

УДК 629.463.001.63

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ВИЗНАЧЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ СКЛАДОВИХ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ**О. В. Фомін**Донецький інститут залізничного транспорту Української державної академії залізничного транспорту
вул. Артема 184, м. Донецьк, 83018, Україна. E-mail: fomin1985@list.ru

У сучасних умовах конкурування різних видів транспорту, як на державному, так і на світовому рівнях, для залізничного транспорту все більшої значущості набуває проблема підвищення його ефективності. Розв'язання такої проблеми вимагає вирішення низки науково-технічних завдань, серед яких пріоритетне місце займає вдосконалення несучих систем вантажних вагонів. Представлено особливості розробленого основного алгоритму універсального програмного комплексу, орієнтованого на вирішення завдань з визначення та використання узагальнених математичних моделей, що описують зміну головних показників складових елементів несучих систем вантажних вагонів від варіювання їх геометричних параметрів. Інтегральну розробку орієнтовано на вирішення задач дослідження несучих систем вантажних вагонів у експлуатації та застосування оптимізаційних процедур при їх проектуванні і модернізації. Наведено приклад використання вже розробленої програми для оптимізаційного пошуку, яка оперує трьохфакторними моделями та буде складовою програмного комплексу, що проектується. Розроблення програмного комплексу передбачає можливість його оперативного перестроювання для вирішення аналогічних завдань для інших систем і засобів транспортного машинобудування.

Ключові слова: автоматизоване проектування, несучі системи, вагони.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ**А. В. Фомин**Донецкий институт железнодорожного транспорта
Украинской государственной академии железнодорожного транспорта
ул. Артема 184, г. Донецк, 83018, Украина. E-mail: fomin1985@list.ru

В современных условиях конкурирования разных видов транспорта, как на государственном уровне так и на мировом, для железнодорожного транспорта все большей значимости приобретает проблема повышения его эффективности. Развязывание такой проблемы требует решения ряда научно-технических заданий, среди которых приоритетное место занимает усовершенствование несущих систем грузовых вагонов. Представлены особенности разработанного основного алгоритма универсального программного комплекса ориентированного на решение заданий по определению и использованию обобщенных математических моделей, которые описывают изменения главных показателей составных элементов несущих систем грузовых вагонов от варьирования их геометрических параметров. Интегральная разработка ориентирована на решение задач исследования несущих систем грузовых вагонов в эксплуатации и применения оптимизационных процедур при их проектировании и модернизации. Приведен пример использования уже разработанной программы для оптимизационного поиска, которая оперирует трехфакторными моделями и будет составляющей проектируемого программного комплекса. Разработка программного комплекса предусматривает возможность его оперативной адаптации для решения аналогичных заданий для других систем и средств транспортного машиностроения.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, несущие системы, вагоны.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. В сучасних умовах конкурування різних видів транспорту, як на державному, так і на світовому рівнях, для залізничного транспорту все більшої значущості набуває проблема підвищення його ефективності. Розв'язання такої проблеми вимагає вирішення низки науково-технічних завдань, які визначені у відповідних цільових Державних програмах. Так, для України – це основні положення Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року, яку схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2009 року №1555-р. При цьому ефективність перевезення вантажів залізничним транспортом значною мірою залежить від ефективності його рухомого складу. Тому проведення робіт, спрямованих на поліпшення техніко-економічних та експлуатаційних показників вантажних вагонів як найбільш вагомої частини рухомого складу можна охарактеризувати як своєчасне та актуальне.

При вирішенні завдання з розроблення нових і модернізації вже існуючих конструкцій вантажних вагонів, з метою підвищення їх ефективності, особливе місце займають питання покращення їх несучих систем, як найбільш матеріалоемної частини. При цьому розв'язання такої складної проблеми вимагає урахування значної кількості діаметрально протилежних, за спрямуваннями покращення, критеріїв. Так наприклад важливий та пріоритетний напрямок підвищення ефективності вагонних конструкцій – це зниження їх матеріалоемності, у переважній більшості випадків буде призводити до зміни показників надійності. Тому для успішного проведення науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт необхідно оперувати значним інформативним масивом даних, який формується: цілеспрямованими, описаннями та обмеженнями об'єкту проектування. На сьогоднішній день багатокритеріальність зазначеної проблеми та складність відповідних обчислю-

вальних процедур вимагають для її вирішення залучення сучасних комп'ютерних засобів. Сказане обґрунтовує актуальність і важливість розроблення та використання відповідних автоматизованих програмних комплексів.

Пріоритетними напрямками підвищення ефективності використання несучих систем вантажних вагонів є впровадження при їх проектуванні та модернізації методів теорії оптимізації, нових підходів для діагностування несучих властивостей їх конструкцій в експлуатації (наприклад з метою визначення залишкового ресурсу). Розглянуті вище обставини аргументують необхідність автоматизації відповідних проектувальних та діагностичних процедур, що на сучасному рівні доцільно робити шляхом розробки та впровадження відповідних програмних засобів.

Досвід проведення проектувальних і дослідницьких робіт [1–5] для несучих систем вантажних вагонів указав на те, що зміну основних їх характеристик зазвичай доцільно описувати двох-, трьох-, чотирьох-, п'яти- та шестифакторними узагальненими математичними моделями. При цьому при проведенні оптимізаційних робіт найчастіше використовуються двох і трьохфакторні математичні моделі, а для дослідження несучих систем в експлуатації використовуються чотири–шестифакторні моделі. Проте різноманітні задачі, залежно від поставленої мети, можуть вимагати розроблення та використання й різних (двох–шестифакторних) узагальнених математичних моделей. В рамках проведених раніше робіт були розроблені окремі програми для конкретних досліджуваних випадків [2, 4, 5], у тому числі й узагальнений програмний комплекс визначення та використання, при оптимізаційному проектуванні, трьохфакторних математичних моделей [6, 7], проте подальший розвиток наукових основ оптимізаційного проектування та діагностування несучих елементів вантажних вагонів визначає необхідність створення універсального програмного комплексу, який буде оперувати двох-, трьох-, чотирьох-, п'яти- та шестифакторними узагальненими математичними моделями. На першому етапі вирішення визначеного актуального науково-технічного завдання необхідно розробити визначальні теоретичні основи такого комплексу.

Метою статті є висвітлення розроблених теоретичних основ створення універсального програмного комплексу визначення та використання математичних моделей, які описують варіювання базових характеристик (показників із відповідними параметрами) складових елементів несучих систем вантажного вагонобудування. Представлено розроблений узагальнений визначальний алгоритм відповідної програми та його особливості. Також наведено приклад використання вже розробленої програми, яка оперує трифакторними моделями та буде складовою програмного комплексу, що проектується.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. У загальному випадку до програмного комплексу, що планується до розроблення, висуваються наступні вимоги:

- зазвичай, при дослідженні характеристик несучих елементів вантажних вагонів доцільно розглядати їх міцнісні характеристики (як правило використовуються вісьові моменти інерції перерізу, наприклад: W_x та W_y для перерізу рис. 1,а) та масовий показник (погонна матеріалоемність $m_{\text{пос}}$), які залежать від геометричних параметрів перерізів (показники товщини чи/та ширини чи/та висоти), тому доцільно одночасне визначення, а, в подальшому, дослідження одразу трьох математичних моделей;

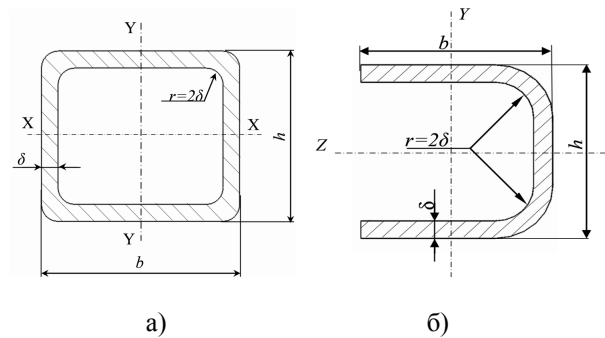


Рисунок 1 – Перерізи а) прямокутної труби та б) швелера гнутого

- для контролю рівня адекватності математичних моделей обов'язково необхідно розраховувати та виводити на екран при їх визначенні також відповідні значення середньоквадратичних відхилень;

- для всіх розрахункових моделей повинні бути надані можливості ручного завдання змінних параметрів та обмежень (границі варіювання), з метою, відповідно, визначення значень показників і пошуку оптимального рішення;

- оптимальні рішення повинні визначатися автоматично (аналітичним шляхом [1]);

- у зв'язку з можливістю та інформативністю візуалізації оптимізаційних робіт з використанням двох- і трьохфакторних математичних моделей, окрім аналітичного визначення оптимуму, обов'язково необхідна графічна інтерпретація [1] можливих рішень (з координатами відповідно на площині (приклад рис. 2) та у трьохвимірному (приклад рис. 3,б) просторі). При цьому необхідно урахувати можливість оперативного варіювання параметрами осей (наприклад абсцис та ординат), а також ізолініями/лініями рівнів;

- програма повинна бути розрахована на сучасні найбільш розповсюджені комп'ютерні засоби та рівень користувача ЕОМ.

З урахуванням вищезазначених вимог був розроблений загальний алгоритм програмного комплексу визначення та використання математичних моделей варіювання базових характеристик складових елементів несучих систем вантажного вагонобудування, блок-схему якого наведено на рис. 4.

Відповідно до представленого на рис. 4 алгоритму на *першому етапі* (крок 1) визначається (обирається у діалоговому полі програми) запланована кількість змінних факторів математичних моделей (від двох до шести факторів), які в подальшому бу-

дуть розроблюватись та використовуватись. На *другому етапі* планується присвоєння назв показникам та параметрам, які у подальшому будуть використовуватись.

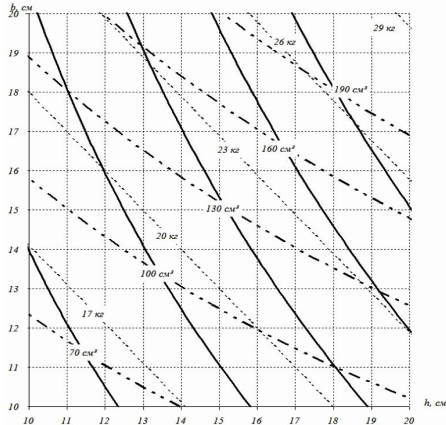
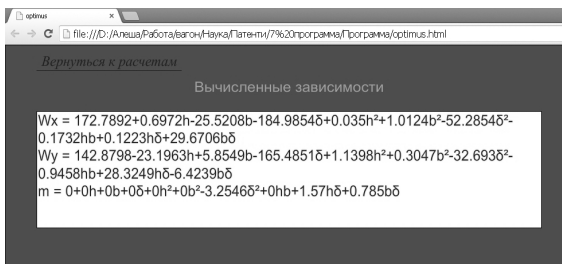
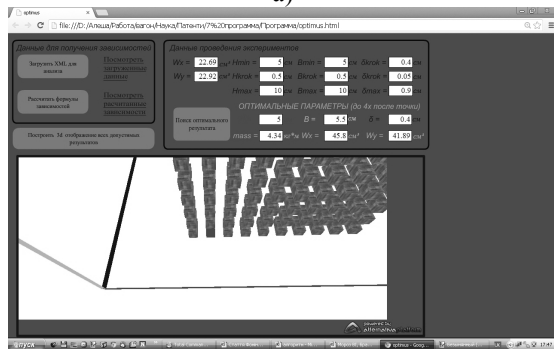


Рисунок 2 – Допоміжний графік для визначення оптимальних значень перерізу швелеру гнутого при $d=5$ мм:

- лінії рівних значень $m_{\text{пог.}} = f(b, h)$;
- лінії рівних значень $W_x = f(b, h)$;
- · - · - лінії рівних значень $W_y = f(b, h)$



а)



б)

Рисунок 3 – Вікна програми: а) з визначеними узагальненими математичними моделями; б) із характеристиками оптимізаційного пошуку та просторовим зображенням задовільних варіантів

На *третьому етапі* запропонованої процедури планується проведення необхідних дослідів (кількість та особливості яких визначаються залежно від досліджуваного випадку [1, 8]) зі складанням відповідних таблиць. Наприклад на рис. 5,а,б наведені відповідно фрагменти заповнених таблиць для розрахунку двофакторних моделей для прямокутної труби (рис. 1,а) і трьохфакторних моделей для швелеру гнутого (рис. 1,б).

Після цього сформовану таблицю інтегрують до програмного комплексу, де визначаються математичні моделі (блок 4). При цьому, окрім отриманих математичних моделей, розраховуються та виводяться відповідні значення їх середньоквадратичних відхилень y , на основі яких (крок 5) користувач приймає рішення щодо можливості їх подальшого використання.

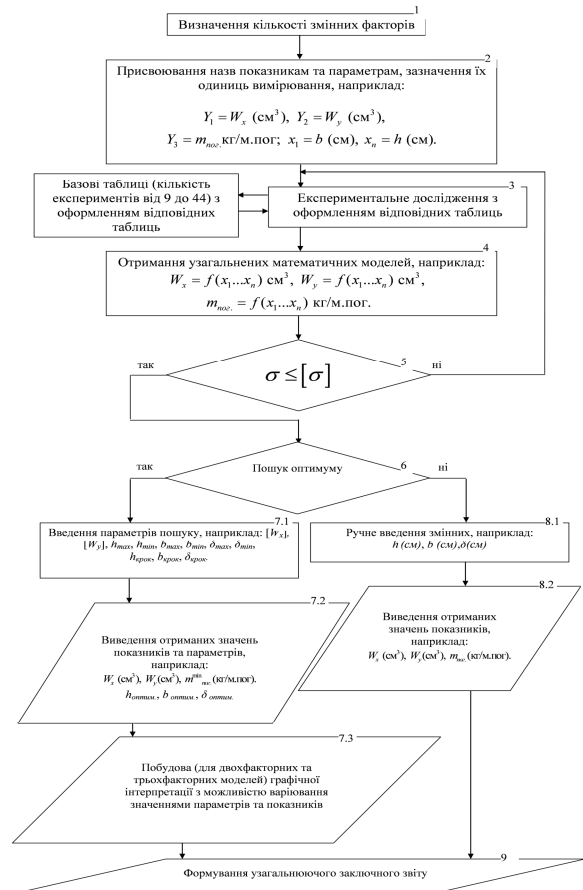


Рисунок 4 – Блок-схема визначального алгоритму програмного комплексу розрахунку та використання математичних моделей варіювання базових характеристик складових елементів несучих систем вантажного вагонобудування

Так, якщо значення отриманого відхилення перевищує допустиме (встановлюється користувачем) значення ($y > [y]$) знов проводяться дії, визначені запропонованою процедурою від третього блоку з коректуваннями передбаченими [1, 8]. У разі задоволення умови $\sigma \leq [\sigma]$ переходять до наступних кроків.

Блок б залежно від поставленої мети:

1) визначення дійсних значень показників досліджуваного елементу чи

2) пошук оптимального варіанту в заданих границях варіювання передбачає направлення подальших робіт на виконання відповідних дій.

Так, у разі варіанту 1 ручним вводом задаються існуючі значення параметрів досліджуваного елемента (блок 8.1) та визначаються відповідні значення

показників (блок 8.2). У разі розвитку подій по варіанту 2 задаються (крок 7.1) границі варіювання змінних і крок зміни, після чого програма автоматично визначає оптимальний варіант і відповідні йому характеристики (показники та параметри). До того ж (крок 7.3) у разі застосування варіанту 2 для двох- та трьохфакторних моделей будуються відповідні графічні зображення (приклади рис. 2 і 3,б).

На завершальному (дев'ятому) етапі запропонованої процедури передбачається формування узагальнюючого заключного звіту, який буде містити інформацію про всі кроки проведеного дослідження.

Висота	Товщина	Основні моменти інерції площиди у центроїда, см ⁴	Площадь, см ²	Длина, см	Маса 1 м, кг/м	Момент соприльвения, см ³			
14	0,6	1189,64	1655,15	0,56	7,76	61,44	100	47,370	213,29
14	0,6	721,85	1061,36	1	8	34,56	100	26,646	132,67
8	1	674,9	385,81	0,49	4,49	40,8	100	31,457	85,93
8	0,6	487,71	293,8	0,74	4,74	27,36	100	21,095	61,98
11	0,8	742,02	731,23	0,7	5,2	39,04	100	30,100	117,96
14	0,8	892,81	1291,29	0,79	7,79	43,84	100	33,801	165,76
8	0,8	591,24	346,27	0,59	4,59	34,24	100	26,399	75,44
11	1	896,9	632,25	0,58	6,08	46,8	100	36,083	136,89
11	0,6	604,78	608,45	0,88	6,38	30,96	100	23,870	95,37

а)

Висота	Ширина	Товщина	Основні моменти інерції площиди у центроїда, см ⁴	Площадь, см ²	Длина, см	Маса 1 м, кг/м	
20,0	18,0	1,00	3063,802112	2250,106	53,86398	100	42,275
20,0	18,0	0,50	1693,208823	1206,625	27,9635	100	21,951
20,0	13,0	1,00	1465,820049	1973,867	48,86398	100	38,950
20,0	13,0	0,50	831,224352	1072,801	25,4635	100	19,989
15,0	18,0	1,00	2340,268779	1019,375	43,86398	100	34,425
15,0	18,0	0,50	1310,291957	553,7297	22,9635	100	18,026
15,0	13,0	1,00	1104,986715	888,353	36,86398	100	30,500
15,0	13,0	0,50	626,807725	490,6186	20,4635	100	16,864
17,5	15,5	0,75	1526,943378	1146,886	35,54287	100	27,901
20,0	15,5	0,75	1733,084003	1661,918	39,29287	100	30,845
15,0	15,5	0,75	1324,892753	752,2495	31,79287	100	24,957
17,5	18,0	0,75	2138,092743	1215,387	37,41787	100	29,373
17,5	13,0	0,75	1030,920864	1070,788	33,66787	100	26,429
14	17,5	1,00	1921,241318	1486,212	46,35398	100	36,388
17,5	17,5	0,50	1079,799688	795,8896	24,2135	100	19,008

б)

Рисунок 5 – Фрагменти заповнених типових таблиць оформлення досліджень: а) для отримання двофакторних математичних моделей; б) для отримання трифакторних математичних моделей

Так, наприклад, у разі проведення оптимізаційного пошуку для двофакторних моделей він повинен містити

таблицю з даними отриманими та розрахованими при експериментах;

отримані узагальнені математичні моделі з відповідними значеннями середньоквадратичних відхилень;

границі обмеження пошуку та крок зміни величин; характеристики (показники та параметри) оптимального варіанту;

графічну інтерпретацію пошуку – допоміжний графік до визначення оптимальних значень.

А, наприклад, у випадку розроблення та дослідження п'ятифакторних моделей: таблицю з даними отриманими та розрахованими при експериментах; отримані узагальнені математичні моделі з відповідними значеннями середньоквадратичних відхилень; введені значення параметрів; отримані зна-

чення показників з одиницями вимірювання.

Для прикладу застосування запропонованого підходу, у разі пошуку оптимальних рішень, нижче представлено фрагмент застосування раніше розробленого програмного комплексу для трифакторних математичних моделей [6, 7]. Так, у якості досліджуваного випадку обрано оптимізаційний пошук упровадження швелеру гнучого (див. рис. 1,б) з мінімальною матеріалоемністю (m_{noz}) для верхнього поясу стін торцевих однієї із розповсюджених моделей універсальних напіввагонів [3]. Основними обмеженнями міцності обрано значення отримані у роботі [3], і це будуть: $[W_x] = 22,92см^3$, $[W_z] = 22,69см^3$, а у якості геометричних конструкційних обмежень наступні інтервали варіювання керованих змінних (рис. 1,б): $b=5...10$ см; $h=5...10$ см; $d=0,4...0,9$ см. З урахуванням вищевизначених вимог математичний запис задачі оптимізаційного проектування верхнього поясу стін торцевих прийме вид:

$$m_{noz}(\delta^*, b^*, h^*) = m_{noz \min}$$

$$\delta^*, b^*, h^* \in D_x \in D$$

$$D = \left\{ \delta, b, h \mid 0,4cm \leq \delta \leq 0,9cm; 5cm \leq b \leq 10cm; 5cm \leq h \leq 10cm \right\} \quad (1)$$

$$D_x = \left\{ \delta, b, h \mid \begin{matrix} W_x \geq 22,92cm^3; W_z \geq 22,62cm^3; \\ 0,4cm \leq \delta \leq 0,9cm; 5cm \leq b \leq 10cm; 5cm \leq h \leq 10cm \end{matrix} \right\}$$

де m_{noz} – маса верхньої стійки стіни торцевої (основний критеріальний показник);

δ^*, h^*, b^* – оптимальні значення керованих змінних/параметрів δ, h і b , інтервали варіювання яких визначають область можливих рішень D , в якій функціональними обмеженнями $[W_x]$, $[W_z]$ виділяється область допустимих рішень D_x .

Нижче представлені вікна програми, у якій проводився розрахунок відповідних узагальнених математичних моделей та визначення оптимального варіанту. Так на рис. 5,а наведено вікно програми з розрахованими узагальненими математичними моделями які отримані на основі даних представлених на рис. 5,б, а на рис. 3,б показано фрагмент програми з проведеними розрахунками.

З'ясовано, що оптимальними параметрами, які забезпечать $W_x > 22,92см^3$, $W_z > 22,69см^3$ у заданих обмеженнях пошуку зазначених у формулі (1) є: $\delta^*= 0,4см$, $b^*= 5,5см$, $h^*=5см$ при значенні погонної маси $m_{noz} = 4,34кг$. Упровадження запропонованого технічного рішення дозволить суттєво зменшити матеріалоемність кузовів досліджуваної моделі напіввагонів, що з урахуванням масовості їх парку дозволить отримати значний економічний ефект.

ВИСНОВКИ. Наведені матеріали є визначальною теоретичною основою для розробки універсального програмного комплексу визначення та використання математичних (двох–шестифакторних) узагальнених моделей, які будуть описувати зміну основних показників складових елементів несучих

систем вантажних вагонів залежно від варіювання головних геометричних параметрів. При цьому такий комплекс можливо буде використовувати при взаємному дослідженні розроблених узагальнених математичних моделей та пошуку оптимальних варіантів.

При розроблені відповідної програми необхідно її адаптувати до сучасних загально розповсюджених параметрів ЕОМ (операційні системи, вимоги до пам'яті та ін.) та рівня користувачів, а також передбачити можливість її оперативного перестроювання для вирішення аналогічних завдань для інших систем і засобів транспортного машинобудування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Фомін О.В. Оптимізаційне проектування елементів кузовів залізничних напіввагонів та організація їх виробництва: монографія. – Донецьк: ДонІЗТ УкрДАЗТ, 2013 – 251 с.
2. Математичні моделі зміни основних показників базових несучих елементів кузовів на піввагонів / О.В. Фомін, О.А.Логвіненко, Р.Ю. Дьомін и др. // Залізничний транспорт України: науково-практичний журнал. – Київ, 2013. – Вип. 5. – С. 52–54.
3. Фомін О.В. Оцінювання запасів несучої здатності кузовів вантажного вагонуобудування та їх

елементів // Збір. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Вип. 139. – С. 273–282.

4. Фомін О.В. Модернізація елементів стіни бокової універсальних напіввагонів вітчизняного виробництва // Збір. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2011. – Вип. 26. – С. 111–115.

5. Визначення оптимальних геометричних параметрів стін торцевих на піввагонів / О.В. Фомін, Д.А. Іванченко // Вестник Харьковського національного автомобільно-дорожного університету Сборник научных трудов. – 2013. – Вып. 60. – С. 71–76.

6. Фомін О.В. Програмно-обчислювальний комплекс визначення оптимальних характеристик складових елементів вантажних вагонів // Збір. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2013. – Вип. 34. – С. 105–112.

7. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 50875. Комп'ютерна програма «Комп'ютерна програма для визначення оптимальних геометричних параметрів складових елементів вантажних вагонів на основі узагальнених математичних моделей» («КП ВОГП») / Фомін О.В.; зареєстр. 22.08.2013 р.

8. Математическая теория оптимального эксперимента / С.М. Ермаков, А.А. Жиглявский. – М.: Наука, 1987. – 320 с.

THEORETICAL BASES OF PROGRAMMATIC DETERMINATION COMPLEX AND USE OF MATHEMATICAL MODELS OF WAGON ELEMENTS

O. Fomin

Donetsk Institute of Railway Transport of the Ukrainian State Academy of Railway Transport
vul. Artema 184, Donetsk, 83018, Ukraine. E-mail: fomin1985@list.ru

Nowadays, in the competitive environment between the different types of transport, the most important transport problem is how to increase the railway efficiency. It needs to aim the certain scientific and technical targets, particularly, improving the frame construction of the freight wagons. The article describes the features of complex algorithm directed on how to determine and use the common mathematical models displaying the changes in the key indexes of the components of the freight wagons' framework in accordance with varying their geometrical parameters. The presented integral working-out is focused on the research of wagon bodies in their maintenance and also on applying the optimization procedures in their design and modernization. Also, it is given the example of already developed program which operates by three-factor models and is going to be a part of the program complex that is in the project. The development of this complex allows for fast adaptation to solve similar tasks for other systems and units in transport engineering.

Key words: automated planning, frame constructions, wagons.

REFERENCES

1. Fomin, O.V. (2013), *Optimizaciine proektuvannia elementiv kuzoviv napivvagoniv ta organizaciya ih vyrobnitstva* [Optimization of planning of basket elements of railway freight gondola and organization of their production], monograph ISBN 978-966-8707-38-4, DonIZT UkrDAZT, Donetsk, Ukraine.
2. Fomin, O.V., Logvinenko, O.A., Demin, et al, (2013), "Mathematical models of change of basic indexes of main bearing basket elements of freight gondola", *Railway transport of Ukraine*, no.5, pp. 52–54.
3. Fomin, O.V. (2013), "Evaluation of reserve of load bearing capacity of baskets in freight car-building and their elements", *Collected works*, vol. 139, pp. 273–282, UkrDAZT, Kharkiv, Ukraine.
4. Fomin, O.V. (2011), Modernization of elements wall lateral of universal freight gondola domestic production, *Collected works*, no. 26, pp. 111–115, DonIZT, Donetsk, Ukraine.
5. Fomin, O.V. and Ivanchenko, D.A. (2013), "Determination of optimum geometrical parameters of walls of butt-end freight gondolas", *Visnik Kharkivskogo natsionalnogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta*, no. 60, pp. 71–76.
6. Fomin, O.V. (2013), "Programmatic calculable complex of determination optimum descriptions of component elements freight carriages", *Collected works*, no.34, pp. 105–112, DonIZT, Donetsk, Ukraine.
7. Fomin, O.V. (2013), Certificate of authorship no. 50875. Software "The computer program for determination of optimum geometrical parameters of the components of freight carriages on the basis of the generalized mathematical models" (KP VOGP), registered on August 22, 2013.
8. Ermakov, S.M. and Gigliavskij, A.A. (1987), *Matematicheskaya teoriya optimalnogo eksperimenta* [Mathematical theory of optimum experiment], Nauka, Moscow, Russia. Стаття надійшла 10.10.2013.