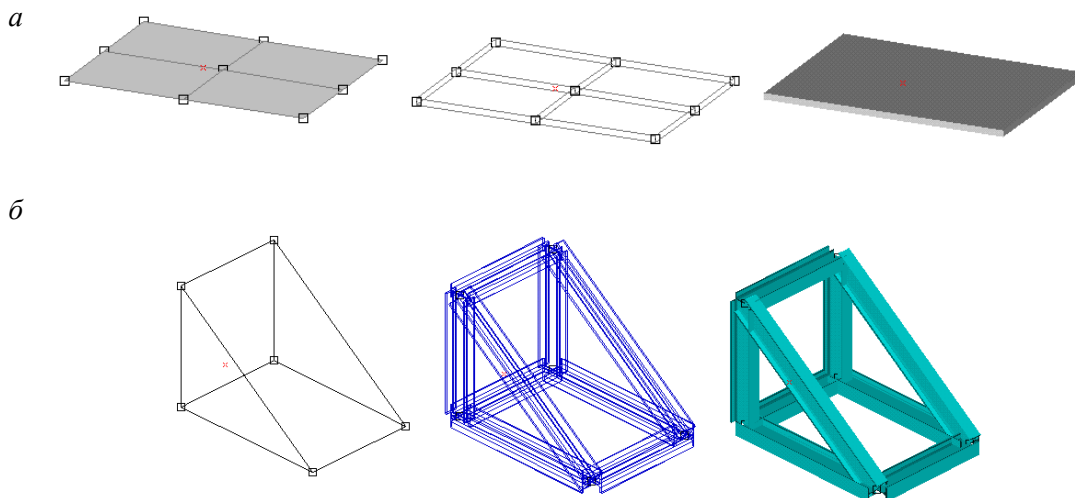
– APM Technology Data – база даних стандартних інформаційних даних для проектування технологічних процесів;

– APM Base – модуль створення та редагування баз даних;

– APM Book – електронний підручник «Основи проектування машин», в якому викладені основні методи розрахунку, реалізовані в системі APM WinMachine;

– APM Beam – модуль розрахунку та проектування балочних елементів конструкцій;

– APM Structure3D – модуль розрахунку й проектування довільних конструкцій, що складаються з пластинчастих (рис. 6, *a*), стержневих (рис. 6, *б*), об'ємних (рис. 6, *в*) елементів та їх довільних комбінацій методом кінцевих елементів [1, 9].



РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

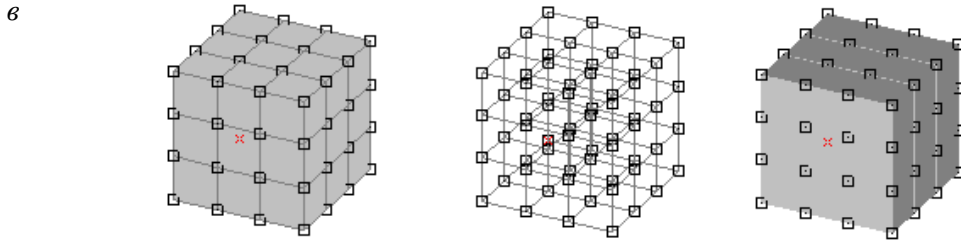
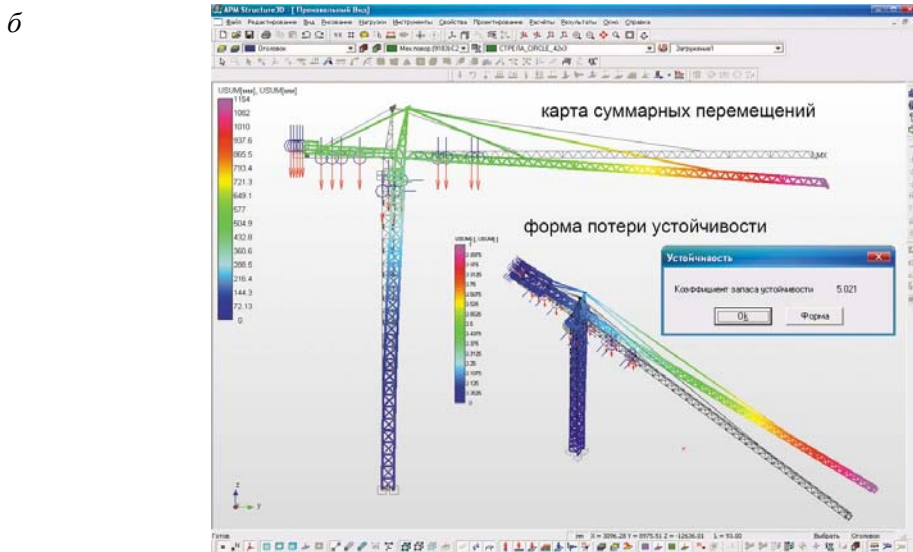
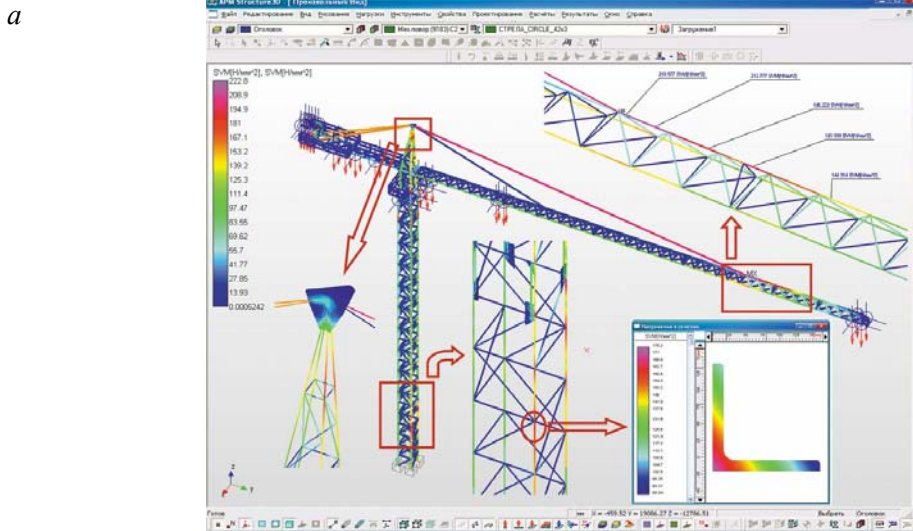


Рис. 6. Різні типи візуалізації елементів:
 а – плоска, каркасна, об’ємна моделі пластин; б – дротова, каркасна, об’ємна моделі стержня;
 в – пластинчаста, каркасна, об’ємна з освітленням моделі об’ємного елемента

За допомогою модуля APM Structure3D можна розрахувати напружено-деформований стан конструкції в статичному режимі, виконати розрахунки на стійкість і визначення влас-

них частот [1, 9], проаналізувати поведінку конструкції при довільному динамічному навантаженні (рис. 2, 7) [12];



РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

6

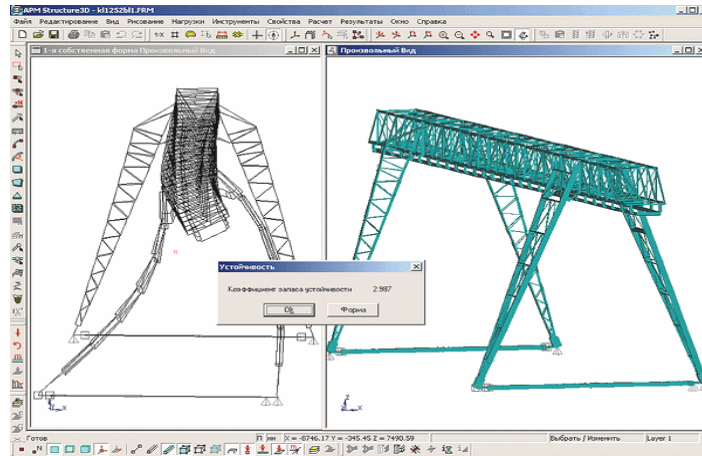


Рис. 7. Карти результатів розрахунку металоконструкції:

a – розподіл еквівалентних напружень баштового крану; *б* – розподіл переміщень баштового крану;
в – форма втрати стійкості та діаграма частот власних коливань контейнерного козлового крану

– APM Joint – модуль розрахунку та проектування з'єднань деталей машин й елементів конструкцій, який дозволяє виконати комплексний розрахунок всіх типів різьбових, зварних, клепанних з'єднань і з'єднань деталей обертання;

– APM Trans – модуль проектування передач обертання, призначений для розрахунку всіх типів зубчастих передач, а також черв'ячних, ремісних і ланцюгових передач, генерації креслень елементів цих передач в автоматичному режимі;

– APM Shaft – модуль розрахунку, аналізу і проектування валів та осей;

– APM Bear – модуль розрахунку неідеальних підшипників кочення, що дозволяє виконати комплексний аналіз опор кочення всіх відомих типів;

– APM Plain – модуль розрахунку та аналізу радіальних і упорних підшипників ковзання, що працюють в умовах рідинного й напіврідинного тертя;

– APM Drive – модуль розрахунку та проектування приводу довільної структури, а також планетарних і хвильових передач. З його допомогою виконується комплексний розрахунок кінематичних характеристик й проектування як приводу в цілому, так і окремих його елементів, з автоматичною генерацією креслень окремих деталей і в зборі, включаючи корпус;

– APM Spring – модуль розрахунку і проектування пружин та інших пружних елементів машин (рис. 8);

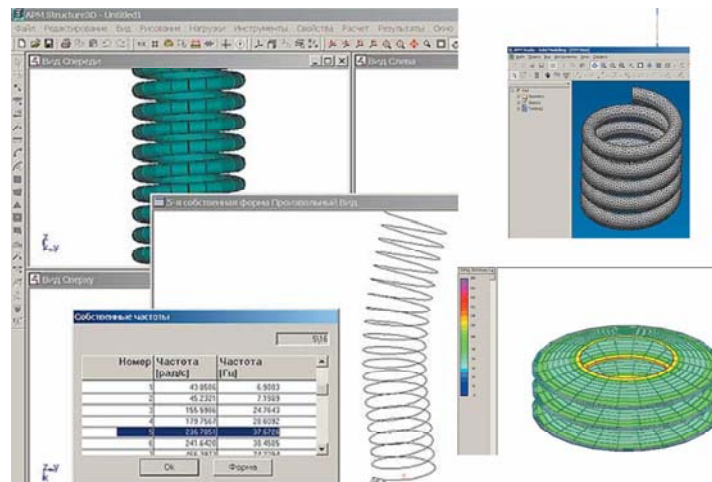


Рис. 8. Моделі пружних елементів

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

– APM Cat, APM Slider – модулі розрахунку і проектування кулачкових механізмів з автоматичною генерацією креслень та важільних механізмів довільної структури;

– APM Screw – модуль для розрахунку неідеальних передач поступального руху; здатний розрахувати гвинтові передачі ковзання, кульково-гвинтові та планетарні гвинтові передачі;

– APM Technology – модуль проектування технологічних процесів.

Програма APM WinMachine – це гнучкий, надійний засіб проектування та аналізу; працює в середовищі операційних систем найпоширеніших комп'ютерів – від персональних до робочих станцій і суперкомп'ютерів. Незважаючи на те, що програма APM WinMachine має різноманітні та складні можливості, її організа-

ційна структура й «дружній» графічний інтерфейс користувача робить вивчення і застосування програми дуже зручним. У той же час з програмою надається повна документація, яка дозволяє в інтерактивному режимі розібратися з порядком виконання складних видів робіт. Система «меню» наділена «інтуїтивними» властивостями, допомагаючи користувачеві доцільно керувати програмою. Вихідні дані можна вводити за допомогою манипулятора «миша», клавіатури або поєднуючи ці два варіанти [1, 9].

Найбільш простим способом зв'язку з комплексом APM WinMachine є використання системи «меню», яка називається графічним інтерфейсом користувача (рис. 9, а).

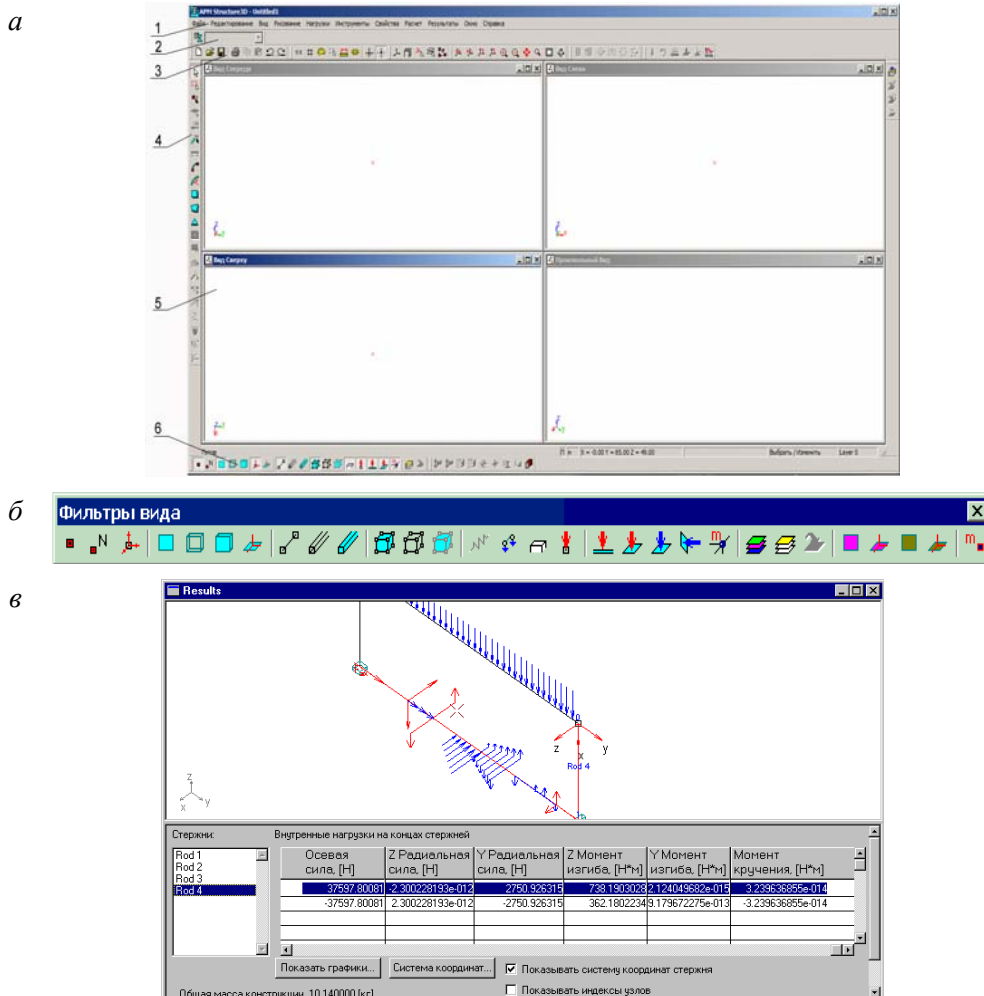


Рис. 9. Загальний вигляд:

а – системи «меню»; б – панелі інструментів «Фільтри виду»;

в – діалогове віно, яке показує переміщення та навантаження у вузлах

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

У всіх програмних версіях комплексу APM WinMachine екранне меню (рис. 9, а) включає вікна, основні серед яких є [1, 9]:

1. Меню Утилітів – містить сервісні функції, які застосовують в ході всього сеансу роботи з комплексом APM WinMachine, такі як управління файлами та зображенням й налаштування параметрів; з даного «меню» також здійснюється вихід з програми.

2. Вікно Введення – дозволяє виконувати безпосереднє введення вбудованих команд.

3. Стандартна панель інструментів – містить кнопки, призначені для виклику часто вживаних команд комплексу.

4. Додаткова панель інструментів – містить команди і функції APM WinMachine (рис. 9, б).

5. Вікно графічного виводу – відображення основної потрібної інформації по поточній роботі (рис. 9, в).

6. Панель швидкого доступу – розташована під вікном графічного виводу, допомагає при виконанні операцій в інтерактивному режимі.

Таким чином, за допомогою програмного комплексу APM WinMachine можна отримати результати (рис. 10, 11), основні з яких [3]:

– результати статичного розрахунку: переміщення вузлів конструкції (лінійні та кутові); навантаження на кінцях стержнів, у вузлах пластин і об'ємних елементів; епюри силових факторів для всієї конструкції; напруження, діючі в стержнях, пластинах і об'ємних елементах; розподіл напружень в довільному перерізі стержня; розрахункові параметри, характерні для окремої балки, такі як моменти згину, кручення, бічні й осьові сили, кути згину, закручування, деформації та напруження по довжині балки. Всі ці параметри, наведені у формі графіків, виводяться в системі координат стержня; реакції (сили та моменти), які діють в опорах;

– вузлові переміщення і навантаження на кінцях стержнів, у вузлах пластин та об'ємних елементів виводяться у вигляді таблиці;

– результатами нелінійного розрахунку є ті ж параметри, що і для лінійного статичного розрахунку;

– результатом деформаційного розрахунку є ті ж параметри, що й для статичного розрахунку, плюс критичний параметр навантаження втрати стійкості 2-го роду і форма втрати стійкості;

– результатом розрахунку на власні частоти є: кілька перших частот власних коливань конструкції; відповідні їм форми власних коливань;

– результатом розрахунку конструкції на вимушені коливання є: переміщення вузлів конструкції; напруження, діючі в стержнях, пластинах і об'ємних елементах; реакції в опорах; власні частоти й власні форми коливань.

Розрахунок несучої здатності стержневих елементів металокопункції виконується для конструктивних елементів і в цій версії APM Structure3D реалізований відповідно до вимог СНіП «Сталеві конструкції». Перевірка міцності/стійкості стержневих елементів може бути також виконана класичними методами опору матеріалів.

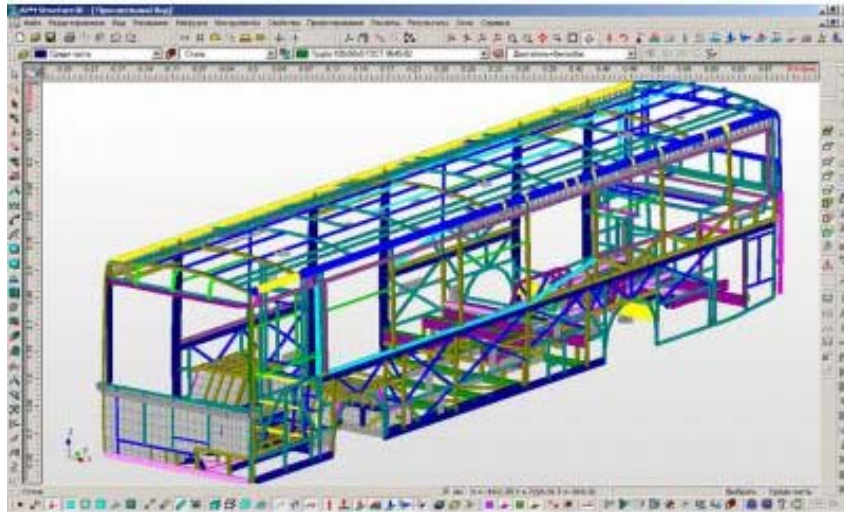
Результатом розрахунку контактної взаємодії є напружено-деформований стан моделі конструкції, а також карта розподілу нормальних і тангенціальних сил, взаємного проникнення та стану контактних елементів в контактній області.

Результатом розрахунку на стійкість є: коефіцієнт запасу стійкості конструкції; форма втрати стійкості конструкції.

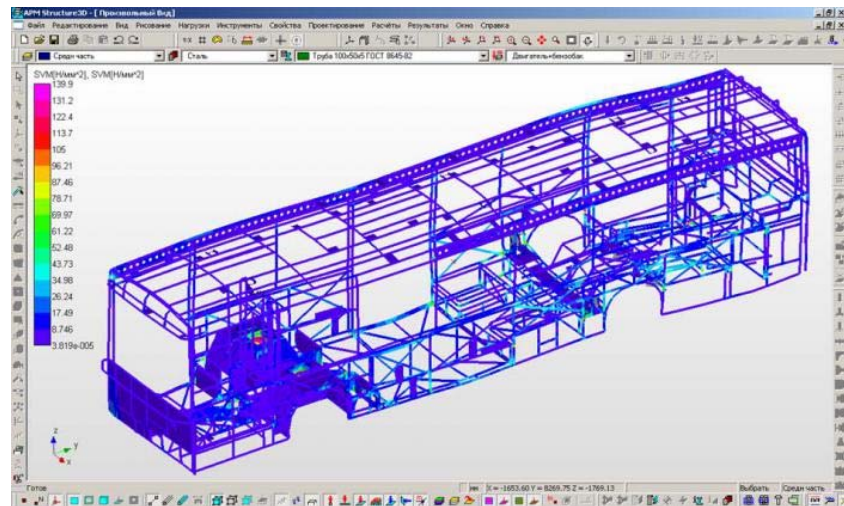
Аналіз результатів. Система APM WinMachine має широкий спектр можливостей по виведенню результатів. Такі результати розрахунку як напруження, переміщення, зусилля, коефіцієнт запасу та ін. в стержнях, пластинах і об'ємних елементах можуть виводитися у вигляді карти результатів [1, 3, 7, 12, 16]. Карта результатів конструкції є тривимірною конструкцією, забарвленою в кольори, відповідно до значень обраного компоненту результатів на поверхні. Кольорові карти розподілу еквівалентних напружень (рис. 2, б; 4, а; 7, а; 10, б; 11, б) і переміщень (рис. 2, в; 7, б; 10, в; 11, в), внутрішніх зусиль, коефіцієнтів запасу міцності та ін. дозволяють дуже точно і швидко визначити найбільш небезпечні місця в конструкції. Програма також забезпечує можливість «заглянути» всередину елементів і побачити розподіл виникаючих внутрішніх силових чинників. Для більш повного подання результатів користувач може будувати епюри різних силових чинників на 3D-моделі конструкції, виводити реакції в опорних точках, оцінювати загальні параметри, такі як маса, максимальні напруження, переміщення, виводити звідну таблицю витрат по елементах металокопункції.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

а



б



в

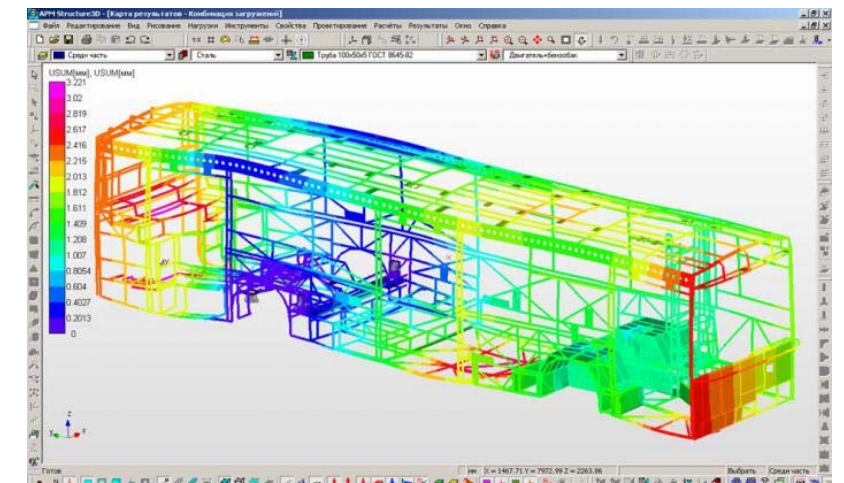
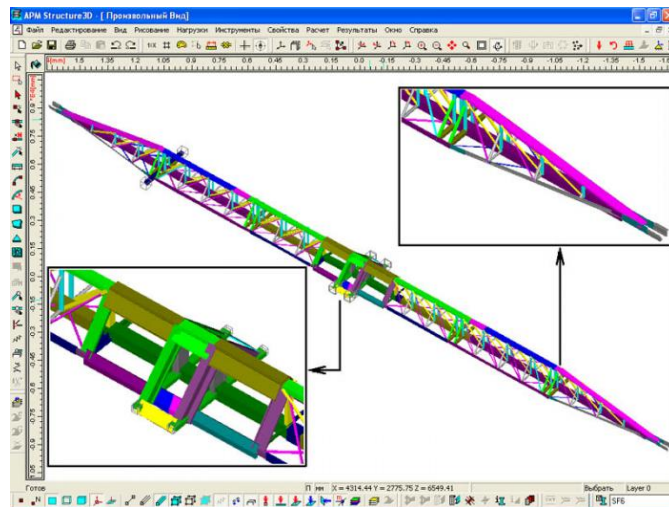


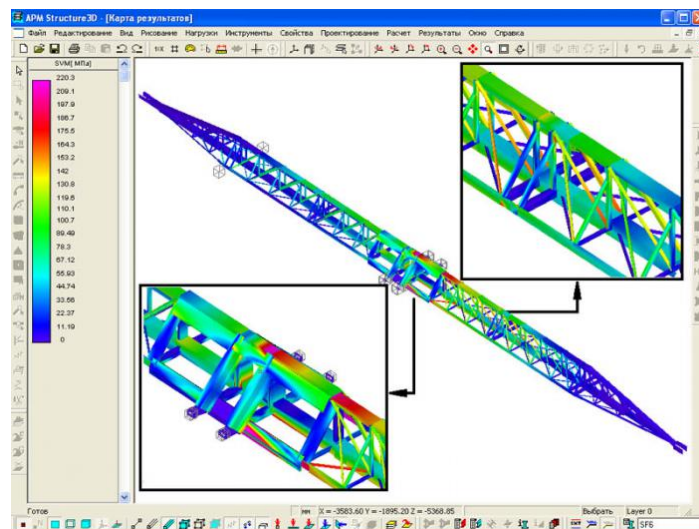
Рис. 10. Приклад розрахунку каркаса автобуса:
 а – загальний вид розрахункової моделі; б – карта розподілу еквівалентних напружень;
 в – карта розподілу переміщень

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

а



б



в

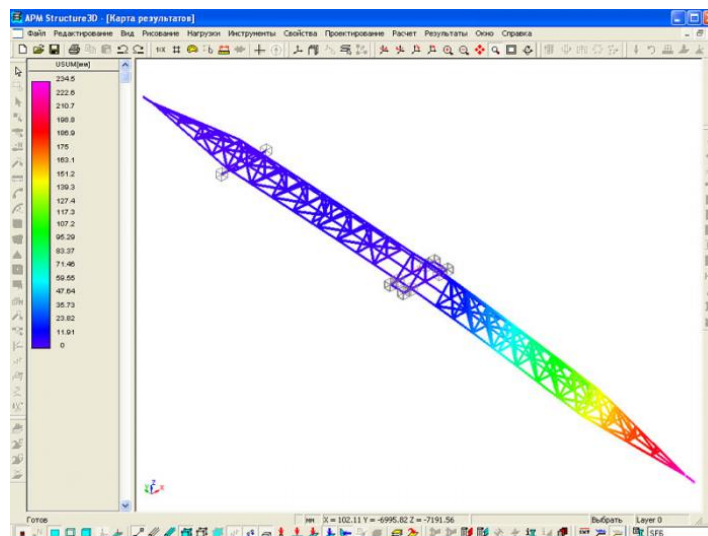


Рис. 11. Стрела самохідного укладального крана:
 а – розрахункова модель; б – карта розподілу еквівалентних напружень;
 в – карта розподілу сумарних лінійних переміщень

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Наукова новизна та практична значимість

Порівняно з іншими програмними комплексами, популярність APM WinMachine полягає у легкому засвоєнні системи, швидкому впровадженні як у навчальний, так і у виробничий процес [1, 3, 7, 12, 16] за рахунок того, що є:

- найбільша кількість вузлів;
- доступний інтерфейс всіх модулів системи;
- більш широкий вибір операцій у межах як кожного модуля, так і всього програмного комплексу в цілому;

- побудова системи на базі чинних вітчизняних стандартів, нормативів та принципів конструювання;

- можливість розрахунків одночасно у декількох модулях, що прискорює процес роботи, зменшує ризик помилкового внесення даних.

Крім того, організаційна структура й «дружній» графічний інтерфейс, доступність мови роблять вивчення та застосування програми дуже зручним. Ці та інші чинники реально скорочують час на реалізацію проектів, підкреслюють актуальність і практичне значення програмного комплексу WinMachine, що гідно оцінено його користувачами.

Розглянуто недосліджені на цей час аспекти, що пов'язані з сучасним станом та перспективами розвитку промислового виробництва, використання програмного комплексу під час проектування та розрахунків у машинобудівній галузі. Обґрунтовано застосування програмного комплексу для розв'язання задач, які спрямовані на використання результатів досліджень для різних практичних завдань, на основі яких розробляється нове обладнання, машини, механізми та ін. з метою отримання безпосереднього економічного ефекту в конкретних галузях машинобудування.

Висновки

В машинобудуванні кінцевим продуктом є машини, устаткування, прилади, апарати, послуги для всіх без винятку галузей господарства. Для виконання цілого комплексу розрахунків як окремих комплектаційних деталей, вузлів, механізмів, так і для складеної готової продукції з комплектаційних деталей серед

багатьох програмних комплексів широко застосовують APM WinMachine. Його використання для виконання та проектування деталей машин й різноманітних видів їх з'єднань і міцнісного аналізу конструкцій обґрунтовано, реально скорочує час на вирішення поставлених задач.

Це дозволить виготовляти обладнання, яке не буде поступатися кращим аналогам, оптимальне по ціні, енергоспоживанню тощо, і, як результат, конкурентоспроможне на світовому ринку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. APM Structure3D. Система расчёта и проектирования деталей и конструкций методом конечных элементов. Версия 9.2: рук-во пользователя [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.apm.ru>. – Назва з екрана. – Перевірено : 10.02.2016.
2. Агапов, В. П. Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости пространственных тонкостенных подкрепленных конструкций / В. П. Агапов. – Москва : АСВ, 2000. – 152 с.
3. АО «Калугапутьмаш» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.kalugaputemash.ru>. – Назва з екрана. – Перевірено : 10.02.2016.
4. Бате, К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вильсон. – Москва : Стройиздат, 1982. – 448 с.
5. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер ; [пер. с англ. В. М. Картелишвили]. – Москва : Мир, 1984. – 428 с.
6. Дарков, А. В. Строительная механика / А. В. Дарков, Н. Н. Шапошников. – Москва : Высш. шк., 1986. – 462 с.
7. Демиковский машиностроительный завод [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.dmzavod.ru>. – Назва з екрана. – Перевірено : 10.02.2016.
8. Дистанційне навчання. Опір матеріалів [Електронний ресурс] / каф. «Будівельна механіка». – Режим доступу: <http://www.moodle.diit.edu.ua>. – Назва з екрана. – Перевірено : 10.02.2016.
9. Замрий, А. А. Проектирование и расчет методом конечных элементов трехмерных конструкций в среде APM Structure3D / А. А. Замрий. – Москва : АПМ, 2006. – 288 с.
10. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич ; [пер. с англ. А. В. Васильева, В. М. Курочкина] ; под ред. Б. Е. Победри. – Москва : Мир, 1975. – 544 с.
11. Иванов, Б. Э. Решение задач динамики и устойчивости строительных конструкций мето-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- дом конечных элементов / Б. Э. Иванов. – Москва : МИСИ, 1990. – 288 с.
12. Коновалов, Д. Использование программного комплекса АРМ WinMachine для исследования остаточного ресурса порталных кранов / Д. Коновалов, А. Дарюхин // САПР и графика. – 2008. – № 3. – С. 84–87.
 13. Крилов, И. В. Информационные технологии: теория и практика / И. В. Крилов. – Киев : Центр, 2006. – 128 с.
 14. Мямлин, С. В. Визначення впливу показників тертя в системі «кузов-візок» на динаміку вантажного вагона / С. В. Мямлін, Л. О. Недужа, А. О. Швець // Наука та прогрес транспорту. – № 2 (50). – 2014. – С. 152–163. doi: 10.15802/stp2014/23792.
 15. Промисловість. Географія основних галузей промисловості світу (енергетика, металургія, машинобудування, хімічна промисловість, лісова та деревообробна промисловість, легка промисловість) [Електронний ресурс] / підр. – Режим доступу: <http://ukrmap.su/uk-g11/1345.-html>. – Назва з екрана. – Перевірено : 10.02.2016.
 16. Прочностной расчет железнодорожного колеса с кольцевой канавкой на боковой поверхности ступицы. АПМ: Расчеты механики и прочности конструкций [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://cae.apm.ru/galereya_vipolnennih_proektov/mashinostroenie/avto_i_geleznodorogny_transport/geleznodorognoe_koleso. – Назва з екрана. – Перевірено : 10.02.2016.
 17. Синицин, А. П. Метод конечных элементов в динамике сооружений / А. П. Синицин. – Москва : Стройиздат, 1978. – 232 с.
 18. Склад і структура промислового виробництва та актуальні проблеми його розвитку [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.info-library.com.ua/books-text-6010.html>. – Назва з екрана. – Перевірено : 10.02.2016.
 19. Смирнов, А. Ф. Методы расчета стержневых систем, пластин и оболочек с использованием ЭВМ / А. Ф. Смирнов. – Москва : Стройиздат, 1976. – 248 с.
 20. Тимошенко, С. П. Механика материалов / С. П. Тимошенко, Дж. Гере ; [пер. с англ. Л. Г. Корнейчук] ; под ред. Э. И. Григолюка. – Москва : Мир, 1976. – 670 с.
 21. Хечумов, Р. А. Применение метода конечных элементов к расчету конструкций / Р. А. Хечумов. – Москва : АСВ, 1994. – 354 с.
 22. Clough, R. Dynamics of Structure / R. Clough, J. Penzien. – New-York : McGraw-Hill Book Co., 1975. – 634 с.
 23. Determination of Dynamic Performance of Freight Cars Taking Into Account Technical Condition of Side Bearers / S. Myamlin, L. Neduzha, O. Ten, A. Shvets // Наука та прогрес транспорту. – № 1 (43). – 2013. – С. 162–169. doi: 10.15802/stp-2013/9589.
 24. Myamlin, S. V. Experimental Research of dynamic qualities of freight cars with bogies of different designs / S. V. Myamlin, O. O. Ten, L. O. Neduzha // Наука та прогрес транспорту. – № 3 (51). – 2014. – С. 136–145. doi: 10.15802/stp2014/25921.
 25. Research of friction indices influence on the freight car dynamics / S. Myamlin, L. Neduzha, O. Ten, A. Shvets // ТЕКА Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture. – 2013. – Vol. 13, № 4. – P. 159–166.

Л. А. НЕДУЖА^{1*}, А. А. ШВЕЦ^{2*}

^{1*}Каф. «Строительная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (067) 810 51 65, эл. почта nlozhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

^{2*}СКТБ МСУБ, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (050) 214 14 19, эл. почта angela_shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-8469-3902

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА АРМ WINMACHINE ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И РАСЧЕТАХ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Цель. Для проведения исследований на всех этапах проектирования, разработки, эксплуатации, определения остаточного ресурса (а именно: предварительного исследования, выбора принципов действия, разработок эскизного и технического проектов, их оптимизации, подготовки конструкторской документации и управляющей информации для автоматизированных производств, всестороннего инженерного анализа)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

необходимо использование самых современных компьютерных технологий. Их использование позволяет не только воспроизводить данные и сведения тем или иным способом, а также предоставляет возможность эффективно и непосредственно взаимодействовать с информационным объектом, который создается или демонстрируется. Целью исследования является анализ теоретических подходов и механизмов осуществления практических расчетов в отраслях промышленности для решения современных задач с помощью программных комплексов. **Методика.** При выполнении инженерных расчетов, связанных с анализом прочности машин, механизмов, конструкций на практике используют как аналитические, так и численные методы. Наибольшее распространение при анализе напряженно-деформированного состояния моделей объектов, получения их динамических характеристик и характеристик устойчивости при постоянных и переменных режимах внешней нагрузки получил метод конечных элементов, реализованный во многих известных и широко распространенных программных продуктах, обеспечивающих прочностной расчет моделей машин, механизмов, конструкций. **Результаты.** Обосновано использование рассматриваемого современного программного комплекса для проектирования деталей машин и различных видов их соединений и прочностного анализа конструкций. Цветные карты распределения напряжений, перемещений, внутренних усилий, коэффициентов запаса прочности и др. позволяют очень точно и быстро определять наиболее опасные места в конструкции. Программа обеспечивает возможность «заглянуть» внутрь элементов и увидеть распределение возникающих внутренних силовых факторов. **Научная новизна.** Рассмотрены неисследованные на данный период аспекты, связанные с современным состоянием и перспективами развития промышленного производства, использования программного комплекса при проектировании и расчетах в машиностроительной отрасли. Разработано обоснование применения программного комплекса для решения задач, направленных на использование результатов исследований для различных практических задач, в конкретных отраслях машиностроения. **Практическая значимость.** По сравнению с другими программными комплексами, популярность данного заключается в легком усвоении системы, быстром его внедрении, как в учебный, так и в производственный процесс. Организационная структура и «дружественный» графический интерфейс, доступность языка делают изучение и применение программы очень удобным. Эти и другие факторы реально сокращают время на реализацию проектов, подчеркивают актуальность и практическое значение программного комплекса, что должно быть достойно оценено его пользователями при проведении дальнейших исследований.

Ключевые слова: современный программный комплекс; машиностроение; машина; механизм; конструкция; инженерный расчет; прочность

L. O. NEDUZHA^{1*}, A. O. SHVETS^{2*}

^{1*}Dep. «Building Mechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 40910, tel. +38 (067) 810 51 65, e-mail nlorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

^{2*}EDSD MBCSS, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 214 14 19, e-mail angela_shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-8469-3902

APPLICATION OF APM WINMACHINE SOFTWARE FOR DESIGN AND CALCULATIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

Purpose. To conduct the research at all stages of design, development, operation, residual operation life determination, namely, preliminary study, action principle choice, design of draft and technical projects, their optimization, preparation of design documentation and control information for automated production, comprehensive engineering analysis, it is required to use the latest computer technologies. Their use can not only present data and information in some way, but also gives the opportunity to effectively and directly interact with the information object that is created or demonstrated. **Methodology.** To perform engineering calculations associated with the analysis of the strength of machines, mechanisms, constructions one uses both analytical and numerical methods in practice. The most common method for analysing the stress-strain state of object models, obtaining their dynamic and stability characteristics at constant and variable modes of external load is the finite element method, which is implemented in many famous and widespread software products, providing strength calculation of models of machines, mechanisms and structures. **Findings.** The use of modern software for designing machine parts and various types of their joints and for strength analysis of structures is justified. Colour charts for distribution of stresses, displacement, internal efforts, safety factor and others allow accurate and quick identification of the most dangerous places in the structure. The program also provides an opportunity to «look» inside the elements and see the resulting distribution

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

of internal force factors. **Originality.** The paper considered the aspects, which are unexplored at present, associated with the current state and prospects of development of industrial production, the use of software package for design and calculations in the mechanical industry. The result of the work is the justification of software application for solving problems that are aimed at using research findings for various practical tasks in specific fields of mechanical engineering. **Practical value.** Compared with other software systems, popularity of the considered one is explained by easy mastering of the system, quick implementation both in training and in production process. The organizational structure, «friendly» graphical interface and accessible language make learning and use of the program very convenient. These and other factors actually reduce the time for project implementation, emphasize the relevance and the practical importance of the software system, which is appreciated by its users.

Keywords: modern software package; mechanical engineering; machine; mechanism; structure; engineering calculation; strength

REFERENCES

1. APM Structure3D. *Sistema rascheta i proyektirovaniya detaley i konstruksiy metodom konechnykh elementov. Versiya 9.2: rukovodstvo polzovatelya* (APM Structure3D. The system of calculation and design of components and structures using finite element method. Version 9.2. User's guide). Available at: <http://www.apm.ru> (Accessed 10 February 2016).
2. Agapov V.P. *Metod konechnykh elementov v statike, dinamike i ustoychivosti prostranstvennykh tonkostennykh podkreplennykh konstruksiy* [The finite element method in statics, dynamics and stability of the space thin-walled reinforced constructions]. Moscow, ACB Publ., 2000. 152 p.
3. AO «Kalugaputmash» (LC «Kalugaputmash»). Available at: <http://www.kalugaputmash.ru> (Accessed 10 February 2016).
4. Bate K. *Chislennyye metody analiza i metod konechnykh elementov* [Numerical methods of analysis and finite element method]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982. 448 p.
5. Gallager R. *Metod konechnykh elementov. Osnovy* [The finite element method. Foundations]. Moscow, Mir Publ., 1984. 428 p.
6. Darkov A.V., Shaposhnikov N.N. *Stroitel'naya mekhanika* [Building mechanics]. Moscow, High School Publ., 1986. 462 p.
7. *Demikhovskiy mashinostroitelnyy zavod* (Demikhovskiy Machinery Plant). Available at: <http://www.dmzavod.ru> (Accessed 10 February 2016).
8. *Dystanciine navchannia. Opir materialiv* (Distance Learning. Strength of Materials). Available at: <http://www.moodle.diit.edu.ua> (Accessed 10 February 2016).
9. Zamriy A.A. *Proyektirovaniye i raschet metodom konechnykh elementov trekhmernykh konstruksiy v srede APM Structure3D* [Design and finite element analysis of three-dimensional structures in the APM environment Structure 3D]. Moscow, APM Publ., 2006. 288 p.
10. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [The finite element method in the technique]. Moscow, Mir Publ., 1975. 544 p.
11. Ivanov B.E. *Resheniye zadach dinamiki i ustoychivosti stroitelnykh konstruksiy metodom konechnykh elementov* [The solution of problems of dynamics and stability of building structures using finite element method]. Moscow, IISS Publ., 1990. 288 p.
12. Konovalov D., Daryukhin A. Ispolzovaniye programmnoy kompleksa APM WinMachine dlya issledovaniya ostatochnogo resursa portalnykh kranov [Using APM WinMachine software package for the study of the residual resource of gantry cranes]. *SAPR i grafika – CAD and Graphics*, 2008, issue 3. pp. 84-87.
13. Krylov I.V. *Informatsiini tekhnologii: teoriya i praktyka* [Information Technology: Theory and Practice]. Moscow, Center Publ., 2006. 128 p.
14. Myamlin S.V., Neduzha L.A., Shvets A.A. *Vyznachennia vplyvu pokaznykh tertia v systemi «kuzov-vizok» na dinamiku vantazhnoho vahona* [Determining the impact of friction parameters in the «body-bogie» on the dynamics of freight cars]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2014, no. 2 (50), pp. 152-163. doi: 10.15802/stp2014/23792.
15. *Promyslovist. Heoghrifiya osnovnykh haluzei promyslovosti svitu (enerhetyka, metalurhiya, mashynobuduvannya, khimichna promyslovist, lisova ta derevoobrobna promyslovist, lehka promyslovist* (Industry. Location of key industries in the world (energy, metallurgy, chemical industry, timber and woodworking industry, light industry)). Available at: <http://ukrmap.su/uk-g11/1345.html> (Accessed 10 February 2016).
16. *Prochnostnoy raschet zhelezodorozhnogo koleasa s koltsevoy kanavkoy na bokovoy poverkhnosti stupitsy. APM: Raschety mekhaniki i prochnosti konstruksiy* (Strength calculation railway wheel with an annular

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- groove on the lateral surface of the hub. APM: Calculations mechanics and strength of structures). Available at: http://cae.apm.ru/galereya_vipolnennih_proektov/mashinostroenie/avto_i_geleznodorognoy_transport/geleznodorognoe_koleso (Accessed 10 February 2016).
17. Sinitsin A.P. *Metod konechnykh elementov v dinamike sooruzheniy* [The finite element method in dynamics of structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978. 232 p.
 18. *Sklad i struktura promyslovoho vyrobnytstva ta aktualni problemy yoho rozvytku* (Composition and structure of industrial production and actual problems of development). Available at: <http://www.info-library.com.ua/books-text-6010.html> (Accessed 10 February 2016).
 19. Smirnov A.F. *Metody rascheta sterzhnevyykh sistem, plastin i obolochek s ispolzovaniyem EVM* [Methods of calculating rod, plates and shells with using computers]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1976. 248 p.
 20. Timoshenko S.P., Dzh. Gere. *Mekhanika materialov* [Mechanics of materials]. Moscow, Mir Publ., 1976. 670 p.
 21. Khechumov R.A. *Primeneniye metoda konechnykh elementov k raschetu konstruksiy* [The finite elements method application for calculating of structures]. Moscow, DIA Publ., 1994. 354 p.
 22. Clough R., Penzien J. *Dynamics of Structure*. New-York, McGraw-Hill Book Co. Publ., 1975. 634 p.
 23. Myamlin S., Neduzha L., Ten O., Shvets A. Determination of Dynamic Performance of Freight Cars Taking Into Account Technical Condition of Side Bearers. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2013, no. 1 (43), pp. 162-169. doi: 10.15802/stp2013/9589.
 24. Myamlin S.V., Neduzha L.A., Ten O.O. Experimental Research of dynamic qualities of freight cars with bogies of different designs. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2014, no. 3 (51), pp. 136-145. doi: 10.15802/stp2014/25921.
 25. Myamlin S., Neduzha L., Ten O., Shvets A. Research of friction indices influence on the freight car dynamics. *TEKA Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture*, 2013, no. 4 (13), pp. 159-166.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Ю. В. Зеленько (Україна); д.т.н., проф. В. Є. Волковою (Україна)

Надійшла до редколегії: 06.01.2016

Прийнята до друку: 01.04.2016