Попович П. Уніфікація дослідження напружено-деформованого стану несучих конструктивних систем / П. Попович, М. Сташків, Т. Довбуш // Вісник ТНТУ — Тернопіль : ТНТУ, 2015. — Том 78. — № 2. — С. 153-163. — (Машинобудування; автоматизація виробництва та процеси механічної обробки).

УДК 631.356.2

П. Попович, докт. техн. наук;
М. Сташків канд. техн. наук; Т. Довбуш

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

УНІФІКАЦІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ НЕСУЧИХ КОНСТРУКТИВНИХ СИСТЕМ

***Резюме**. Визначено комплексне розподілення характерних зовнішніх навантажень елементів конструктивних систем, на основі чого проведено моделювання НДС металоконструкції розкидача добрив. Складено універсальний алгоритм запису адитивних функцій згинальних і крутних моментів, а також потенціальної енергії деформацій з урахуванням шуканих величин зовнішніх опорних реакцій та внутрішніх силових факторів. На прикладі несучої металоконструкції розкидача твердих добрив ПРТ-10 проведено аналітичні дослідження з обґрунтуванням вірогідних випадків розподілу зовнішніх навантажень за периметром рами досліджуваної машини. Порівнянням отриманих результатів зі встановленими експериментальним шляхом кількісними і якісними характеристиками НДС тримкої металоконструкції машини для внесення добрив доведено ефективність застосування запропонованих підходів і моделей при розрахунках несучих рамних металоконструкцій з довільним заданим розподілом зовнішньої навантаженості.*

***Ключові слова**: несуча металоконструкція, потенціальна енергія деформації, згин, кручення, метод мінімуму потенціальної енергії, модуль пружності, модуль зсуву, напруження.*

P. Popovych, M. Stashkiv, T. Dovbush

UNIFICATION OF THE STRESS-STRAIN STATE INVESTIGATION OF THE SUPPORTING STRUCTURAL SYSTEMS

***Summary**. Development of analytical methods for calculating complex structural systems, statically-indeterminated relatively the external support and internal force factors simultaneously require further development. In most cases, external loads acting on structural elements is variable, so the detailed calculations of the stress-strain state of this factor should be taken into account.*

In this work the aim is to simplify the solution of statically-defined structural systems while building available generic functions taking into account the variable external loading. The calculation results are compared with the results obtained using PPP Lira 9.2.

The solution of this problem on PC using software packages (PPP) in, which calculation models are constructed by the finite element method (FEM) is complicated, and complexity of the task being an external AC load, which results in approximate definition of internal power factors.

The general case of external load distribution on the structural elements of the system has been analysed. The multipurpose algorithm for recording functions of bending, torque and potential energy of deformation has been list. The entry function points are unknown values of both external support reactions and internal power factors. For example, the specific design of solid fertilizer spreader PRT-10 will conduct analytical (and experimental) studies for probable cases the distribution of external load on the trailer body. For similar cases the frame was calculated using PPP Lear-9.2. Analysis of the results testified the effectiveness of the frame structures calculation MMPED with any external load distribution on the spreader body.

***Key words**: potential energy of deformation, bending, twisting, frame, method of minimum potential energy, elastic modulus, shear modulus, stress.*

Постановка проблеми. Розвиток аналітичних методів розрахунку несучих складних конструктивних систем, одночасно статично-невизначених за відношенням до зовнішніх опор і внутрішніх силових факторів, з урахуванням розходжень розрахункових і отриманих експериментально даних потребують створення нових моделей НДС несучих тримких конструкцій з урахуванням реальної завантаженості [1,8].

У більшості випадків зовнішні навантаження, що діють на елементи конструкції, є нестаціонарними величинами. Отже, при розрахунково-аналітичних дослідженнях напружено-деформованого стану (НДС) цей фактор необхідно враховувати. Класичними методами визначення НДС складних плоских просторово навантажених конструктивних систем дана задача розв'язується зі значними похибками, приймаючи ряд спрощень, на основі яких розв'язуються дві задачі. Перша – визначення зовнішніх силових факторів, друга – визначення внутрішніх силових факторів [1,2,3]. Розв'язок вказаних задач на ПК із використанням відомих пакетів прикладних програм (ППП), у яких розрахункові моделі побудовано за методом кінцевих елементів (МКЕ), ускладнений неоднозначністю задавання зовнішнього змінного навантаження. Це призводить до похибок при визначеннях внутрішніх силових факторів у металоконструкціях.

Аналіз відомих досліджень і публікацій. Переваги застосування МКЕ у порівнянні з традиційними числовими методами при визначенні НДС несучих машинобудівних металоконструкцій полягають у простоті алгоритмізації, можливості повної автоматизації складання рівнянь з отриманням результатів без будь-яких комбінованих систем [2]. У роботах [3], [4] досліджено напружено-деформований стан рамних конструкцій методом кінцевих елементів з порівнянням із тензометричними дослідженнями. Встановлена різниця розрахункових і дослідних даних сягає 30–40%.

Мета роботи. Розробити алгоритм ефективного моделювання НДС статично-невизначених конструктивних систем з урахуванням змінних параметрів зовнішніх навантажень.

Результати досліджень. Об'єкт дослідження – процеси навантаженості несучих металоконструкцій с/г машин. При складанні розрахункової моделі навантаженості несучої рами причіпного розкидача добрив ПРТ-10 аналітичним шляхом досліджувало вісім симетрично розташованих відносно поздовжньої осі замкнених контурів, (рис.1).

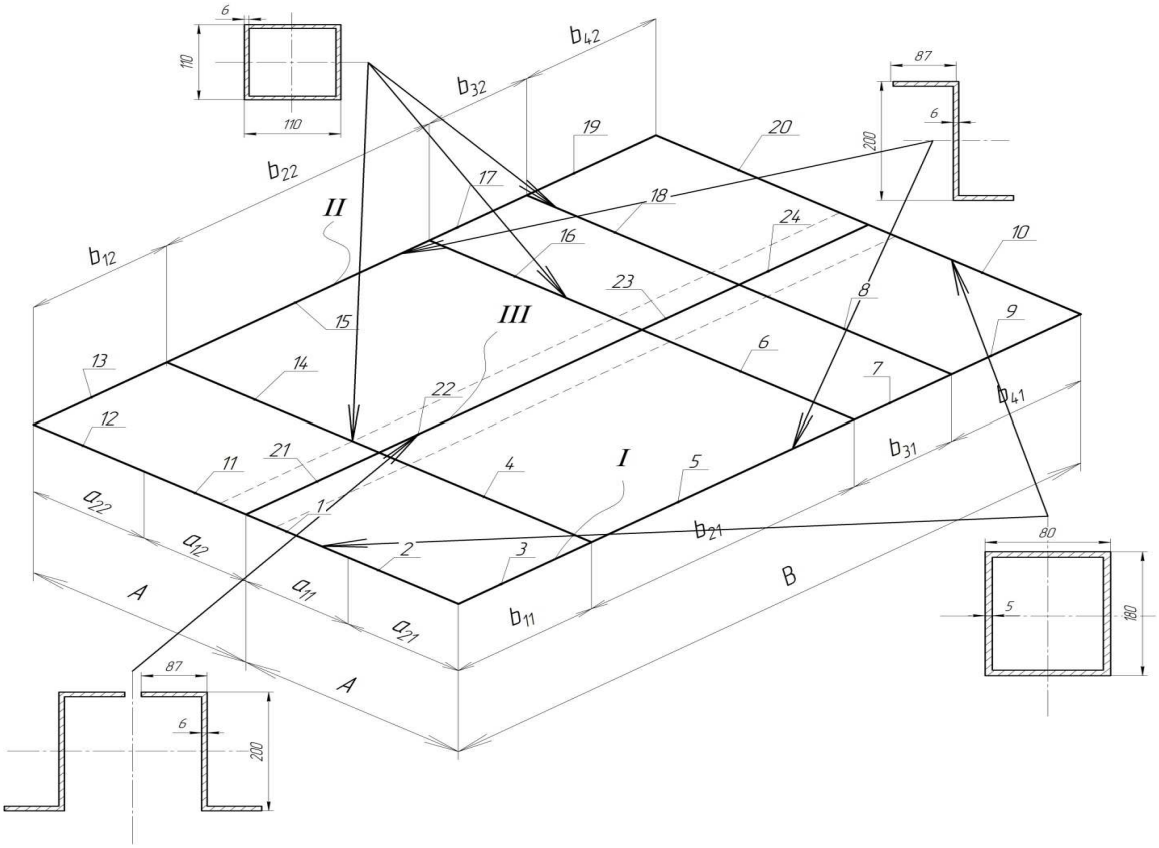

Рисунок 1. Несуча система причіпного розкидача ПРТ-10

Figure 1. Supporting system of hook spreader PRT-10

Для оптимізації аналітичних обчислень за об'ємом досліджень конструкцію рами ПРТ-10 розбиваємо на три частини (рис.1). Причому в подальших викладеннях при будь-якій величині (геометричній чи фізичній) 1-й індекс вказує на порядок фізичної чи геометричної величини, 2-й – на частину рамної конструкції, якій належить дана величина, наприклад R_{12}-сила реакції в точці 1, що діє на 2-гу частину рами. На рис.2 зображено схематизацію розподілу зовнішніх навантажень несучих елементів рами.

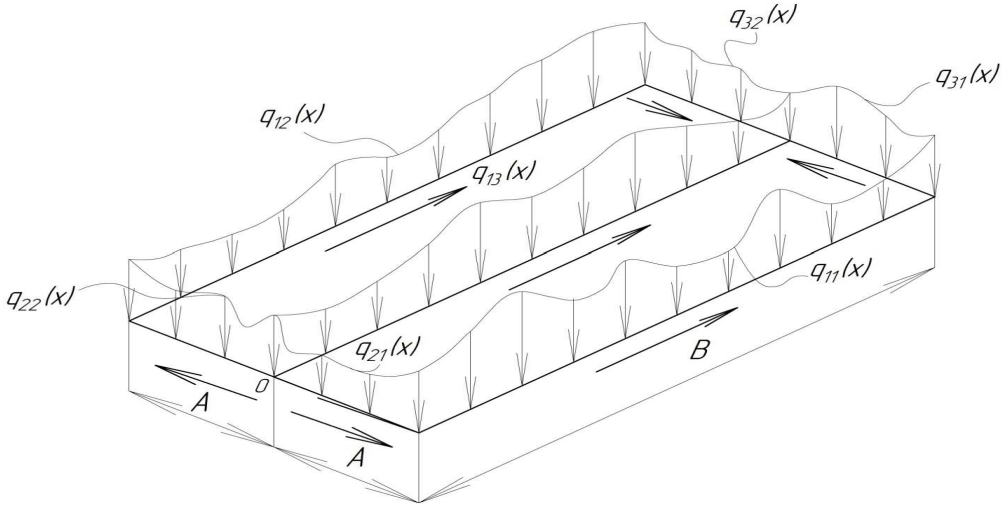

Рисунок 2. Схематизація навантаженості несучих елементів металоконструкції

Figure 2. Scheme of the metal structure supporting elements loading

Сумарне зовнішнє навантаження Q_0, що діє на конструкцію рами, включає вагу добрив $Q_Д$=100000Н та власну вагу металоконструкції з механізмами Q_M=35000Н :

$$Q_0 = \int_0^B q_{11}(x)dx + \int_0^A q_{21}(x)dx + \int_0^A q_{31}(x)dx + \int_0^B q_{12}(x)dx + \int_0^A q_{22}(x)dx + \int_0^B q_{31}(x)dx + \\ + \int_0^B q_{32}(x)dx + \int_0^B q_{13}(x)dx = 135000H, \quad (1)$$

де $q_{ij}(x)$ – функції інтенсивності навантаження на елементах (рис.2);

A, B – лінії контакту кузова машини з рамною конструкцією.

Для запису функцій згинальних моментів, визначення рівнодійних сил та моментів від довільного навантаження використаємо диференціальні залежності внутрішніх силових факторів при згині [5] (рис.3).

Функція згинального моменту на проміжку $(a_{11}+ a_{21}+...+ a_{n1}) \le x \le (a_{11}+ a_{21}+...+ a_{n1}+ a_{(n+1)1})$ (рис.3) [6].

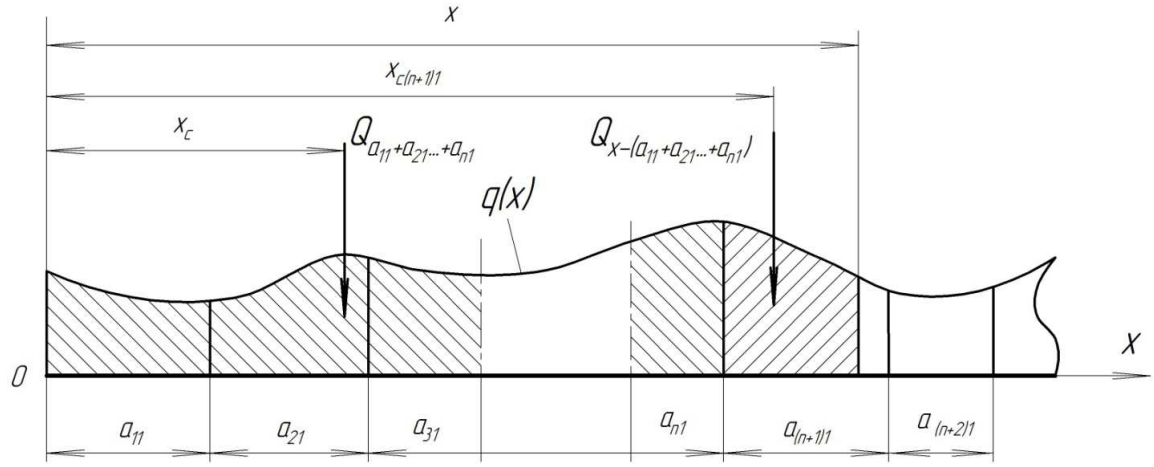

Рисунок 3. Геометрична інтерпретація до запису функцій згинальних моментів

Figure 3. Geometric interpretation before bending moments recording functions

$$M(x) = \int_0^{a_{11}+a_{21}+...+a_{n1}} q(x)\cdot dx\cdot\left(x - \frac{\int_0^{a_{11}+a_{21}+...+a_{n1}} q(x)\cdot x\cdot dx}{\int_0^{a_{11}+a_{21}+...+a_{n1}} q(x)\cdot dx}\right) + \int_{a_{11}+a_{21}+...+a_{n1}}^{x} q(x)\cdot dx\cdot\left(x - \frac{\int_{a_{11}+a_{21}+...+a_{n1}}^{x} q(x)\cdot x\cdot dx}{\int_{a_{11}+a_{21}+...+a_{n1}}^{x} q(x)\cdot dx}\right). \quad (2)$$

Розрахунок статичної невизначеності системи проводиться згідно з ММПЕД [7]. R_{11}, R_{21},. R_{31}, R_{12}, R_{22}, R_{32} – вертикальні реакції.

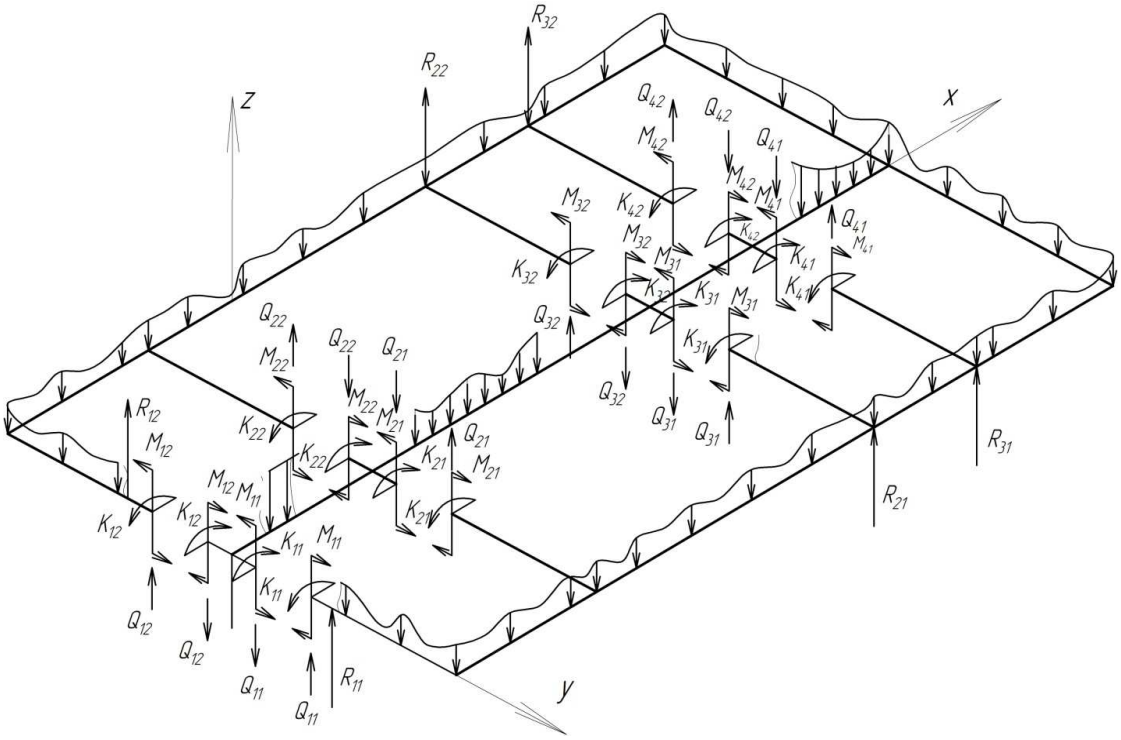

Рисунок 4. Розрахункова схема несучої системи розкидача ПРТ-10

Figure 4. Diagram of the supporting system of spreader PRT-10

Система три рази статично невизначена відносно до зовнішніх опорних реакцій. Для визначення внутрішніх силових факторів раму умовно розрізуємо на три частини (рис.4) [8]. У результаті в кожному сумісному поперечному перетині елемента виникають рівні за величиною та протилежні за напрямками внутрішні силові фактори, наприклад $M_{11}=M_{13(1)}$, $M_{12}=M_{13(2)}$ і т.д.

Горизонтальними складовими перерізуючих сил, нормальними силами та відповідними потенціальними енергіями деформації нехтуємо [9]. Таким чином, рамна конструкція стає 24-ри рази статично невизначеною за відношенням до внутрішніх силових факторів – згинальних та крутних моментів, перерізуючих сил.

Запис загальних функцій потенціальних енергій деформацій від крутних і згинальних моментів для рами проводиться за виокремленими частинами (рис.1, 3).

І -а частина конструктивної системи:

$$U_1 = \int_0^{a_{11}} \frac{\partial_X \left(Q_{11}(x) - \left(\int_0^x \frac{q_{21}}{1} dx \right) \left(x - \left(\int_0^x \frac{q_{21}(x)}{1} dx \right) \Big/ \left(\int_0^x \frac{q_{21}}{1} dx \right) \right) + M_{11} \right)^2}{2EI_1} dx +$$

$$+ \int_{a_{11}}^{a_{11}+a_{21}} \frac{1}{2EI_1} \partial_X \left(Q_{11}(x) - \left(\int_{a_{11}}^x \frac{q_{21}}{1} dx \right) \left(x - \left(\int_{a_{11}}^x \frac{q_{21}(x)}{1} dx \right) \Big/ \left(\int_{a_{11}}^x \frac{q_{21}}{1} dx \right) \right) -$$

$$- \left(\int_0^{a_{11}} \frac{q_{21}}{1} dx \right) \left(x - \left(\int_0^{a_{11}} \frac{q_{21}(x)}{1} dx \right) \Big/ \left(\int_0^{a_{11}} \frac{q_{21}}{1} dx \right) \right) + M_{11} + R_{11}(x - a_{11}) \Bigg)^2 dx +$$

$$+\int_0^{b_{11}}\frac{\partial_X\left(Q_{11}(x)-K_{11}-\left(\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{q_{21}}{1}dx\right)(x)-\left(\int_0^x\frac{q_{11}}{1}dx\right)\left(x-\left(\int_0^x\frac{q_{11}(x)}{1}dx\right)\Big/\left(\int_0^x\frac{q_{11}}{1}dx\right)\right)+R_{11}(x)\right)^2}{2EI_3}dx+$$

$$+\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{\partial_X\left(Q_{21}(x)+M_{21}\right)^2}{2EI_2}dx+\int_{b_{11}}^{b_{21}+b_{11}}\frac{1}{2EI_3}\partial_X\left(\left(Q_{11}(x)+R_{11}(x)-K_{11}+Q_{21}(x-b_{11})-K_{21}-\left(\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{q_{21}}{1}dx\right)(x)-\right.\right.$$

$$\left.\left.-\left(\int_0^{b_{11}}\frac{q_{11}}{1}dx\right)\left(x-\left(\int_0^{b_{11}}\frac{q_{11}(x)}{1}dx\right)\Big/\left(\int_0^{b_{11}}\frac{q_{11}}{1}dx\right)\right)-\left(\int_{b_{11}}^x\frac{q_{11}}{1}dx\right)\left(x-\left(\int_{b_{11}}^x\frac{q_{11}(x)}{1}dx\right)\Big/\left(\int_{b_{11}}^x\frac{q_{11}}{1}dx\right)\right)\right)\right)^2dx+$$

$$+\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{\partial_X\left(Q_{31}(x)+M_{31}\right)^2}{2EI_2}dx+\int_{b_{11}+b_{21}}^{b_{31}+b_{21}+b_{11}}\frac{1}{2EI_3}\partial_X\left(\left(\left(Q_{11}(x)+R_{11}(x)-K_{11}-\left(\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{q_{21}}{1}dx\right)(x)-\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.-\left(\int_0^{b_{11}+b_{21}}\frac{q_{11}}{1}dx\right)\left(x-\left(\int_0^{b_{11}+b_{21}}\frac{q_{11}(x)}{1}dx\right)\Big/\left(\int_0^{b_{11}+b_{21}}\frac{q_{11}}{1}dx\right)\right)-\left(\int_{b_{11}+b_{21}}^x\frac{q_{11}}{1}dx\right)\cdot\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.\cdot\left(x-\left(\int_{b_{11}+b_{21}}^x\frac{q_{11}(x)}{1}dx\right)\Big/\left(\int_{b_{11}+b_{21}}^x\frac{q_{11}}{1}dx\right)\right)+Q_{21}(x-b_{11})-K_{21}+Q_{31}(x-b_{11}-b_{21})-K_{31}+\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.+R_{21}(x-b_{11}-b_{21})\right)\right)^2\right)dx+\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{\partial_X\left(Q_{41}(x)+M_{41}\right)^2}{2EI_2}dx+\int_{b_{11}+b_{21}+b_{31}}^{b_{41}+b_{31}+b_{21}+b_{11}}\frac{1}{2EI_3}\partial_X\left(\left(Q_{11}(x)+R_{11}(x)-K_{11}-\right.\right.$$

$$-\left(\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{q_{21}}{1}dx\right)(x)-\left(\int_0^{b_{11}+b_{21}+b_{31}}\frac{q_{11}}{1}dx\right)\left(x-\left(\int_0^{b_{11}+b_{21}+b_{31}}\frac{q_{11}(x)}{1}dx\right)\Big/\left(\int_0^{b_{11}+b_{21}+b_{31}}\frac{q_{11}}{1}dx\right)\right)-$$

$$-\left(\int_{b_{11}+b_{21}+b_{31}}^x\frac{q_{11}}{1}dx\right)\left(x-\left(\int_{b_{11}+b_{21}+b_{31}}^x\frac{q_{11}(x)}{1}dx\right)\Big/\left(\int_{b_{11}+b_{21}+b_{31}}^x\frac{q_{11}}{1}dx\right)\right)+Q_{21}(x-b_{11})-K_{21}+Q_{31}(x-b_{11}-b_{21})-$$
$$\left.-K_{31}+R_{21}(x-b_{11}-b_{21})+Q_{41}(x-b_{11}-b_{21}-b_{31})-K_{41}+R_{31}(x-b_{11}-b_{21}-b_{31})\right)^2\Big)dx+$$

$$+\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{1}{2EI_1}\partial_X\left(\left(\left(Q_{11}(x)-Q_{11}(a_{11}+a_{21})+R_{11}(x)-R_{11}(a_{21})-M_{11}+Q_{21}(x)-Q_{21}(a_{11}+a_{21})-M_{21}+\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.+Q_{31}(x)-Q_{31}(a_{11}+a_{21})-M_{31}+R_{21}(x)+Q_{41}(x)-Q_{41}(a_{11}+a_{21})-M_{41}+R_{31}(x)-\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.-\left(\int_0^{b_{11}+b_{21}+b_{31}+b_{41}}\frac{q_{11}}{1}dx\right)(x)-\left(\int_0^x\frac{q_{31}}{1}dx\right)\left(x-\left(\int_0^x\frac{q_{31}(x)}{1}dx\right)\Big/\left(\int_0^x\frac{q_{31}}{1}dx\right)\right)-\left(\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{q_{21}}{1}dx\right)(x)+\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.+\left(\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{q_{21}}{1}dx\right)\left(a_{11}+a_{21}-\left(\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{q_{21}(x)}{1}dx\right)\Big/\left(\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{q_{21}}{1}dx\right)\right)\right)\right)\right)^2dx+\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{\partial_X\left(K_{11}\right)^2}{2GIk_1}dx+$$

$$+\int_0^{b_{11}}\frac{\partial_X\left(Q_{11}(a_{11}+a_{12})+R_{11}(a_{21})+M_{11}-\left(\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{q_{21}}{1}dx\right)\left(a_{11}+a_{21}-\left(\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{q_{21}(x)}{1}dx\right)\Big/\left(\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{q_{21}}{1}dx\right)\right)\right)^2}{2GIk_3}dx+$$

$$+\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{\partial_X\left(K_{21}\right)^2}{2GIk_2}dx+\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{\partial_X\left(K_{31}\right)^2}{2GIk_2}dx+\int_{b_{11}}^{b_{11}+b_{21}}\frac{\partial_X\left(Q_{11}(a_{11}+a_{12})+R_{11}(a_{21})+M_{11}\right.}{2GIk_3}-$$

$$-\frac{\left(\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{q_{21}}{1}dx\right)\left(a_{11}+a_{21}-\left(\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{q_{21}(x)}{1}dx\right)\Big/\left(\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{q_{21}}{1}dx\right)\right)+Q_{21}(a_{11}+a_{21})+M_{21})^2}{2GIk_3}dx+$$

$$+\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{\partial_X(K_{41})^2}{2GIk_2}dx+\int_{b_{11}+b_{21}}^{b_{11}+b_{21}+b_{31}}\frac{1}{2GIk_3}\partial_X(Q_{11}(a_{11}+a_{21})+R_{11}(a_{21})+M_{11}-\left(\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{q_{21}}{1}dx\right)\cdot$$

$$\cdot\left(a_{11}+a_{21}-\left(\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{q_{21}(x)}{1}dx\right)\Big/\left(\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{q_{21}}{1}dx\right)\right)+Q_{21}(a_{11}+a_{21})+M_{21}+Q_{31}(a_{11}+a_{21})+M_{31})^2dx+$$

$$+\int_{b_{11}+b_{21}+b_{31}}^{b_{11}+b_{21}+b_{31}+b_{41}}\frac{1}{2GIk_3}\partial_X(Q_{11}(a_{11}+a_{21})+R_{11}(a_{21})+M_{11}-\left(\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{q_{21}}{1}dx\right)\cdot$$

$$\cdot\left(a_{11}+a_{21}-\left(\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{q_{21}(x)}{1}dx\right)\Big/\left(\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{q_{21}}{1}dx\right)\right)+Q_{21}(a_{11}+a_{21})+M_{21}+Q_{31}(a_{11}+a_{21})+M_{31}+$$

$$Q_{41}(a_{11}+a_{21})+M_{41})^2dx+\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{1}{2GIk_1}\partial_X((Q_{11}(b_{11}+b_{21}+b_{31}+b_{41})+R_{11}(b_{11}+b_{21}+b_{31}+b_{41})-K_{11}-$$

$$-\left(\int_0^{a_{11}+a_{21}}\frac{q_{21}}{1}dx\right)(b_{11}+b_{21}+b_{31}+b_{41})-\left(\int_0^{b_{11}+b_{21}+b_{31}+b_{41}}\frac{q_{11}}{1}dx\right)(b_{11}+b_{21}+b_{31}+b_{41}-$$

$$-\left(\int_0^{b_{11}+b_{21}+b_{31}+b_{41}}\frac{q_{11}(x)}{1}dx\right)\Big/\left(\int_0^{b_{11}+b_{21}+b_{31}+b_{41}}\frac{q_{11}}{1}dx\right)\Big)+Q_{21}(b_{21}+b_{31}+b_{41})-K_{21}+Q_{31}(b_{31}+b_{41})-$$

$$-K_{31}+R_{21}(b_{31}+b_{41})+R_{31}(b_{41})+Q_{41}(b_{41})-K_{41})^2)dx. \qquad (3)$$

Аналогічно записуються вирази для двох інших частин конструктивної системи. Загальна потенціальна енергія деформації конструкції

$$U=U_1+U_2+U_3, \qquad (4)$$

де U_1, U_2, U_3 – потенціальні енергії деформацій другої і третьої частини конструктивної системи.

Розрахунок несучої системи розкидача проводиться для встановлених трьох характерних випадків зовнішнього навантаження (рис.5). За (1) визначено величину інтенсивності навантаження для зазначених випадків розподілу (рис.5). Результати наведено в табл.1.

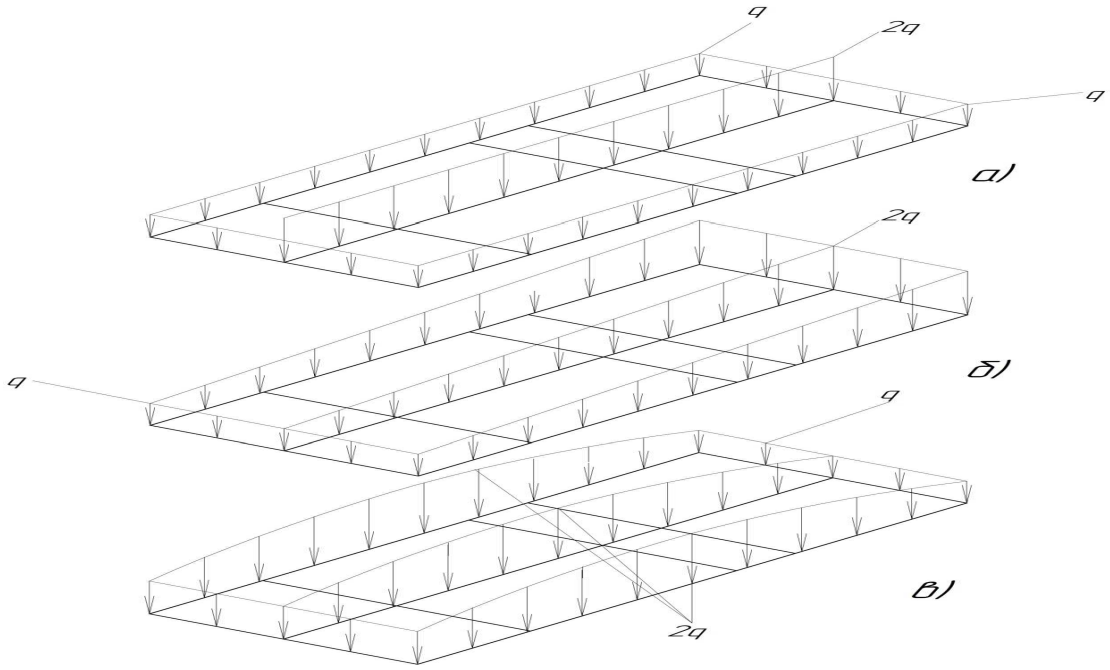

Рисунок 5. Характерні типи навантаженості металоконструкцій

Figure 5. Typical types of metal loading

Таблиця 1

Внутрішні силові фактори в елементах металоконструкції

№ з/п	Зусилля	Схематизація навантаженості, рис.5,а	Схематизація навантаженості, рис.5,б	Схематизація навантаженості, рис.5,в
1	*2*	*3*	*4*	*5*
1	q11(x)	q	q+q x/5.3	((-4q/B2)(x-B/2)2+2q)
2	q21(x)	q	q	q
3	q31(x)	q	2q	q
4	q12(x)	q	q+q x/5.3	((-4q/B2)(x-B/2)2+2q)
5	q22(x)	q	q	q
6	q32(x)	q	2q	q
7	q13(x)	2q	q+q x/5.3	((-4q/B2)(x-B/2)2+2q)
8	q, Н/м	5275	4434	4703
9	R11, Н	19177	13955	17775.4
10	R21, Н	-5190	-21904.1	20331
11	R31, Н	53533	75449.2	70056.3
12	R12, Н	19177	13955	17775.4
13	R22, Н	-5190	-21904.1	20331
14	R32, Н	53533	75449.2	70056.3
15	M11, Нм	-593.354	-1991.31	-2160.56,
16	M21, Нм	486.45	-1337.51	-2555.43
17	M31, Нм	9460.94	7255.29	2951.73
18	M41, Нм	10943	10196.7	5000.01

Продовж. табл. 1

№ з/п	Зусилля	Схематизація навантаженості, рис.5,а	Схематизація навантаженості, рис.5,б	Схематизація навантаженості, рис.5,в
1	*2*	*3*	*4*	*5*
19	K11, Нм	-526.241	-104.678	82.7678
20	K21, Нм	-716.776	-262.522	0.880326
21	K31, Нм	-860.837	-1429.59	-1067.83
22	K41, Нм	-111.185	-577.656	-280.423
23	Q11, Н	-7015.44	-3361.46	-5144
24	Q21, Н	-441.412	1219.24	2325.84
25	Q31, Н	-8602.54	-6594.04	-2681.96
26	Q41, Н	-9957.38	-9281.41	-4550.28
27	M12, Нм	-593.354	-1991.31	-2160.56,
28	M22, Нм	486.45	-1337.51	-2555.43
29	M32, Нм	9460.94	7255.29	2951.73
30	M42, Нм	10943	10196.7	5000.01
31	K12, Нм	-526.241	-104.678	82.7678
32	K22, Нм	-716.776	-262.522	0.880326
33	K32, Нм	-860.837	-1429.59	-1067.83
34	K42, Нм	-111.185	-577.656	-280.423
35	Q12, Н	-7015.44	-3361.46	-5144
36	Q22, Н	-441.412	1219.24	2325.84
37	Q32, Н	-8602.54	-6594.04	-2681.96
38	Q42, Н	-9957.38	-9281.41	-4550.28

Отже, визначено, що небезпечним перетином рамної конструкції є ділянка лонжерона рами, до якої кріпиться вісь опорних коліс (рис.6).

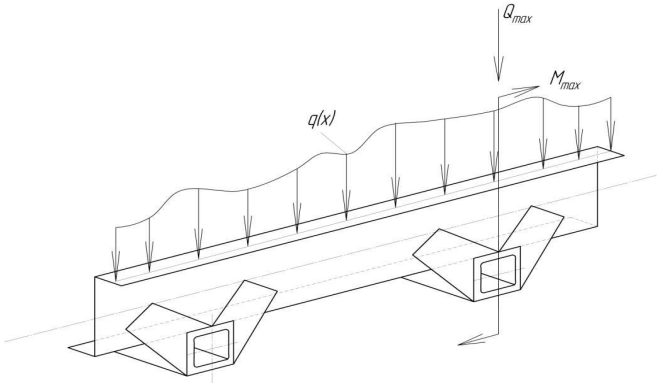

Рисунок 6. Небезпечна ділянка рамної конструкції

Figure 6. Dangerous area of the frame construction

Після визначень геометричних характеристик досліджуваного поперечного перетину обчислено максимальні напруження, а також коефіцієнти запасу міцності [10]. Результати представлено в табл.2. Отримані результати з кореляцією у межах 6% відповідають отриманим при експериментальних польових випробуваннях розкидача ПРТ-10 [8].

Таблиця 2

НДС максимально навантаженого елемента металоконструкції розкидача

№ з/п	Схема навантаження	$M_{\max}$, Нм	$\sigma_{\max}$, МПа	$Q_{\max}$, Н	σ_A, МПа	τ_A, МПа	$\sigma^{IV}_{розр}$, МПа	n_T
1	Рис.5а	18808	93,8	27075	90	11,5	92,2	2,60
2	Рис.5б	26277	131,0	43299	125,7	18,4	129,7	1,85
3	Рис.5в	28283	141,0	43103	135,3	18.3	139,0	1,73

Висновки. Запропоновано аналітичні залежності для дослідження напруженого стану рамної конструкції причепа ПРТ-10. Завантаження твердих добрив (органічних, неорганічних) необхідно проводити рівномірно по поверхні кузова (рис.5а). Оптимізовано розміри поперечних перетинів елементів рамної конструкції, зменшено металоємність конструктивної системи, патент на корисну модель [11].

Досліджено комплексний розподіл характерних для машинобудування зовнішніх навантажень елементів конструктивних систем з моделюванням НДС. Складено універсальний алгоритм запису адитивних функцій згинальних і крутних моментів, а також потенціальної енергії деформацій з урахуванням шуканих величин зовнішніх опорних реакцій та внутрішніх силових факторів. На прикладі несучої металоконструкції розкидача твердих добрив ПРТ-10 проведено аналітичні дослідження з обґрунтуванням вірогідних випадків розподілу зовнішніх навантажень за периметром рами досліджуваної машини. Порівнянням отриманих результатів зі встановленими експериментальним шляхом кількісними і якісними характеристиками НДС тримкої металоконструкції машини для внесення добрив доведено ефективність застосування запропонованих підходів і моделей при розрахунках несучих рамних металоконструкцій з довільним заданим розподілом зовнішньої навантаженості.

Conclusions. Analytical dependences for the study of stress state body frame construction RTA-10 have been proposed. Loading of solid fertilizers (organic and inorganic) should be carried out evenly over the surface of a body (fig.5a). The sizes of the frame construction that reduce elements cross-sections, the metal consumption of the structural system have been specified (Patent obtained).

Список використаної літератури

1. Волков, П. М. Основы теории и расчета сельскохозяйственных машин на прочность и надежность [Текст]; под ред. П. М. Волкова, М. М. Тененбаума. – М. : Машиностроение, 1977. – 310 с.
2. Еременко, С. Ю. Методы конечных элементов в механике деформируемых тел [Текст] / С. Ю. Еременко. – Харьков: Основа, 1991. – 272 с.
3. Черников, С. А., О достоверности расчетных оценок НДС рамы грузового автомобиля [Текст] / С. А. Черников, К. В. Садчиков // Проблемы машиностроения и надежность машин. – 1998. – №3. – С. 117–121.
4. Вырский, А. Н. Исследование нагруженности рамных конструкций [Текст] / А. Н. Вырский // Тракторы и сельхозмашины. – 1990. – №11. – С. 26–27.
5. Беляев, Н. М. Сопротивление материалов: 14-е издание [Текст] / Н. М. Беляев. – М. : Наука. – 1965. – 856 с.
6. Довбуш, Т. А. Аналітичне дослідження напружено-деформованого стану складних конструктивних систем з довільним зовнішнім навантаженням. [Текст] / Т. А. Довбуш, Н. А. Рубінець, А. Д. Довбуш, Н. І. Хомик. – Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Х. : ХНТУСГ. – 2015. – Вип. 158. – С. 44–50.
7. Рибак, Т. І. Пошукове конструювання на базі оптимізації ресурсу мобільних сільськогосподарських машин [Текст] / Т. І. Рибак. – ВАТ. «ТВПК «ЗБРУЧ». – 2003. – 332 с.
8. Попович, П. В. Методи оцінки ресурсу несучих систем причіпних машин для внесення добрив з врахуванням впливу агресивних середовищ: дис. … доктора технічних наук. 05. 05. 11 // П. В. Попович. – Тернопіль: –ТНТУ ім. І. Пулюя, 2015. – 443с.

9. Рибак, Т. І. Обґрунтування модифікації методу мінімуму потенціальної енергії деформації (ММПЕД). Технічний сервіс машин для рослинництва [Текст] / Т. І. Рибак, Т. А. Довбуш, Г. Б. Цьонь // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – 2013. – Вип. 134, С. 260–266.

10. Рудицын, М. Н. Справочное пособие по сопротивлению материалов [Текст] / М. Н. Рудицын, П. Я. Артемов, Любошиц. – Минск: Вышэйшая школа, 1970. – 640 с.

11. Попович П. В., Бабій А. В., Сташків М. Я. Довбуш Т. А. Патент України на корисну модель №92328, МПКА01С15/00. Рама розкидача твердих органічних добрив від 11. 08. 2014 р. ; заявлено 18. 03. 2014р. ; опубліковано 11. 08. 2014р. ; Бюл. №15.

Отримано 15.03.2015