

ЕНЕРГЕТИЧНІ МЕТОДИ В РОЗРАХУНКУ НА МІЦНІСТЬ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН З ВИКОРИСТАННЯМ ЕОМ

В статті подано опис методів, що дозволяють полегшити розрахунки несучих конструкцій. Ці методи базуються на використанні основних концепцій енергії деформації і додаткової енергії і носять назву енергетичних. Як приклад наведено використання методу мінімуму потенціальної енергії для розрахунку крайньої секції штанги обприскувача ОПШ-15-01.

У сільськогосподарських машинах металоконструкції становлять, за деякими оцінками, до 80% всієї машини. Металоконструкції також використовують в якості функціональних елементів сільськогосподарських машин, наприклад стріла навантажувача-екскаватора, штанги обприскувачів тощо. Звідси впливають функціональні можливості, надійність і довговічність сільськогосподарської техніки, а відтак і розробка ефективних методів розрахунку останніх на міцність в статичній, динамічній постановці задач і вироблення на цій основі конструкторських рішень з їх оптимізацією.

Металоконструкції сільськогосподарських машин здебільшого представляють плоскі або просторові статично невизначені рами, ферми, розрахунок яких, тобто визначення реакцій, результуючих напружень, переміщень носить складний і об'ємний характер навіть у статичній постановці задачі [1–3].

Пошук і розробка інженерних методів розрахунку подібних конструкцій з метою підвищення довговічності, зменшення матеріаломісткості і створення конкурентно-спроможної сільськогосподарської техніки — основне завдання сучасного сільськогосподарського машинобудування.

Дослідження рамних, фермних конструкцій сільськогосподарських машин аналітичним, а згодом числовим методами, що здешевлює сам процес дослідження, застосовуючи ЕОМ, доцільно проводити, використовуючи основні концепції енергії деформації і додаткової енергії, на яких базуються енергетичні методи розрахунку конструкцій [2, 4]. Останні використовують першу теорему Кастіліано

$$F_i = \frac{\partial U}{\partial \delta_i}, \quad (1)$$

принцип стаціонарності потенціальної енергії

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \delta_i} = 0, \quad (2)$$

метод Релея-Рітца, а також зв'язок цих методів з методами переміщень і жорсткостей розрахунку конструкцій.

При використанні додаткової енергії застосовують теорему Кротті-Енгессера

$$\delta_i = \frac{\partial U^*}{\partial F_i} \quad (3)$$

і принцип мінімуму додаткової енергії

$$\frac{\partial U^*}{\partial X_i} = 0, \quad (4)$$

які тісно пов'язані з методами сил і податливостей розрахунку конструкцій.

Для лінійно деформівних конструкцій теорему про додаткову енергію зводять до

другої теореми Кастіліано

$$\delta_i = \frac{\partial U}{\partial F_i} \quad (5)$$

і принципу мінімуму енергії деформації

$$\frac{\partial U}{\partial X_i} = 0. \quad (6)$$

Використовуючи метод мінімуму потенціальної енергії деформації системи, проведені розрахунки крайньої секції штанги обприскувача ОПШ-15-01 з базальтопластикового композиту.

Секцію штанги вищенаведеного обприскувача, зовнішній вигляд якої показаний на рис. 1, можна представити розрахунковою схемою у вигляді консольно защемленої балки з двома тросами-розтяжками (рис. 2).

Припустимо, що на секцію штанги діє лише рівномірно розподілене навантаження від власної ваги останньої і ваги обприскуючої хімічної рідини, яка знаходиться у трубах секції. Це рівномірно розподілене навантаження з врахуванням коефіцієнта динамічності визначимо за формулою

$$q = \frac{(m + m_0)g}{l} \cdot k_d, \quad (7)$$

де m — маса розрахункової секції штанги;
 m_0 — маса хімічної рідини, яка знаходиться у трубах секції;
 g — прискорення вільного падіння;
 l — довжина розрахункової штанги;
 k_d — коефіцієнт динамічності.

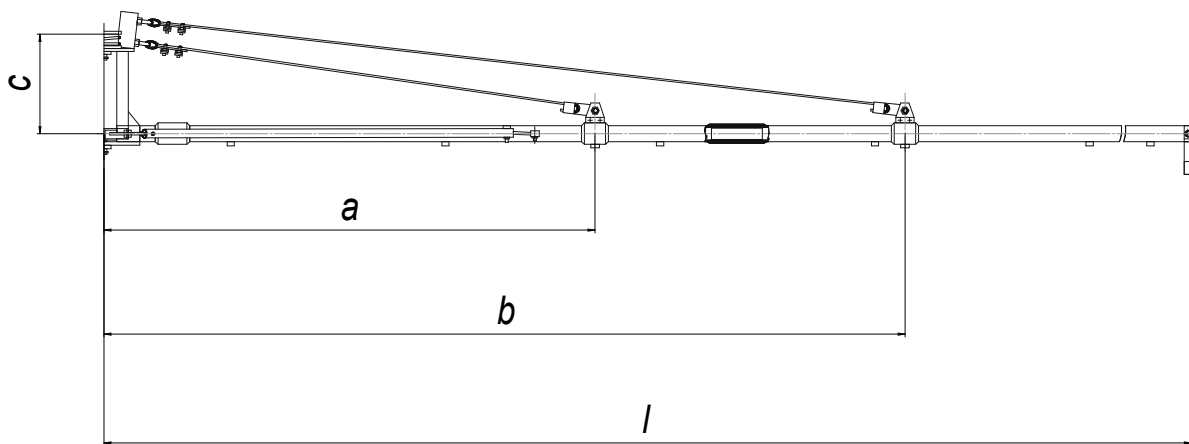


Рисунок 1 - Зовнішній вигляд крайньої секції штанги обприскувача ОПШ-15-01

Відповідно в опорі (защемленні) секції штанги виникають реактивні сили P_x , P_y і реактивний момент M_0 , а в тросах-розтяжках реактивні сили P_1 і P_2 . Отже, система є два рази статично невизначеною.

Розкриття статичної невизначеності подібних і рамних конструкцій сільськогосподарських машин за допомогою методу сил або переміщень приводить до складності і громіздкості навіть приблизних теоретичних розрахунків. тому при розрахунках стержневих конструкцій доцільно використовувати метод мінімуму потенціальної енергії, що забезпечує простоту і точність розрахунків, необхідних для інженерної практики.

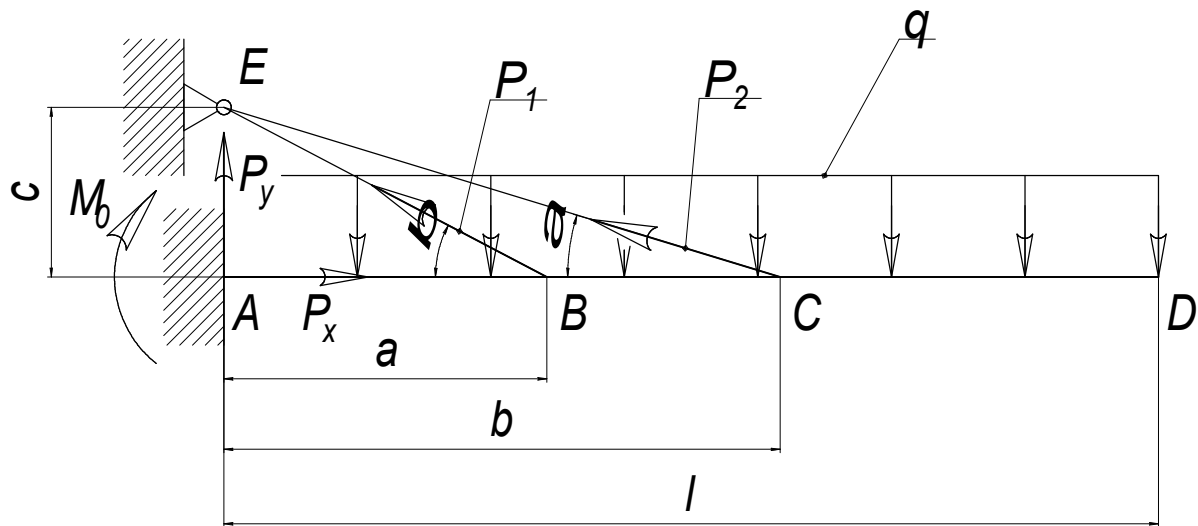


Рисунок 2 - Розрахункова схема секції штанги обприскувача ОПШ-15-01

Для визначення реактивних сил P_1 і P_2 , які виникають в тросах-розтяжках, складемо вираз функції потенціальної енергії від згинальної деформації балки (рис. 2).

$$U = \frac{1}{2EI} \left[\int_0^{l_1} \left(-qx \frac{x}{2} \right)^2 dx + \int_{l_1}^{l_2} \left(-qx \frac{x}{2} + P_2 \sin \alpha (x - l_1) \right)^2 dx + \int_{l_2}^{l_3} \left(-qx \frac{x}{2} + P_2 \sin \alpha (x - l_1) + P_1 \sin \beta (x - l_1 - l_2) \right)^2 dx \right], \quad (8)$$

де α — кут при вершині C;
 β — кут при вершині B;
 $l_1 = DC$;
 $l_2 = CB$;
 $l_3 = BA$.

Для конструкції, яка знаходиться в стані стійкої рівноваги, стаціонарне значення додаткової енергії дійсно є мінімальним, що відповідає рівнянню (4). При лінійній деформації конструкції додаткова енергія і енергія деформації рівні, так що принцип мінімуму додаткової енергії зводиться до принципу мінімуму енергії деформації, що відповідає рівнянню (6).

Продиференціюємо функцію потенціальної енергії відповідно за параметрами P_1 і P_2 та прирівняємо їх до нуля згідно з рівнянням (6), отримаємо:

$$\frac{\partial U}{\partial P_2} = \frac{1}{EI} \left[\int_{l_1}^{l_2} \left(-\frac{1}{2}qx^2 + P_2 \sin \alpha (x - l_1) + P_1 \sin \beta (x - l_1 - l_2) \right) \sin \alpha (x - l_1) dx + \int_{l_2}^{l_3} \left(-\frac{1}{2}qx^2 + P_2 \sin \alpha (x - l_1) \right) \sin \alpha (x - l_1) dx \right] = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial U}{\partial P_1} = \frac{1}{EI} \left[\int_{l_1}^{l_2} \left(-\frac{1}{2}qx^2 + P_2 \sin \alpha (x - l_1) + P_1 \sin \beta (x - l_1 - l_2) \right) \sin \beta (x - l_1) dx \right] = 0 \quad (10)$$

Із рівнянь (9) і (10) можна визначити реактивні сили P_1 і P_2 .

Склавши статичні рівняння рівноваги секції штанги, можна визначити реактивні сили P_x і P_y і реактивний момент M_0 в зацімленні.

Для виконання подібних розрахунків рамних конструкцій використовують ЕОМ, зокрема програму «MathCAD», або, для проектування складних стержневих конструкцій, отримання точних результатів і їх візуалізації,— спеціалізовану програму «ЛИРА» [5].

Вона ґрунтується на використанні методу кінцевих елементів. Метод кінцевих елементів (МКЕ) — основний метод сучасної механіки, що лежить в основі переважної більшості сучасних програмних комплексів, призначених для виконання розрахунків тримких конструкцій на ЕОМ. МКЕ також використовується для вирішення інших різноманітних задач як в області міцнісних розрахунків, так і в багатьох інших сферах, наприклад задачах гідродинаміки, електромагнетизму, теплопровідності і багатьох інших.

Метод кінцевих елементів дозволяє практично повністю автоматизувати розрахунок стрижневих систем, хоча, як правило, вимагає виконання значно більшого числа обчислювальних операцій в порівнянні з класичними методами будівельної механіки. Проте в сучасних умовах великий об'єм обчислень не є серйозною проблемою, і, у зв'язку з цим, при впровадженні ЕОМ в інженерну практику МКЕ набув широкого поширення. Тому знання основ методу кінцевих елементів і сучасних програмних засобів, що дозволяють на його основі вирішувати різноманітні задачі, у наш час для інженера є абсолютно необхідним.

Розробник програмного комплексу «ЛИРА» (ПК «ЛИРА») є науково-дослідницький інститут автоматизованих систем у будівництві НДІАСБ (Київ).

ПК «ЛИРА» — це багатофункціональний програмний комплекс для розрахунку, дослідження і проектування конструкцій різного призначення, який з успіхом застосовується в розрахунках об'єктів будівництва, при проектуванні сільськогосподарських машин, у машинобудуванні, мостобудуванні, розрахунках об'єктів атомної енергетики, нафтовидобувної промисловості й у багатьох інших сферах, де актуальні методи будівельної механіки. Він дозволяє досліджувати загальну стійкість моделі, що розраховується, перевірити міцність перетинів елементів за різними теоріями міцності, надає можливість робити розрахунки об'єктів з обліком фізичної і геометричної нелінійності, моделювати процес зведення об'єкта розрахунку з урахуванням монтажу і демонтажу елементів.

Розрахункова схема (рис. 3) є ідеалізованою моделлю конструкції. Модель розбивається на кінцеві елементи, причому в результаті такої розбивки з'являються вузли. Елементи і вузли схеми нумеруються. В опорні вузли варто ввести відповідні зв'язки (заборонити переміщення по яких-небудь степенях свободи або обмежити переміщення вузла кінцевими елементами, що моделюють роботу зв'язку). Нумерація вузлів і елементів визначає послідовність задання вихідної інформації вхідною мовою і читання результатів рахунку. Кінцеві елементи, що мають однакові характеристики жорсткості, поєднуються в типи жорсткості.

Динамічні впливи задаються у вигляді вузлових навантажень, що діють вздовж осей глобальної або локальної систем координат. Вага об'єкту задається як власна вага конструкцій, устаткування і т.п., при цьому допускається використання як місцевих, так і вузлових навантажень.

Використовуючи вищезазначений програмний комплекс ми отримали результати у вигляді епюр: епюра повздовжніх сил $N(x)$, епюра поперечних сил $Q(x)$, епюра згинальних моментів $M(x)$ (рис. 4-6), а також вигляд деформованої системи і мозаїка переміщень (рис. 7, 8).

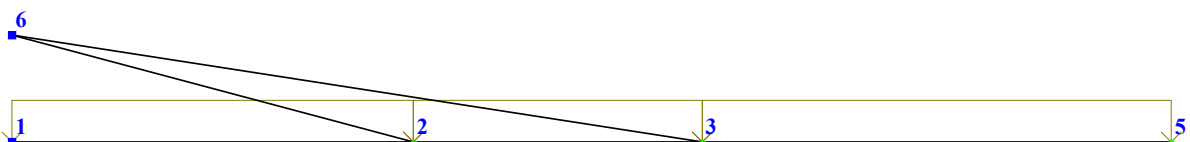


Рисунок 3 - Вигляд розрахункової схеми в САПР «ЛІРА»

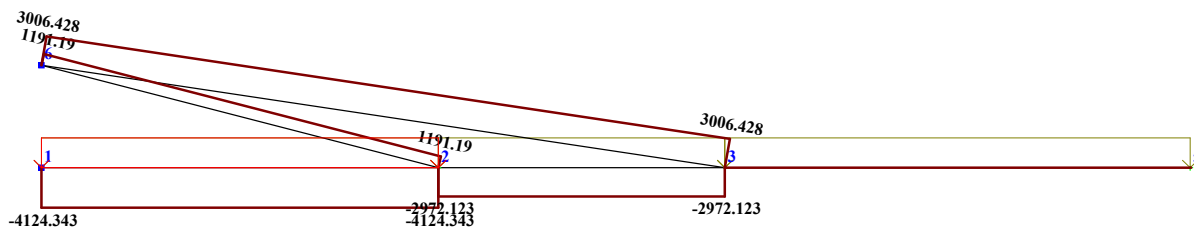


Рисунок 4 - Епюра повздовжніх сил $N(x)$. Максимальне значення на ділянці 1-2 $N = -4124$ Н

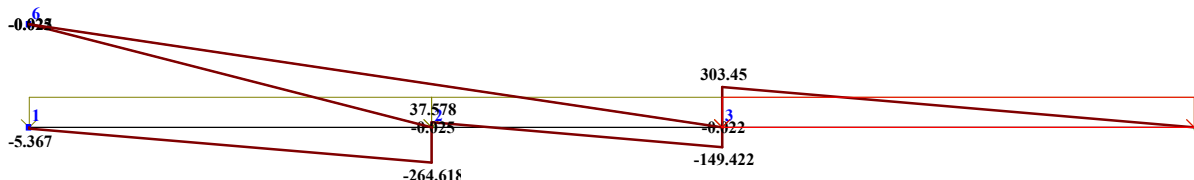


Рисунок 5 - Епюра поперечних сил $Q(x)$. Максимальне значення на ділянці 3-5 $Q = 453$ Н

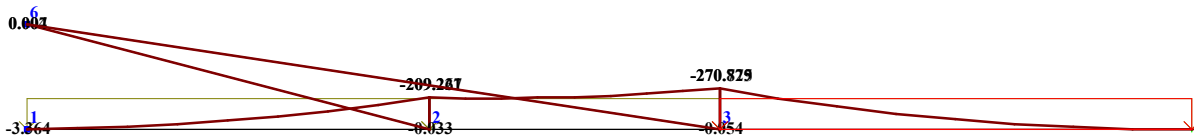


Рисунок 6 - Епюра згинальних моментів $M(x)$. Максимальне значення на ділянці 3-5 $M = 271$ Нм

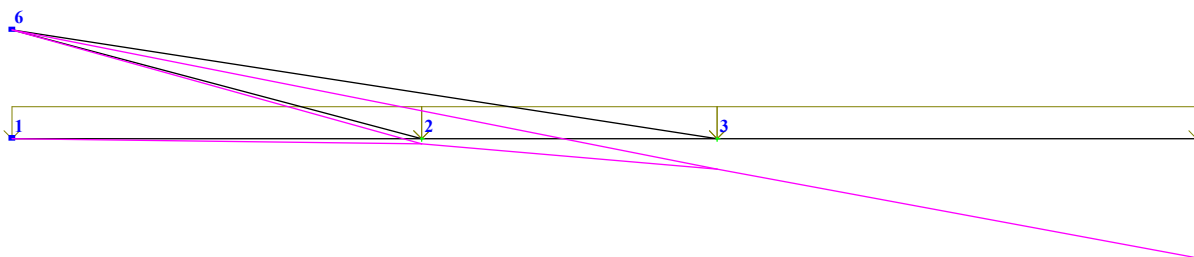


Рисунок 7 - Деформована система. Максимальне значення прогину в точці 5 складає 30 мм

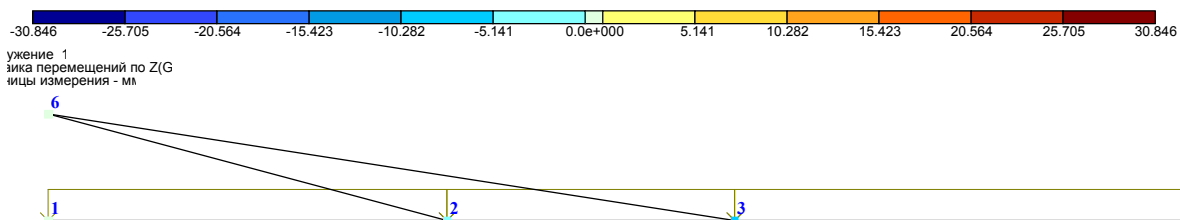


Рисунок 8 - Мозаїка переміщень

Висновки

При вирішенні практичної задачі був використаний потужний математичний інструмент, такий, як енергетичні методи розрахунку конструкцій. Крім того, використавши сучасні програмно-апаратні засоби, були проведені аналогічні розрахунки, що дуже добре візуалізовані. Отже, сучасний рівень розвитку теоретичної і програмно-апаратної бази дозволяє значно полегшити проведення як теоретичних

досліджень, так і практичних розрахунків. Таким чином, можна підвести ризик і сказати, що нинішній рівень розвитку науки вимагає від інженера знань як теоретичних основ методів і вміння їх використовувати на практиці, так і знань програмних засобів. Сучасна інженерія не може існувати без комплексного, вмілого поєднання цих двох механізмів.

In the article the description of methods which allow to facilitate the calculation of bearing constructions is given. These methods are based on the use of basic conceptions of energy of deformation and additional energy and carry the name of power. How an example is, the use of method of minimum of potential energy arises up for the calculation of the last section of barbell sprinkler OSh-15-01.

Література

1. Рибак Т.І., Пошукове конструювання на базі оптимізації ресурсу мобільних сільськогосподарських машин.— Тернопіль: ВАТ «ТВПК „Збруч”», 2003.—332 с.
2. Киселёв В.А., Строительная механика.— М.: Стройиздат, 1976.—511 с.
3. Основы теории и расчета сельскохозяйственных машин на прочность и надежность. Под ред. П.М. Волкова, М.М. Тененбаума.— М.: Машиностроение, 1977.—310 с.
4. Соппротивление материалов. Под ред. акад. АН УССР Г.С. Писаренко — 5-е изд., перераб. и доп.— К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986.—775 с.
5. Городецкий А.С., Евзеров И.Д., Стрелец-Стрелецкий Е.Б. и др. Метод конечных элементов: теория и численная реализация. Программный комплекс ЛИРА-Windows.— К.: Факт, 1997.— 377 с.

Одержано 10.01.2006 р.