

УДК 621.87

DOI: 10.15276/pidtt.3.64.2020.08

Іваненко О. І.¹, Крупко І. В.², Єрмакова С. О.²¹ Харківський національний автомобільно-дорожній університет² Донбаська державна машинобудівна академія

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ БАШТОВОГО КРАНУ З УРАХУВАННЯМ РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕНЬ НА ОПОРИ.

Анотація. У статті приведена методика розрахунку навантажень на опорні елементи баштового крана з урахуванням лінійних розмірів машини та просторового характеру дії навантажень. Розроблений алгоритм розрахунку, на основі математичної моделі, дозволяє провести теоретичні дослідження по впливу різних факторів на завантаженість опорних елементів за різними умовами роботи. Для дослідження була розроблена програма в пакеті Maple.

Ключові слова: дослідження, кран, вплив, розподіл, навантаження, опори, стійкість, алгоритм, програма, результати.

Вступ. Розвиток і подальше удосконалення вітчизняних баштових кранів в наш час неможливий без ретельного дослідження навантажень, діючих на кран, обґрунтування конструкцій опор баштових кранів за різних умов роботи, без вивчення фактичних режимів використання кранів у будівництві, без розробки прогресивних методів розрахунку стійкості, розрахунку навантажень на опори, які виникають у основі крана при довільних положеннях стріли, вильоті й вантажу на гаку.

Постановка проблеми. Аналіз конструкцій, способів установки і умов експлуатації баштових кранів та методики розрахунку їх стійкості показує, що останнім часом виникає необхідність в установці таких вантажопідйомних кранів, які б забезпечували навантажувально-розвантажувальні роботи в умовах обмежених майданчиків. При цьому виникає питання, у якому важливим чинником становиться стійкість кранів при різних умовах роботи та різних вітрових навантаженнях. У цьому випадку на перший план виходить правильний вибір опорного

контур, для чого дуже важливим є визначення навантажень на опорні елементи.

Огляд останніх публікацій. Дослідженням в області міцності, стійкості і впливу на стійкість зовнішнього навантаження присвячені роботи А.А. Вайнсона, В.О. Подобєда, М.Ф. Барштейна, Л.О. Невзорова, В.Г. Крупка, О.В. Синельщикова, В.О. Обиденова і ін. Аналіз наукових робіт за останні роки показав, що зусилля дослідників зосереджені на вдосконаленні моделей зовнішнього нестационарного навантаження; пошуку найбільш навантажених елементів металоконструкції; баштових кранів певної конструкції, прийнятті інженерних і конструктивних рішень щодо зниження напружень які виникають, а також на розробці адаптивних систем керування баштовими кранами для зниження впливу зовнішніх навантажень. Більшість авторів вказують на недосконалість методів проектування баштових кранів, що не дозволяє враховувати піддатливість металоконструкції крана і наявність додаткових навантажень.

Так в [1] на основі теоретичних досліджень і проведеного математичного моделювання розроблено метод стабілізації стійкості стаціонарного баштового крана в умовах високих вітрових навантажень з використанням системи керування положенням стріли, що дозволяє забезпечити його стійкість в умовах вітрових навантажень. Аналіз роботи баштового крана при максимально допустимій швидкості вітру - 24 м/с в робочому стані крана і 30 м/с - в неробочому, показав, що виходячи зі значень коефіцієнтів запасу стійкості баштового крана відхилення стріли крана від паралельного положення щодо вітрового потоку в неробочому стані не повинно перевищувати 30^0 . З використанням апарату нечіткої логіки, розроблені алгоритми прогнозування збільшення швидкості вітрового потоку в робочому стані крана, регулювання стійкості при перевищенні гранично допустимої швидкості вітру для стаціонарних баштових кранів в робочому стані, а також алгоритми керування для підтримки паралельного положення для стрілового пристрою щодо становища вітру в неробочому стані. Запропоновано пристрій безпеки, здатний підвищити експлуатаційну продуктивність і рівень безпеки виробництва вантажних робіт, які виконують баштові крани в умовах високих вітрових навантажень, шляхом стабілізації становища стрілового пристрою щодо вітрового потоку в робочому та неробочому станах.

У розвиток [1] в [2] пропонується система керування і підтримки заданого положення стрілового пристрою щодо вітрового напору для забезпечення стійкості баштового крана в умовах дії поривів вітру. У зазначених роботах наводиться обґрунтування застосування попереджувального примусового впливу на баштовий кран для

забезпечення його стійкості при зміні динаміки вітрових потоків. Керування стріловим пристроєм проводиться додатковими пристроями - гідродинамічними муфтами і допоміжним приводом, що забезпечують стійкість шляхом введеної в кінематичну схему повороту вежі додаткової жорсткості і випереджувальним примусовим поворотом стріли крана допоміжним приводом.

В [3] додаткові інерційні навантаження, що виникають від розгойдування вантажу, розглядаються в контексті забезпечення стійкості баштового крана. Стійкість крана пропонується забезпечувати застосуванням пристрою безпеки, виконаного на основі мікроконтролера, в якому на основі збору експлуатаційних параметрів - відхилення вантажу від вертикалі, фактичних швидкостей і прискорень обладнання при запуску та відключення, а також ряду інших параметрів - в реальному режимі часу обчислюється коефіцієнт стійкості крана. На підставі цього коефіцієнта оператору крана пропонуються оптимальні значення вильоту, висоти підвісу і швидкості підйому вантажу. Такий підхід вимагає розробки досить точної математичної моделі руху баштового крана, а також отримання своєчасної і точної інформації про поточний стан баштового крана від датчиків. Для цього необхідні досить потужні засоби обчислювальної техніки і оснащення крана великою кількістю контрольно-вимірювальних приладів.

Мета роботи. Метою даної роботи є підвищення безпеки експлуатації баштових кранів на основі визначення розподілу навантажень на опорні елементи з урахуванням умов роботи. В цілому ця задача досить складна і повинна містити теоретичні, експериментальні дослідження та комп'ютерне моделювання моделі крана для порівняння результатів із математичною моделлю.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити методику розрахунку навантаження опорних елементів баштових кранів з урахуванням лінійних розмірів машини і просторового характеру дії навантажень;
- розробити алгоритм розрахунку навантажень на основі математичної моделі;
- визначити величину і характер зміни навантажень на опори крану за різних умов роботи;
- провести теоретичні дослідження по визначенню навантажень на кожен із опор крана при різних положеннях стріли і вантажу.

Виклад основного матеріалу. Розроблений алгоритм розрахунку навантажень на опори крану на основі математичної моделі дозволяє провести розрахунковий експеримент, визначити величину і

характер зміни навантажень на опори крану за різних умов роботи: при різних вантажах та змінних вильотах, вітрових навантаженнях. Розроблена програма розрахунку дозволяє простежити вплив різних факторів на завантаженість опорних точок з обліком просторового характеру навантаження машини і застосування розробленої математичної моделі [4, 5]. Для визначення навантажень на опорні елементи крану за розробленою методикою при різних режимах роботи була розроблена програма у пакеті Maple, де в якості моделі для досліджень було взято баштовий кран КБ-100. Подальші теоретичні дослідження виконувались на цій моделі крану.

Методика дослідження навантажень на опори баштового крану із застосуванням розробленої математичної моделі за допомогою програми у середовищі Maple включає:

- 1) Підготовка даних, які визначають лінійні розміри досліджуваної машини, характеристики ґрунту.
- 2) Підготовка даних про діючі навантаження від мас елементів крану і їхнього розташування та вітрових навантажень.
- 3) Підстановка даних щодо діючого режиму навантаження.
- 4) Створення опорної площини. Пошук базових точок опорної площини.
- 5) Створення матриці вихідних даних.
- 6) Дослідження зміни навантажень на опори, що виникають у основі крана в процесі роботи при різних положеннях стріли, вильоті.
- 7) Створення матриці навантаження.
- 8) Розрахунок навантажень на опорні елементи крану для вказаного режиму навантаження.
- 9) Побудова графіків розподілу навантажень між опорами будівельного баштового крану у процесі роботи.

1. Визначення навантажень які діють на опори

Вихідними даними для програми є параметри крану, а саме: розміри та розташування елементів крану, маси елементів (рис. 1). Для крану, який розглядається, вихідні дані в якості мас окремих елементів та їх центрів мас приведені в табл. 1. Навантаження від сил ваги елементів і їх розташування беруться з паспорту крану КБ-100.

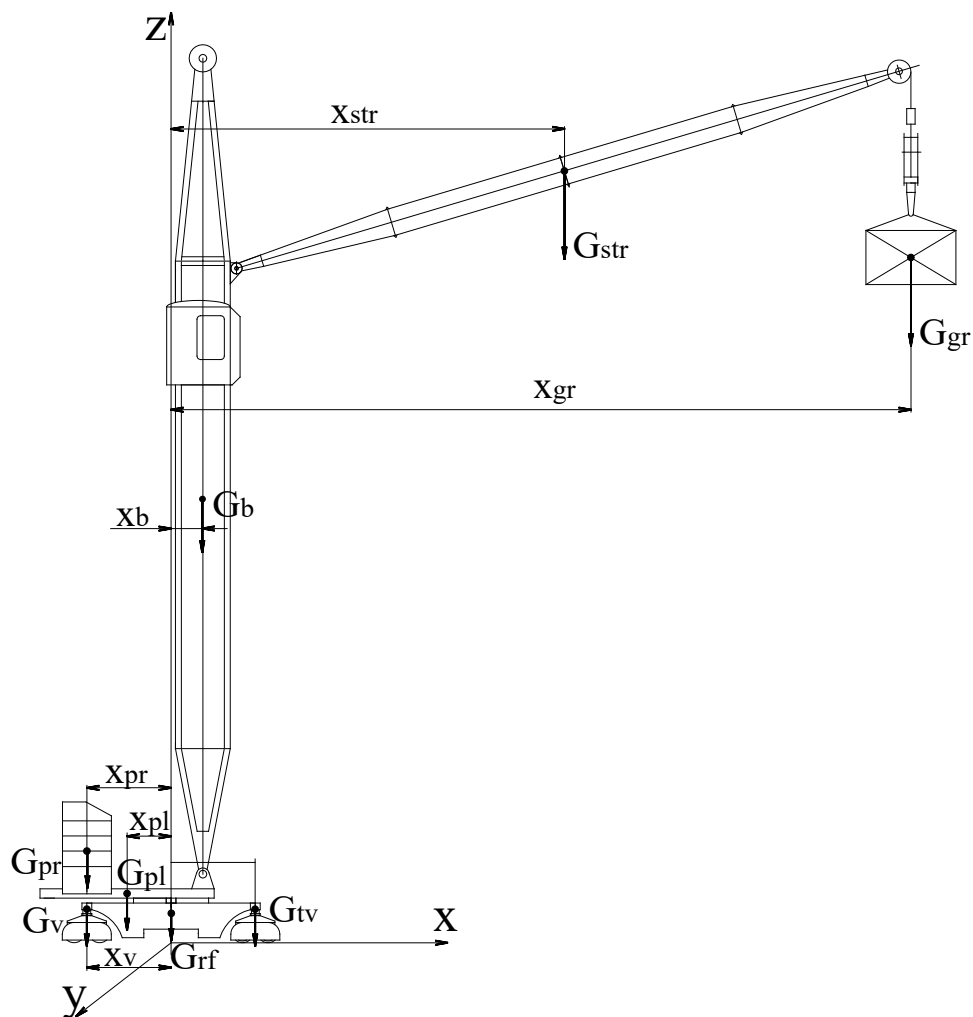


Рисунок 1 – Схема завантаження крану

Таблиця 1 – Вихідні дані навантажень від мас поворотних і неповоротних елементів

№	Елементи поворотні	G, Н	X, м	Y, м	Z, м
1	Вантаж	49050	18,5	0	0
2	Стріла	18295,65	9,25	0	0
3	Башта	53415,45	0,9	0	12
4	Платформа	66119,4	-1,2	0	1,3
5	Противага	258984	-2,25	0	2,6
Елементи неповоротні					
6	Візок ведучий №1	10594,8	2,25	2,25	0,54
7	Візок ведучий №2	10594,8	2,25	-2,25	0,54
8	Візок ведений №1	6474,8	-2,25	2,25	0,54
9	Візок ведений №2	6474,8	-2,25	-2,25	0,54
10	Рама флюгерна	43458,3	0	0	0,55

Вітрові навантаження при розрахунку стійкості баштових кранів, а також при визначенні параметрів фундаментів стаціонарних баштових кранів визначаються відповідно до вимог ГОСТ 1451-77. При цьому повинні бути розглянуті найнесприятливіші комбінації навантажень і положень крана як у робочому, так і в неробочому стані. За вітрове навантаження на кран у неробочому стані приймається граничне вітрове навантаження, на яке повинні бути розраховані елементи крана. За вітрове навантаження на кран у робочому стані приймається граничне вітрове навантаження, при якому забезпечується експлуатація крана з номінальним вантажем.

З рисунку 1 видно, що навантаження опор під час роботи носить просторовий характер. Урахувати всі фактори роботи машини (підйом стріли, поворот башти, поздовжній і поперечний нахил кута стояння крану) можливо лише за умови застосування ЕОМ.

2. Урахування просторового характеру навантаження

Розглянемо процес розкладення просторових навантажень на три складові по координатним осям. Для даного баштового крану КБ-100 площина XOY є опорною площиною крану, а вісь Z є віссю обертання поворотної частини крану. Після знаходження точки перетину сили P з опорною площиною розкладаємо силу P в ній на три складові: P_x , P_y , P_z (рисунок 2). Далі програма визначає плечі сил x та y .

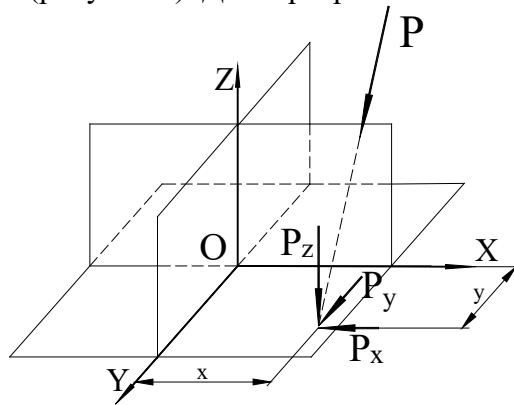


Рисунок 2 – Схема розкладення сил на три складові

Моменти сил відносно координатних осей

$$M_X = \sum Pz_i \cdot y_i;$$

$$M_Y = \sum Pz_i \cdot x_i;$$

$$M_Z = \sum Px_i \cdot y_i + Py_i \cdot x_i,$$

де M_X, M_Y – моменти всіх сил відповідно відносно осей X та Y .
Величина рівнодіючої сили

$$Q_\Sigma = \sum Pz_i,$$

де Q_Σ – проекція всіх сил, діючих на систему, на вісь Z .

3. Дослідження розподілу навантажень між опорними елементами крану в процесі роботи

Створюємо глобальну систему координат, вісь u проходить через вісь обертання крану, x та z знаходяться у площині контакту коліс з ґрунтом. Кран встановлюємо у нульове положення: стріла розташована уздовж шляху, виліт вантажу максимальний. Навантаження від мас елементів задаємо у вигляді вектора, координати початку якого відповідають точці прикладення сили (сила прикладена у центрі мас елемента). Заносимо до програми величину навантаження таким чином: вказуємо координати початку вектора $\{x_1; y_1; z_1\}$ і координати кінця $\{x_1; y_1; z_1 - G_i\}$, а довжина цього вектора і буде величина навантаження G_i .

$$\sqrt{(x_1 - x_1)^2 + (y_1 - y_1)^2 + (z_1 - (z_1 - G_i))^2}.$$

Складаємо окремо масив координат поворотних сил (змінюють свої значення при повороті стріли крану та при зміні вильоту вантажу) і неповоротних (не залежать від вказаних процесів).

На рисунку 3 представлений алгоритм, за яким ведеться розрахунок навантажень.

За допомогою програми був проведений аналіз зміни завантаженості опорних елементів баштового крану за розробленою методикою.

Слід зазначити, що якщо в якості вихідних даних (площі опорної поверхні під кожною опорою, коефіцієнтів жорсткості) прийняти дійсні значення, можна крім навантажень на опори визначити глибину занурення кожної опорної точки. Якщо ж всі вищезгадані значення коефіцієнтів прийняти рівними одиниці у результаті будуть визначені навантаження на опори за умови роботи машини на плоскій поверхні ґрунту

Розглянемо зміну навантаження кожної опорної точки при повороті стріли крану на 360° . При розрахунках прийемо: – кут підйому стріли $\alpha=0^\circ$; – кути стоянки крану $\gamma=0^\circ$, $\theta=0^\circ$.

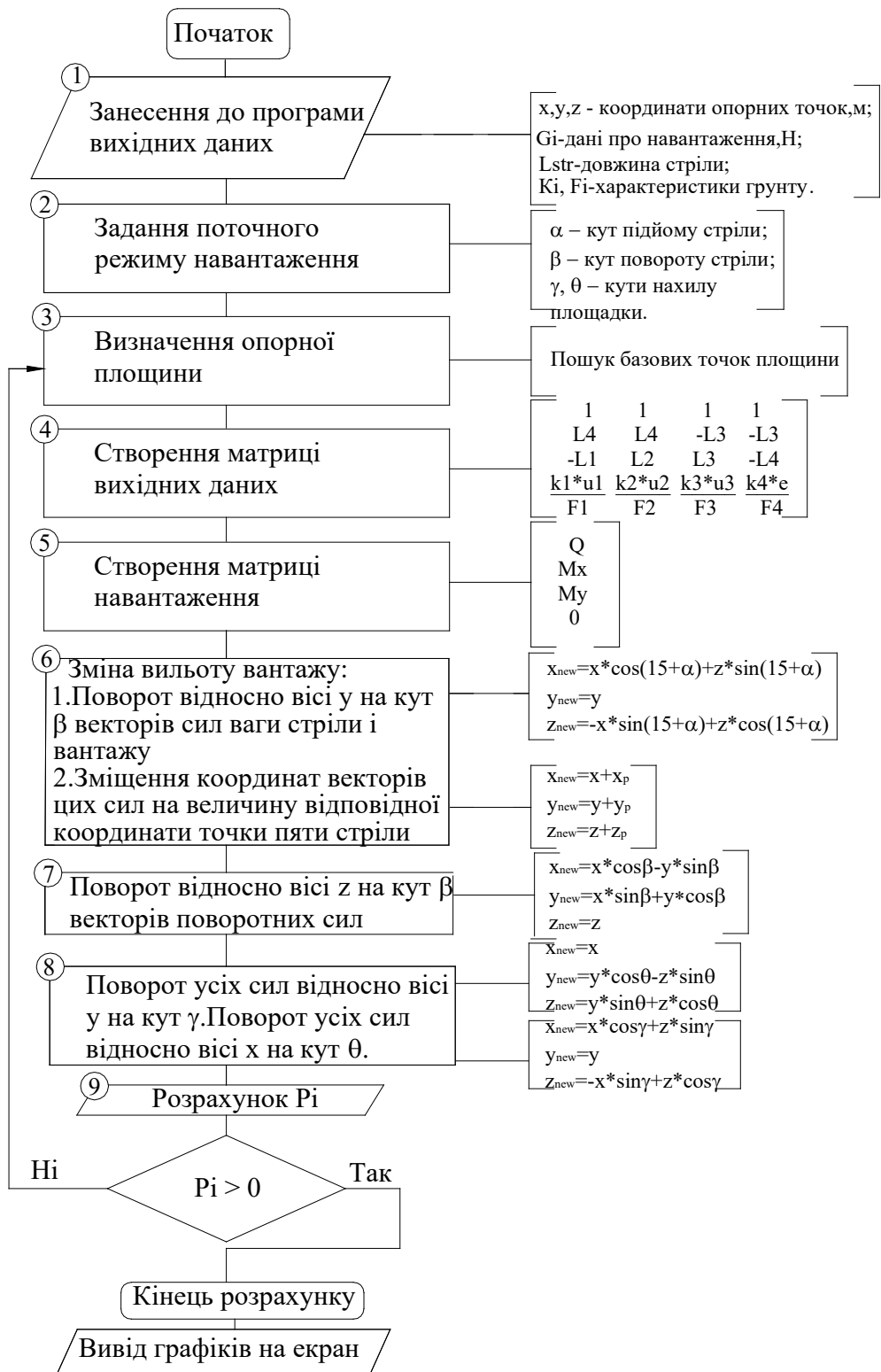


Рисунок 3 – Алгоритм розрахунку

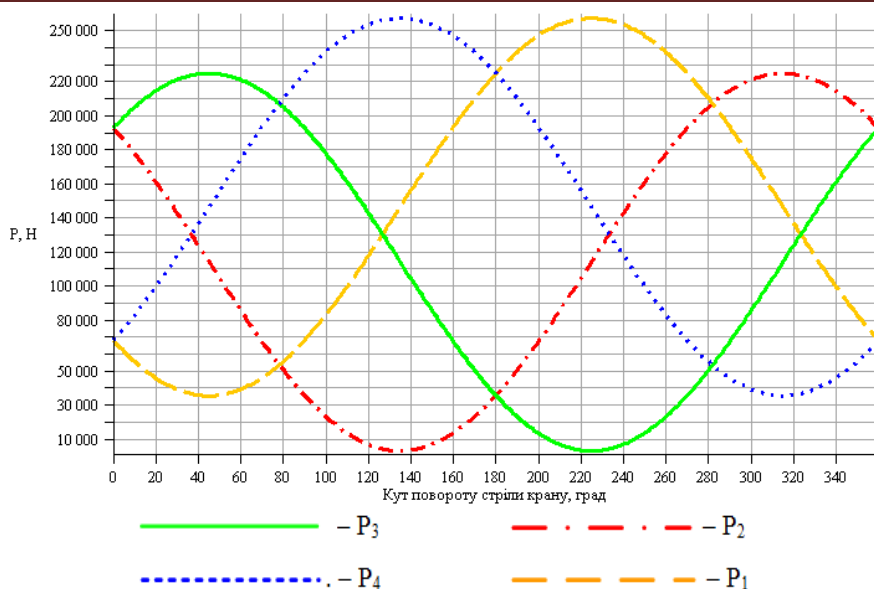


Рисунок 4 – Графік зміни і розподілення навантажень між опорами крану при повороті стріли крану

Розглянемо зміну навантаження кожної опорної точки при зміні вильоту стріли від максимального значення до мінімального. При розрахунках прийнемо: – кут повороту стріли $\beta=0^0$; – кути стоянки крану $\gamma=0^0$, $\theta=0^0$.

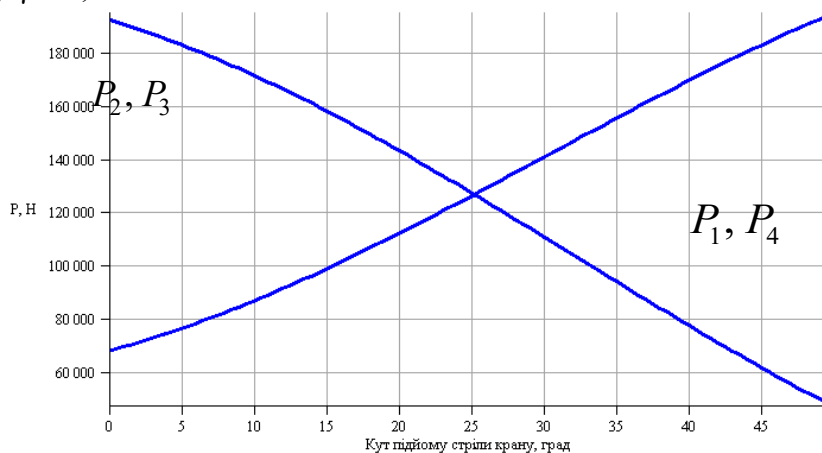


Рисунок 5 – Графік зміни і розподілення навантажень між опорами крану при зміні вильоту стріли

Аналіз графіків, зображених на рисунках 4 і 5, дозволяє зробити такі висновки:

- навантаження опорних елементів у процесі роботи крану носить коливальний характер;
- навантаження, виникаючі в опорах крану, змінюються у широких межах в залежності від положення елементів крану.

- при зміні вильоту 1 та 4 опори витримують однакові навантаження у межах від 68 до 190 кН, а 2 та 3 – від 190 до 50 кН;
- при повороті стріли крану найбільші навантаження спостерігаються під опорами 1 та 4 і складають $P=250$ кН, а найменші – під опорами 2 та 3 і складають $P=5$ кН;
- при куті повороту стріли крану $\beta=135^0$ друга опора є майже розвантаженою, а при куті повороту $\beta=225^0$ третя опора майже виключається з роботи.

Розглянемо зміну навантаження кожної опорної точки при повороті стріли крану та при різних значеннях вильоту, при розрахунку прийемо кути стоянки крану $\gamma=0^0$, $\theta=0^0$.

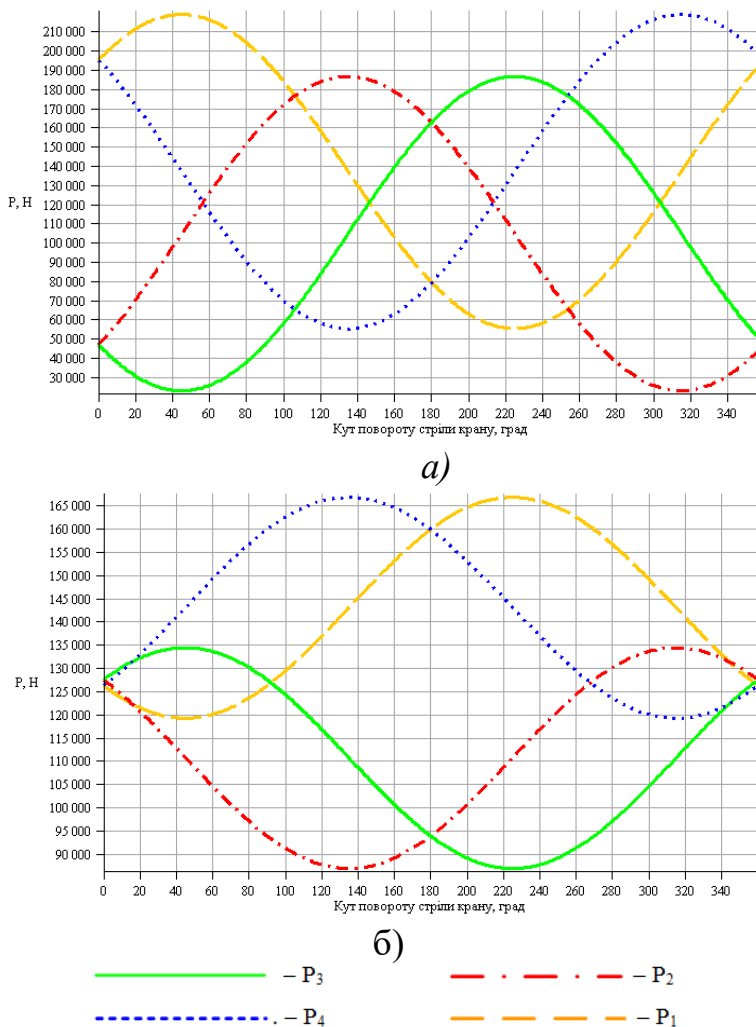


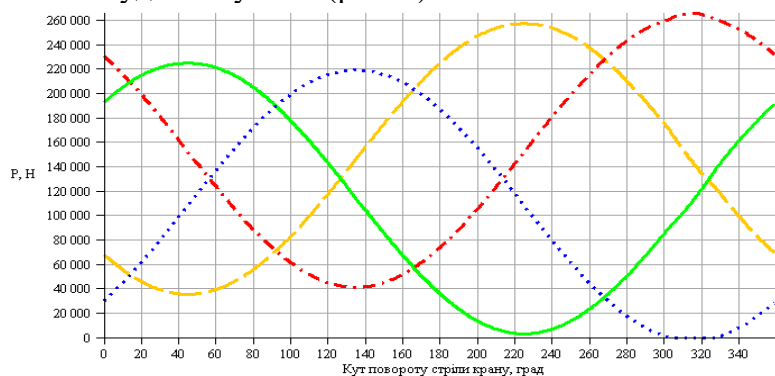
Рисунок 6 – Графік зміни і розподілення навантажень між опорами крану при повороті стріли: а) при максимальному вильоті (кут підйому стріли 50^0),
б) при куті підйому стріли 25^0

Аналіз графіків, зображених на рисунку 6, дозволяє зробити такі висновки:

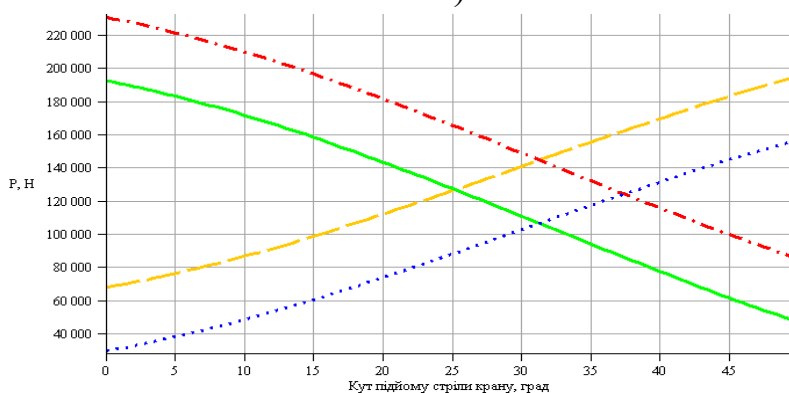
– при максимальному вильоті вантажу критичними положеннями крану є положення, коли $\beta=45^{\circ}$ та $\beta=315^{\circ}$, у цих випадках кран спирається майже на три опори;

– при куті підйому стріли 25° і куті повороту 0° навантаження розподіляються рівномірно між всіма опорними точками, $P \approx 127$ кН;

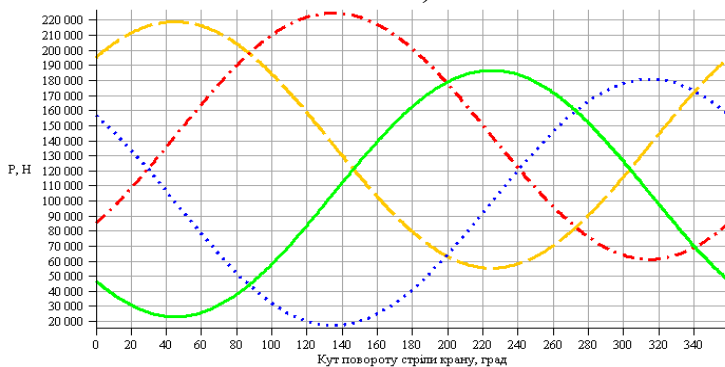
Якщо вітер змінить свій напрямок (наприклад, на 90° від прийнятого початкового положення), то характер розподілу навантаження буде наступний (рис. 7).



а)



б)



в)

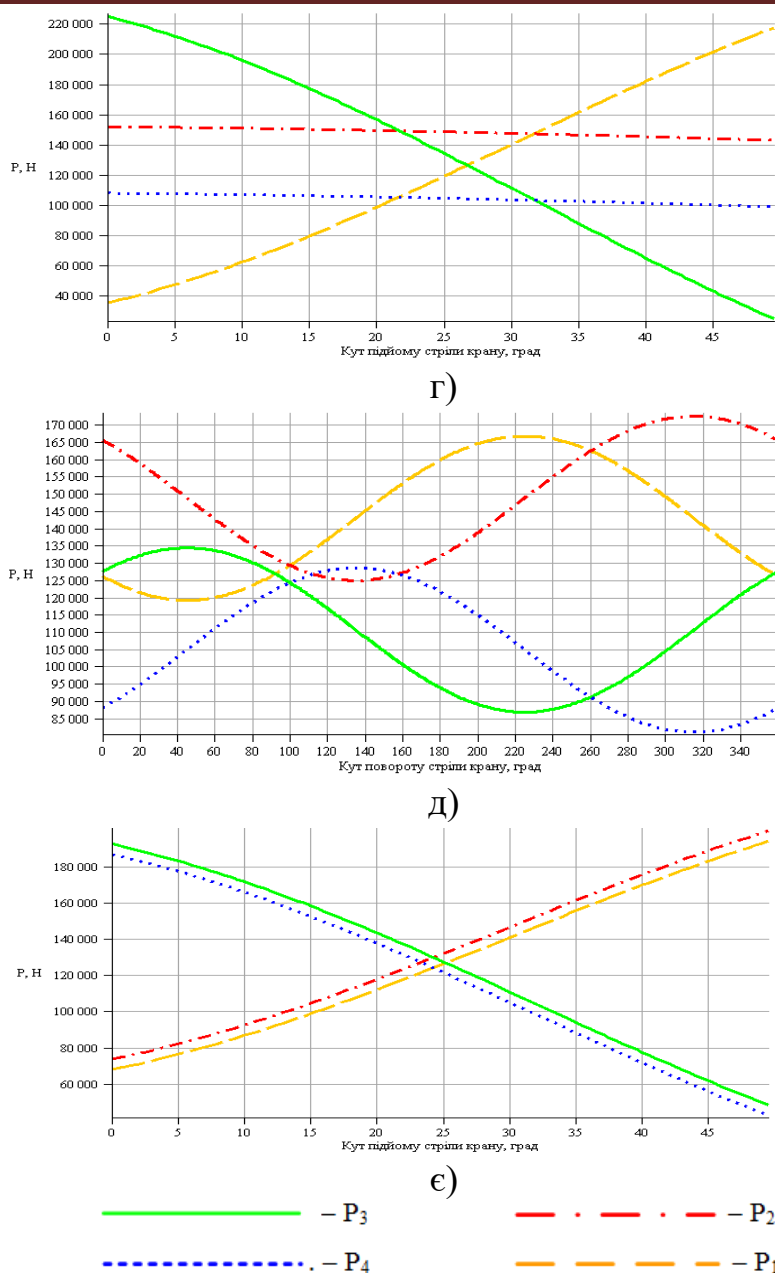


Рисунок 7 – Графіки зміни і розподілу навантажень при змінному напрямку вітру: а) при повороті стріли: кут підйому стріли $\alpha=0^0$; б) при підйомі стріли: кут повороту стріли крану $\beta=0^0$; в) при повороті стріли: $\alpha=50^0$; г) при підйомі стріли: $\beta=45^0$; д) при повороті стріли: $\alpha=25^0$; е) при підйомі стріли: $\beta=90^0$, кути стоянки $\gamma=0^0$, $\theta=0^0$

Значний вплив мають також такі фактори, як нерівність опорної поверхні, що приводить до перевантаження одних і малого навантаження інших опорних точок. Наприклад, на рисунку 8

приведено графік розподілу навантажень при стоянці крану на похилому майданчику.

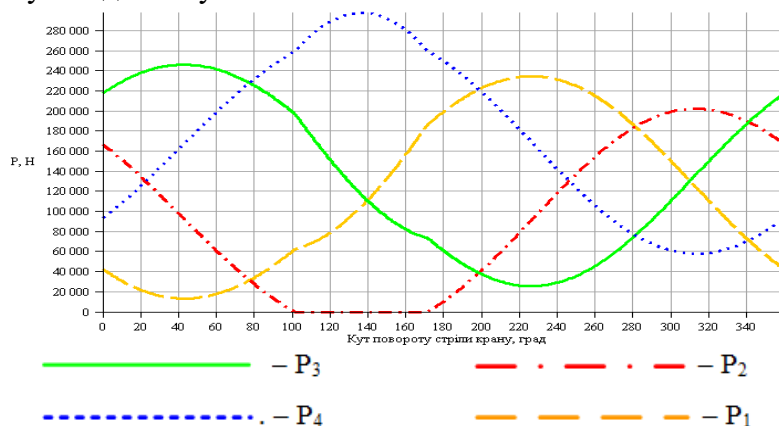


Рисунок 8 – Графік розподілу навантажень при стоянці крану на похилому майданчику (при повороті стріли: $\alpha=0^0$, $\gamma=0^0$, $\theta=4^0$)

З рисунку 8 видно, що при повороті стріли крану на кут від 100^0 до 170^0 спостерігається відрив другою опори і перерозподіл навантажень між трьома залишившимися у роботі опорними елементами, навантаження від цієї опори в основному сприймає 4 опора, бачимо скачок навантаження цієї опорної точки на графіку.

Висновки:

1. Розроблений алгоритм розрахунку навантажень на опори крану на основі математичної моделі дозволяє провести розрахунковий експеримент, визначити величину і характер зміни навантажень на опори крану за різних умов роботи: при різних вантажах та змінних вильотах, вітрових навантаженнях.

2. Розроблена програма розрахунку дозволяє простежити вплив різних факторів на завантаженість опорних точок з обліком просторового характеру навантаження машини і застосування розробленої математичної моделі.

3. Установлено, що навантаження опорних елементів крану носить коливальний характер. Навантаження, виникаючі в опорах крану, змінюються у широких межах в залежності від положення елементів крану. Деякі опорні точки мають як позитивне, так і негативне навантаження при повороті крану. Коливання навантажень на ці точки мають амплітуду близько 200 кН.

Список використаної літератури

1. Обыденков В.А. Устойчивость стационарных башенных кранов в условиях ветрового нагружения. Автореф. дис. канд. наук. Тула, 2010. – 20 с.

2. Синельщиков А.В., Булатов Б.Л. Устойчивость башенных кранов при переменных эксплуатационных состояниях. Вест. Астрахан. гос. техн. ун-та, 2012. - № 2 (54). – с. 41-43.

3. Булатов Б.Л., Синельщиков А.В. Расчет устойчивости башенных кранов на основе определения реакций в опорах. Вест. Астрахан. гос. техн. ун-та, 2011. - № 2 (52). – с. 27-30.

4. Єрмакова С.О., Крупко В.Г. Основні шляхи підвищення безпеки і надійності експлуатації стрілових кранів. Вісник ХНАДУ. – 2014. – Вип. 65-66. – с. 189 – 192.

5. Іваненко О.І., Крупко І.В., Єрмакова С.О. Дослідження стійкості баштового крану з урахуванням розподілу навантажень на опори. Вісник ДДМА – 2019. – Вип. 3 (47). – с. 46 – 50.

THEORETICAL STUDIES OF THE TOWER CRANE SUSTAINABILITY IN VIEW OF LOADS DISTRIBUTION ON ITS SUPPORTS

Ivanenko O. I.¹, Krupko I. H.², Yermakova S. O.²

¹ *Kharkiv national automobile and highway university*

² *Donbass state engineering academy*

Abstract. Analysis of the structures, methods of installation and conditions of tower cranes operation and methods of calculating their stability shows that recently there is a need to install the cranes that provide loading and unloading work in conditions of the limited sites. This raises the question in which the stability of cranes under different working conditions and different wind loads becomes an important indicator. In this case, the right choice of support circuit comes to the fore, for which it is very important to determine the loads on the supporting elements and to develop the design of the supporting elements themselves.

The aim of the study is to improve the safety of tower cranes operation on the basis of loads and the construction of the support circuit taking into account the working conditions, and the subject of the study is the process of loading and determining the distribution of loads between the supporting elements of the tower crane construction.

During the research, a method of calculating the load of the tower cranes supporting elements was developed taking into account the linear size of the machine and the spatial nature of the load, as well as theoretical studies were conducted based of the previously developed mathematical model for determining the loads on each of the crane supports at different positions of the arrow and cargo, the possible maximum loads arising during the operation of the crane on each of the supports were established.

The developed algorithm for calculating loads on the support of the crane, based on a mathematical model, allows to conduct a calculation

experiment, to determine the size and nature of the change in loads on the support of the crane under different working conditions: at different loads, variable departures and wind loads.

To study the loads on the crane support elements according to the developed methodology under different modes of operation, a program was developed in the Maple software, where the KB-100 tower crane was taken as a model for research. All further theoretical studies were carried out on this model of the crane.

It has been established that the load on the main elements of the crane is vibrational. The loads that occur in the crane supports vary widely depending on the position of the crane elements. Some support points have both positive and negative loads when turning the crane. Fluctuations of loads on these points have an amplitude of about 200 kN.

Keywords: research, crane, influence, distribution, load, support, sustainability, algorithm, program, results