

АНАЛІЗ ПОРІВНЯННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ І КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛЕЙ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ СТІЙКОСТІ БАШТОВОГО КРАНУ

У статті наведено результати дослідження стійкості баштового крана під час експлуатації з урахуванням впливу навантажень на опори. Наведено результати порівняння розподілу навантажень на опори крана, визначених у результаті математичного та комп'ютерного моделювання під час повороту та підйому стріли.

Ключові слова. Дослідження, баштовий кран, стійкість, розподіл навантажень, математична модель, комп'ютерна модель, адекватність.

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

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Однак іноді з кранами відбуваються аварії, що приводять до серйозних наслідків для людей, устаткування, споруд, істотному матеріальному збитку, тому необхідно при проектуванні та в процесі експлуатації дотримуватись існуючих правил безпеки [1].

Іноді причиною аварії може стати обмежений простір самої будівельної площадки. Крім того, наявність у центральних зонах міських забудов декількох баштових кранів, цикли роботи яких збігаються, може привести до їхнього зіткнення, що істотно збільшує кількість аварій.

Робоче оточення крана також впливає на безпеку його роботи, наприклад: – динамічні навантаження, викликані виконанням робочих операцій та впливом вітру. Вібrazioї, що виникають при цьому, впливають на основу баштового крана; – наявність поблизу крана траншей, що змінюють характеристики ґрунту [2-3].

Розвиток і подальше удосконалення вітчизняних баштових кранів у наш час неможливе 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, що виникають у основі крана при довільних положеннях стріли, вильоті й вантажі на гаку. Виконання цих умов розвитку баштових кранів має велике практичне значення, адже, забезпечення безпеки при їх експлуатації завжди залишається актуальною проблемою.

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. Обидєнова 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.

Дослідженням стійкості та розподілу опорних реакцій баштових кранів були присвячені роботи закордонних вчених [4-9].

Більшість авторів вказують на недосконалість методів проектування баштових кранів, що не дозволяє враховувати піддатливість металоконструкції крана і наявність додаткових навантажень [10-14].

Мета дослідження. Метою роботи є розробка комп'ютерної моделі баштового крана під час його експлуатації та порівняння результатів з математичною моделлю.

Основний матеріал дослідження. Побудова комп'ютерної моделі баштового крану.

Для побудови комп'ютерної моделі баштового крана і її подальшого аналізу було обрано систему автоматизованого проектування SolidWorks з додатком Simulation. Дана програма створена для використання на персональному комп'ютері у середовищі Microsoft Windows. У SolidWorks використовується принцип тривимірного твердотілого і поверхневого параметричного проектування, що дозволяє конструктору створювати об'ємні деталі і компонувати зборки у вигляді тривимірних моделей, по яких створюються двомірні креслення і специфікації.

Тривимірне моделювання виробів дає масу переваг перед традиційним двовимірним проектуванням. За допомогою програми SolidWorks можна побачити майбутній виріб з усіх боків в об'ємі і надати йому реалістичне відображення відповідно до вибраного матеріалу для попередньої оцінки дизайну.

Асоціативні взаємозв'язки між деталями, зборками і їх кресленнями SolidWorks гарантують відповідність моделі і креслення, оскільки усі зміни зроблені в деталі автоматично передаються в пов'язану з нею збірку і креслення.

Інтерфейс програми SolidWorks наведено на (рис.1).

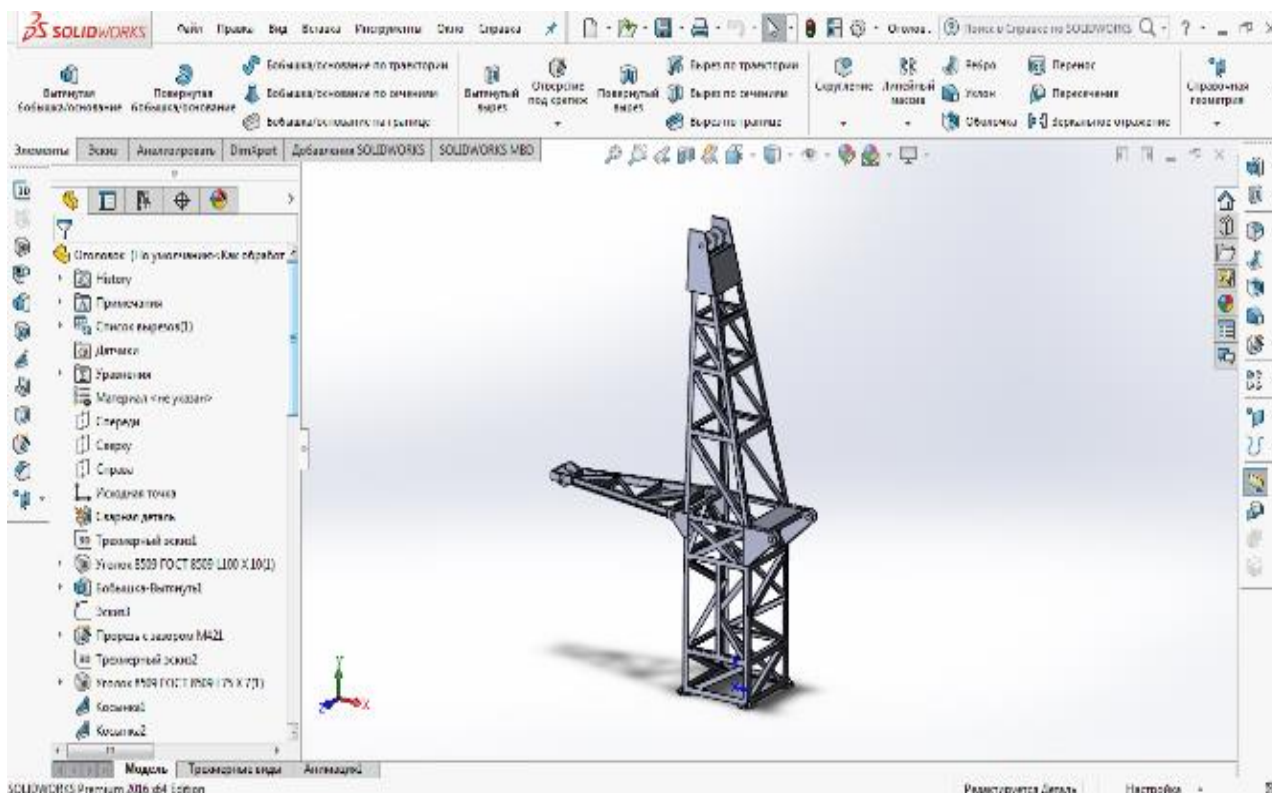


Рисунок 1 – Інтерфейс програми SolidWorks

Машинобудування і зварювальне виробництво

Більшу частину екрану займає графічна область, в якій виконуються різні операції над деталлю, зборкою або кресленням. Над нею знаходиться панель Command Manager на яку винесено більшість доступних функцій згрупованих у вкладках за областю їх використання при створенні моделі: елементи, ескіз, аналізувати та ін.

У лівій частині вікна SolidWorks відображається інформація про дерево побудови Feature Manager, параметри функцій і конфігурації моделі. Послідовність побудови моделі фіксується в дереві Feature Manager. Дерево проектування Feature Manager дозволяє управляти елементами побудови моделі вносити зміни в конструкції деталі на будь-якому етапі проектування, не перебудовуючи деталь наново з нуля.

Пакет SolidWorks Simulation дозволяє вирішувати широкий спектр інженерних задач і моделювати вплив різних факторів навколишнього середовища на кран. Серед його можливостей розрахунок конструкцій на міцність, постановка і рішення контактних задач, визначення власних форм і частот коливань, розрахунок конструкції на стійкість, імітація падіння, втомні і теплові розрахунки.

Для запуску Simulation необхідно викликати його через вкладку "Додатки SolidWorks" на панелі Command Manager, після чого стане доступна вкладка Simulation. Перейшовши на неї необхідно вибрати " A new study" і " Static analysis". Під вікном Feature Manager стане доступним вікно дослідження, де перед його початком потрібно встановити вихідні дані. Вікно " Connections " дозволяє задати типи контактів між компонентами збірки: " no penetration" – для деталей, що вільно переміщуються один щодо одного із заданим коефіцієнтом тертя, " related" – для деталей жорстко пов'язаних один з одним і " ingress is allowed " – для елементів, що з'єднуються, наприклад , посадкою з натягом. Функція " Bindings" дозволяє вказати грані і поверхні, зафіксовані щодо глобальної системи координат. Можливими варіантами кріплення можуть служити зафіксована геометрія, шарнірне кріплення, пружне підставу, болтове з'єднання та ін. Через вікно " External loads" можна вказати діючі на модель розподілені і зосереджені сили, тиск, обертаючий момент, дистанційне навантаження, розподілену масу, термічні впливи.

При створенні сітки (рис.2) доступний широкий спектр налаштувань. Окрім глобального вибору розміру елементів сітки можна увімкнути параметр "Curvature-based mesh creator", що приводить до подрібнення сітки в районах більшої кривизни, наприклад біля отворів, що дає більш точні результати. Переключення між сумісною та несумісною сітками дозволяє створювати більш точні контакти об'єктів із співпаданням вузлів сітки на гранях, або створювати сітку на об'єктах незалежно одна від одної, що дає гірший результат але діє коли сумісну сітку побудувати неможливо. Серед налаштувань є функція автоматичної побудови сітки. " Automatic transition" зменшує розміри сітки для малих деталей, отворів та округлення. Окрім загальних налаштувань для створення сітки усієї моделі, можна задати параметри для окремих її елементів, що дозволить, наприклад, будувати більш щільну сітку тільки у важливих для аналізу місцях, скорочуючи час вирішення задачі та необхідні ресурси комп'ютера.

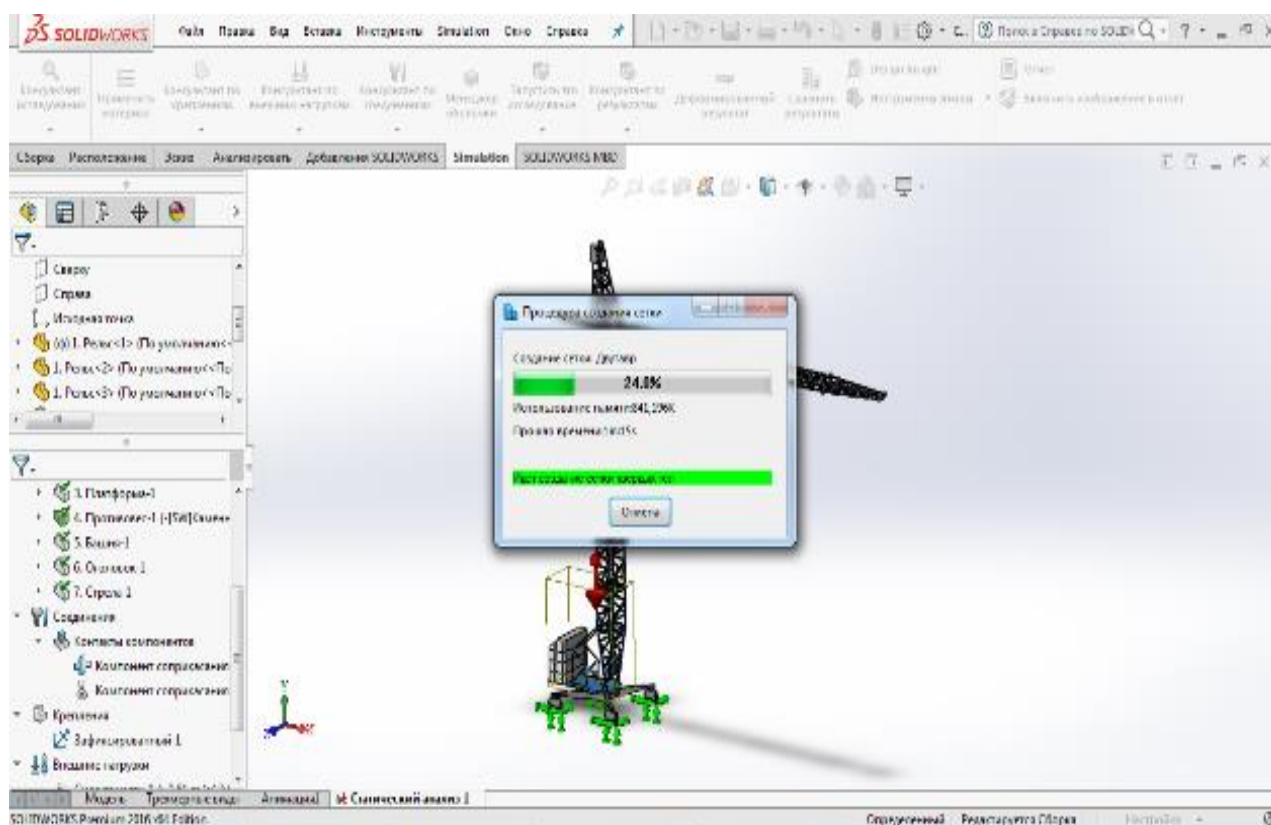


Рисунок 2 – Створення сітки

Розрахунок моделі починається автоматично, якщо в налаштуваннях відмічено “Launch (solution) analysis”, або вручну натиснувши кнопку “Launch this study” на панелі Command Manager, що дає змогу попередньо оцінити та переробити створену сітку. Крім того перед початком слід перевірити налаштування дослідження, викликавши однойменне вікно із вкладки Simulation, і увімкнути функцію “Calculate the forces of free bodies”.

Під час роботи вирішувальної програми виводиться вікно прогресу на якому відображається загальний прогрес рішення, текуча задача та її прогрес, витрачений час, тип вирішувальної програми (один з чотирьох доступних) та інформація щодо моделі: кількість степенів свободи, вузлів і елементів. Додатково можна переглянути графік збіжності.

Обробка та порівняння результатів із математичною моделлю. Дослідження проводимо для різних кутів повороту та нахилу стріли крана. Розглянемо навантаження опорних точок при куті підйому стріли $\alpha=0^{\circ}$ кути стоянки крана $\gamma=0^{\circ}$, $\theta=0^{\circ}$. Після закінчення розрахунку оцінити навантаження на опорну поверхню можна у вікні дослідження Feature Manager викликавши контекстне меню розділу “Results” і обравши “Force of reaction”. Вказавши у відкритому вікні верхні грані рейок на яких стоїть кран та обравши пункт “Free body force” можна переглянути їх опорні реакції, а отже і зусилля, які діють з боку крану (рис.3).

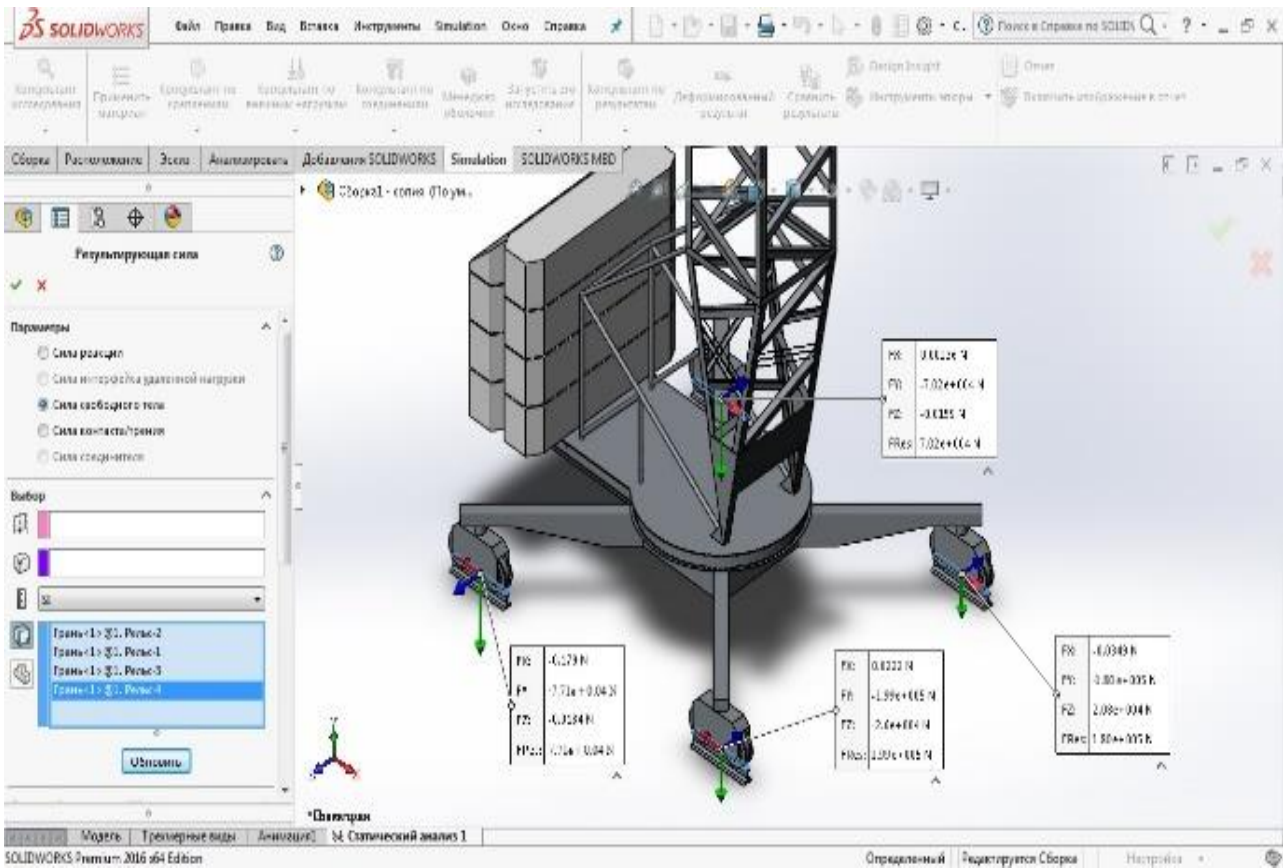


Рисунок 3 – Зусилля, діючі на опори при куті повороту $\beta=0^0$

Змінюючи кут повороту стріли, продовжуємо проводити розрахунки навантажень з кроком 45^0 . Отримані результати порівняємо з результатом математичного дослідження і будемо графік (рис.4).

Змінюючи кут повороту стріли, продовжуємо проводити розрахунки навантажень з кроком 45^0 . Отримані результати для зручності зводимо у таблицю 1, порівнюючи з результатом математичного дослідження і будемо графік.

Розбіжність між результатами математичного і комп'ютерного моделювання розраховуємо за залежністю

$$\varepsilon = \frac{|P_k - P_m|}{P_m} \cdot 100\%$$

де P_k – навантаження на опору, розраховане за комп'ютерною моделлю;
 P_m – навантаження на опору, розраховане за математичною моделлю;

Машинобудування і зварювальне виробництво

Таблиця 1 – Порівняння навантажень, визначених у математичній та комп'ютерній моделях при зміні кута повороту стріли

| | | | Кут повороту стріли β , град | | | | | | | |
|---------------------------|---------|-------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 0 | 45 | 90 | 135 | 180 | 225 | 270 | 315 |
| Навантаження на опору, кН | Опора 1 | Мат. МОД. | 69,5 | 33,7 | 69,5 | 144,0 | 223,4 | 258,2 | 233,4 | 144,0 |
| | | КОМ. МОД. | 70,2 | 38,2 | 72,3 | 142,6 | 234,6 | 260,8 | 236,8 | 141,1 |
| | | розбіжність | 1,01 | 7,00 | 4,03 | 0,97 | 5,01 | 1,01 | 6,00 | 2,01 |
| | Опора 2 | Мат. МОД. | 191,6 | 114,2 | 35,7 | 2,0 | 35,7 | 114,2 | 191,6 | 223,4 |
| | | КОМ. МОД. | 180,1 | 115,3 | 38,2 | 1,7 | 36,1 | 113,1 | 201,2 | 212,2 |
| | | розбіжність | 6,00 | 0,96 | 7,00 | 15,00 | 1,12 | 0,96 | 5,01 | 5,01 |
| Навантаження на опору, кН | Опора 3 | Мат. МОД. | 191,6 | 223,4 | 191,6 | 114,2 | 35,7 | 2,0 | 35,7 | 114,2 |
| | | КОМ. МОД. | 199,3 | 216,7 | 182,0 | 124,5 | 32,8 | 2,1 | 36,8 | 119,9 |
| | | розбіжність | 4,02 | 3,00 | 5,01 | 9,02 | 8,12 | 5,00 | 3,08 | 4,99 |
| | Опора 4 | Мат. МОД. | 69,5 | 144,0 | 223,4 | 258,2 | 233,4 | 144,0 | 69,5 | 33,7 |
| | | КОМ. МОД. | 77,1 | 131,0 | 234,6 | 250,5 | 230,1 | 152,6 | 72,3 | 34,6 |
| | | розбіжність | 10,94 | 9,03 | 5,01 | 2,98 | 3,00 | 5,97 | 4,03 | 3,08 |

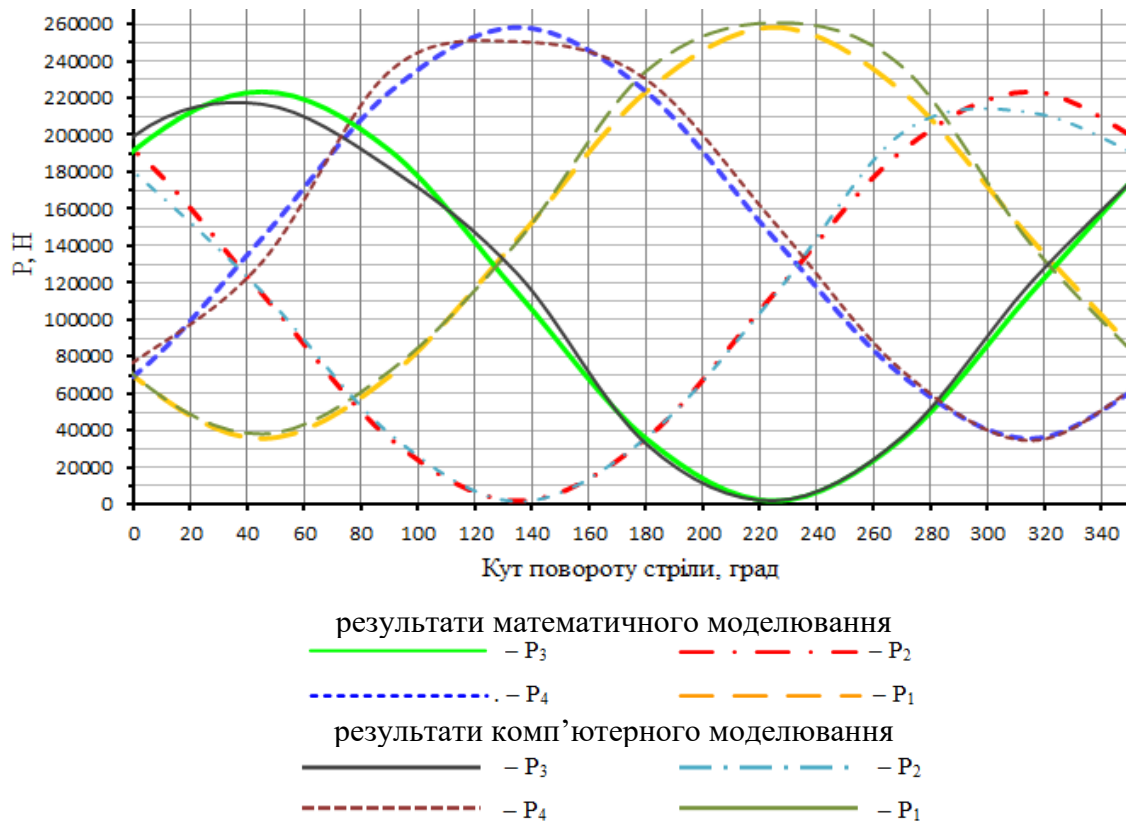


Рисунок 4– Графік порівняння математичної та комп'ютерної моделей

Тепер розглянемо зміну навантаження кожної опорної точки при зміні вильоту стріли від максимального значення до мінімального. Повторюємо розрахунок для кожного положення стріли від 0^0 до 50^0 з кроком у десять градусів. Кут повороту стріли $\beta=0^0$; кути

Машинобудування і зварювальне виробництво

стоянки крану $\gamma=0^0$, $\theta=0^0$. Отримані значення також заносимо до таблиці 2, оцінюючи розбіжність даних та будуємо графік (рис.5).

Таблиця.2 – Порівняння навантажень, визначених у математичній та комп'ютерній моделях при зміні кута підйому стріли

| | | | Кут підйому стріли α , град | | | | | |
|---------------------------|------------|--------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| Навантаження на опору, кН | Опори 1, 4 | мат. модель | 69,5 | 86,8 | 111,8 | 139,7 | 169,7 | 194,6 |
| | | комп. модель | 66,7 | 85,1 | 107,0 | 145,0 | 196,0 | 189,0 |
| | | розбіжність | 2,82 | 0,41 | 3,01 | 1,09 | 5,01 | 4,05 |
| | Опори 2, 3 | мат. модель | 191,6 | 170,7 | 142,7 | 109,8 | 77,8 | 46,9 |
| | | комп. модель | 197,0 | 170, | 147, | 111,0 | 81,7 | 45,0 |
| | | розбіжність | 4,03 | 1,96 | 4,29 | 3,79 | 3,71 | 2,88 |

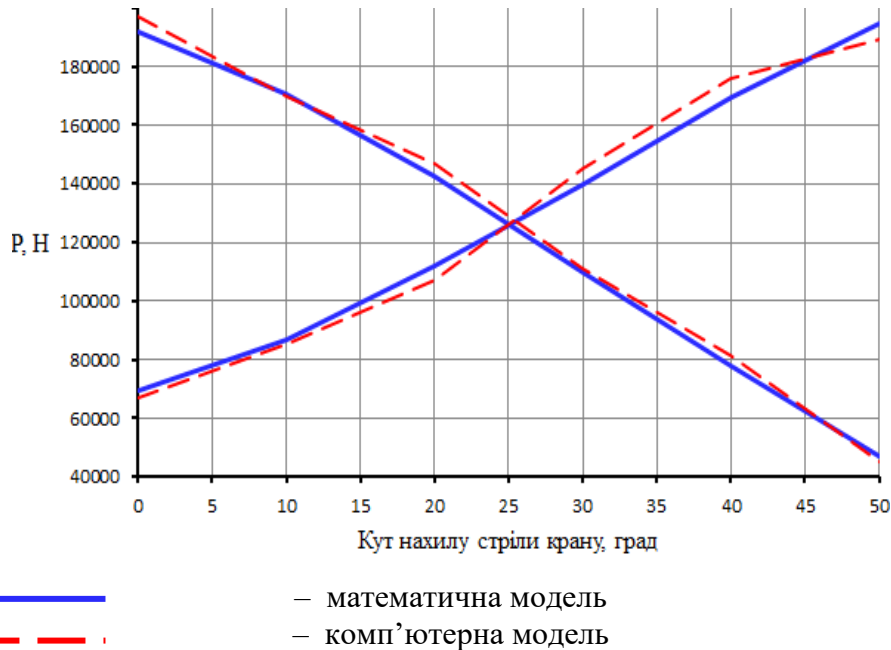


Рисунок 5 – Графік порівняння математичної та комп'ютерної моделей

Аналізуючи графіки, зображені на рис. 5, можна бачити, що розбіжність результатів дослідження математичної і комп'ютерної моделей коливається у межах десяти відсотків, становлячи в середньому 4,83%. Приймаючи до уваги можливі неточності при побудові комп'ютерної моделі це дає досить добрий результат і дозволяє вважати математичну модель адекватною.

ВИСНОВКИ

Використовуючи розроблений алгоритм розрахунку навантажень на опори крану проведено розрахунковий експеримент, що дозволив визначити величину і характер зміни навантажень на опори крану за різних умов роботи: при різних вантажах та змінних вильотах, вітрових навантаженнях.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Установлено, що навантаження опорних елементів крану носить коливальний характер з амплітудою близько 200 кН.

При повороті стріли крану на 135° опора 4 витримує найбільше навантаження, що складає 250 кН, а опора 2 виявляється майже розвантаженою – 5кН. При повороті на $\beta=225^{\circ}$ аналогічна ситуація відбувається з опорами 1 та 3 відповідно.

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

Список використаних джерел:

1. Правила побудови і безпечної експлуатації вантажопідйомних кранів. НПДОПО.00-1.01-07. К. : Основа, П68 2007. 312 с.
2. *Іванов В.Н.* Влаштування, монтаж і демонтаж сучасних будівельних баштових кранів: Монографія. Харків: «Форт», 2008. 278 с.
3. *Назаренко І.І., Пенчук В.А., Сердюк В.І., Хмара Л.А.* Основи модернізації будівельних машин . К.: «МП Леся», 2003. 14 с.
4. *Hilary Skimmer, Tim Watson, Bob Dumkley, Paul Blackmore.* Tower crane stability. Published by CIRIA, Classic House, 174–180 Old Street, London EC1V 9BP, UK. <https://www.brebookshop.com/samples/190246.pdf>
5. *Slavomir Hric, Jozef Tkac Darina Matiskova, Milan Micko , Dusan Mandulak.* Preliminary analysis of tower crane as a type of truss structure. MATEC Web of Conferences 299, 03003 (2019)<https://doi.org/10.1051/matecconf/201929903003> MTeM 2019. https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2019/48/matecconf_mtem2019_03003.pdf
6. *Ho J. K., Han K. K., Kim S. K.,* (2007), Tower crane foundation design and stability review model, Journal of the Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, 7(6), pp. 99–106.
7. *Ho J. K., Kook D. H., Kim S. K.,* (2007), A system for the selection of the optimum tower crane (Opt-TC), Korean Journal of Construction Engineering and Management, 8(6) pp. 216–226.
8. *Kim S. K., Kim J. Y., Lee D. H., Ryu S. Y.,* (2011), Automation optimal design algorithm for the foundation of tower cranes, Automation in Construction, 20, pp. 56–65.
9. *Ju F., Choo Y. S.,* (2005), Dynamic analysis of tower cranes, Journal of engineering mechanics, 131(1), pp. 88–96.
10. *Іваненко О. І., Щербак О. В., Любімов Ю. Ю.* Комп'ютерне моделювання стійкості на моделі баштового крану на основі визначення опорних реакцій. Наукові вісті Дніпровського університету. №18 2020 рік. Електронне наукове фахове видання. м. Сєверодонецьк, ISSN 2222-3428.<http://nvdu.snu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/02/2020-18-6.pdf>
11. *Krupko I., Ivanenko O., Yermakova S.* Substantive provisions of improvement of methods of calculation of loads on carrying and propelling devices of lifting and transport machines / Norwegian Journal of development of the International Science. – VOL.1 – №57/2021. – p. 54-59. ISSN 3453-9875. DOI: 10.24412/3453-9875-2021-57-1-54-59.
12. *Іваненко О.І. , Крупко І.В. , Єрмакова С.О.* Теоретичні дослідження стійкості баштового крану з урахуванням розподілу навантажень на опори. Підйомно-транспортна техніка. Одеса 2020 3(64). С 81-95
13. *Іваненко О.І., Крупко І.В., Єрмакова С.О.* Дослідження стійкості баштових кранів з урахуванням розподілу навантажень на опорні елементи / Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. Випуск № 3 (47) 2019. – Краматорськ. – С. 46-50.
14. *Єрмакова С.О., Крупко В.Г.* Основні шляхи підвищення безпеки і надійності експлуатації стрілових кранів. Вісник ХНАДУ. – 2014. – Вип. 65-66. – с. 189 – 192.

Крупко В.Г., Иваненко О.И., Щербак О.В.

АНАЛИЗ СРАВНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛЕЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ УСТОЙЧИВОСТИ БАШЕННЫХ КРАНОВ

В статье приведены результаты исследования устойчивости башенного крана во время эксплуатации с учетом влияния нагрузок на опоры. Приведены результаты сравнения распределения нагрузок на опоры крана, определённых в результате математического и компьютерного моделирования при повороте и подъёме стрелы.

Ключевые слова. *Исследование, башенный кран, устойчивость, распределение нагрузок, математическая модель, компьютерная модель, адекватность.*

Krupko V., Ivanenko O., Shcherbak O.

ANALYSIS OF THE COMPARISON OF MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELS IN STUDYING THE STABILITY OF TOWER CRANES

The article presents the results of the tower crane stability study during the operation taking into account the influence of loads on the supports. The results of comparing the distribution of loads on the crane support determined as a result of mathematical and computer simulation during the rotation and lifting of the boom are given.

Keywords. *Research, tower crane, stability, load distribution, mathematical model, computer model, adequacy.*

Стаття надійшла 20.05.2023 р.

УДК 621.7

doi.org/10.31498/2522-9990252023286705

Manoilov O.V., Kudinova K.V.

THE DEVICE FOR ROTARY BROACHING OF BLIND POLYHEDRAL HOLES

The paper deals with the actual problem of obtaining polyhedral blind holes in a single production environment. This problem is especially relevant when performing repair work in machine-building production. The biggest problem is that obtaining multi-faceted holes using special drills as a tool is associated with large efforts that arise during the processing process. As a result of the analysis of research on this issue, some shortcomings were identified that greatly complicate the implementation of this method for obtaining faceted holes. Namely, processing with an additional rocking motion requires special equipment, which in turn is not economically justified. A tool is proposed—a device that will allow using conventional lathes, drilling or milling machines to obtain the necessary hole profile. At the same time, the processing performance is significantly increased, and the effort is reduced. The resource of the tool increases, since during processing not the entire cutting edge is involved in the work. Recommendations on the choice of optimal processing modes for soft materials are presented. There is also a clear economic effect.

Keywords. *Polyhedral hole, force, back surface, processing, productivity, tool-fixture, rolling.*

Problem statement. Currently, the problem facing the metallurgical, machine-building or shipbuilding industry is the prompt execution of repair work, which will avoid forced downtime and