УДК 621.873 **DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.95.0.69**

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕСУВАННЯ КОЗЛОВОГО КРАНА ПРИ ДІЇ ВІТРОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Іваненко О. І.[1], Рагулін В. М.[1], Назарько О. О.[1]
[1]Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. *Наведено результати експериментальних досліджень параметрів пересування моделі козлового крана при дії вітрових навантажень. Виконано оцінку точності та достовірності отриманих результатів та намічено подальші напрями досліджень. Прийнята програма випробувань містила визначення критеріїв подібності та масштабу моделі, де як головний параметр було взято швидкість крана при дії на нього вітру. Вплив різних факторів та оцінка впливу їх взаємодії досягались проведенням ПФЕ типу 2^4*

Ключові слова: *дослідження, експеримент, кран, модель, установка, пересування, вітрове навантаження, параметри, результати, порівняння.*

Вступ

Дослідження впливу вітрових навантажень на працездатність вантажопідйомних кранів, незважаючи на багаточисельні наукові розробки, залишається і сьогодні предметом обговорень.

Розв'язання проблеми зі скорочення простоїв вантажопідйомних кранів при дії інтенсивного вітру можливе за рахунок виявлення резервів кранів і їх використання за швидкості вітру більше 20 м/с. Це може бути досягнуто розробкою науково обґрунтованих методів підвищення ефективності використання і безпеки вантажопідйомних кранів, що розширюють діапазон швидкостей вітру для їх робочого стану.

Відсутність відомостей про фактичні швидкості руху кранів під дією вітрового навантаження різної інтенсивності, з урахуванням технічного стану крана, ускладнює розробку заходів, що сприяють подальшому розширенню діапазонів вітрового навантаження, за яких можлива експлуатація кранів.

Відомо, що навіть невеликий вітер робочого стану впливає на експлуатаційну надійність вантажопідйомних кранів, що працюють на відкритих майданчиках. При угоні вітром кран рухається з наростаючою швидкістю до зіткнення із сусідніми кранами або кінцевими упорами. До угону крана вітром можуть призвести навіть окремі короткочасні пориви вітру в поєднанні з дією інерційних сил під час гальмування.

Динаміка руху вантажопідйомного крана при дії інтенсивного вітру до останнього часу залишається невивченою, що пов'язано з певними труднощами формалізації випадкового характеру вітру, змінного в часі, в розмірі та напрямку.

Аналіз публікацій

Дослідження дії вітрових навантажень на інженерні споруди – задача багатопланова й потребує розгляду різноманітних аспектів наукової діяльності: математичного опису пересування повітряних мас; опису основних характеристик вітру та їх розподілу на території України; вирішення прикладних задач дії вітру на різноманітні споруди тощо. Пошук рішень прикладних задач виконується, як правило, на межі різних наук: математики, прикладної метеорології та відповідних інженерних дисциплін. Багато вітчизняних та зарубіжних вчених займалися цими питаннями. Опубліковано значну кількість робіт, в яких розглядаються окремі питання руху та гальмування вантажопідйомних кранів при дії вітрових навантажень під час експлуатації. Значний внесок у дослідження цієї проблеми зробили праці Гайдамаки В.Ф. [1], Єрофеева М.І. [2], Зубка М.Ф. [3], Спіциної Д.М. [4] та ін. З останніх робіт треба виділити публікації Подобєда В.О. [5].

Мета і постановка завдання

Мета експериментального дослідження полягає в оцінці точності та достовірності результатів теоретичних досліджень, що досягається проведенням експерименту на фізичній моделі, що забезпечує необхідний діапазон зміни факторів впливу для кінцевого виводу точності та достовірності результатів роботи з вивчення динаміки переміщення козлового крана вітром. Для цього були проведені попередні теоретичні дослідження, де були визначені параметри пересування крана в залежності від швидкостей вітру, а саме: відстань пересування, час на-

бору швидкості до максимального значення і прискорення крана [6].

Результати досліджень

Експериментальна установка, створена відповідно до критеріїв подібності й масштабів моделювання, призначена для проведення комплексних випробувань із дослідження параметрів козлового крана під дією інтенсивного вітру.

При визначенні критеріїв подібності в якості досліджуваного параметра обрано швидкість пересування крана при дії на нього вітру. У загальному випадку ця швидкість залежить від наступних факторів.

$$V = f(P_B, m, \omega, a, I, S, t), \qquad (1)$$

де P_B – сила вітру, Н; m – маса крана, кг; ω – опір переміщенню крана, Н; a – прискорення руху, м/с^2; I – аеродинамічний фактор, кг/м; S – довжина шляху угону крана, м; t – час, за який кран набере максимальну швидкість V, с.

Загальний вигляд установки представлено на рис. 1.

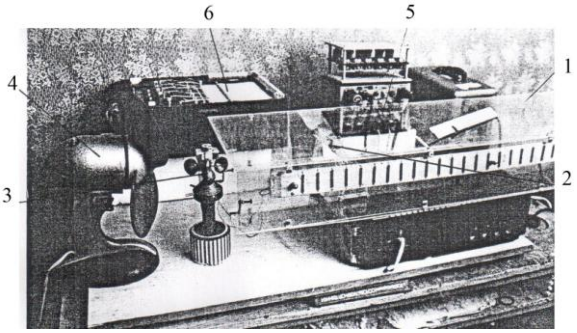


Рис. 1. Загальний вигляд експериментальної установки: 1– аеродинамічна труба прямокутного перерізу; 2 – модель козлового крана; 3 – анемометр, 4 – вентилятор; 5 – вимірювальна апаратура; 6 – реєструюча апаратура

Необхідна сила опору пересуванню моделі козлового крана створювалась за рахунок зміни кута нахилу аеродинамічної труби до горизонту.

Комплект вимірювальних засобів та реєструючої апаратури дозволив провести комплекс досліджень, що відповідають поставленим задачам.

Програма досліджень

Дослідження параметрів угону козлового крана під дією інтенсивного вітрового навантаження проводилося за загальноприйнятою методикою [7, 8].

Програмою експериментальних досліджень передбачено визначення довжини шляху розгону крана, часу розгону, прискорення крана за різних швидкостей вітру.

Комутаційна схема визначення параметрів приведена на рисунку 2.

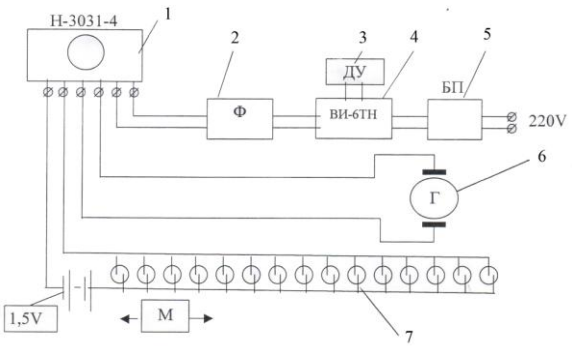
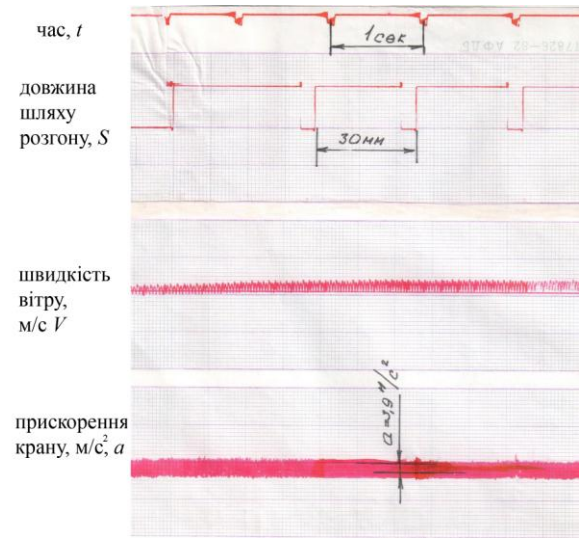


Рис. 2. Комутаційна схема визначення параметрів руху вантажопідйомних кранів під дією вітру: 1 – реєструюча апаратура; 2 – фільтр; 3 –датчик прискорень; 4 – вимірювальна апаратура; 5 – блок живлення; 6 – мікродвигун анемометра; 7 – герметичні контакти

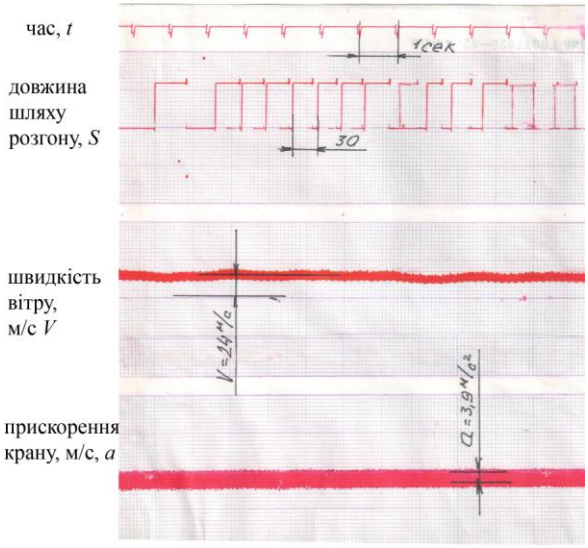
Для експериментального визначення швидкості крана під дією вітру неробочого стану (угон) методика випробувань передбачувала вимірювання шляху розгону та фіксування часу розгону з моменту, при якому прискорення дорівнює нулю (це відповідає моменту набору краном максимальної швидкості угону). Ці величини реєструвалися самописцем Н3031.

Прискорення при угоні крана вимірювалось індукційним акселерометром ДУ-5С, встановленим на моделі козлового крана. Запис параметра проводився з використанням вібровимірювальної апаратури ВИ-6ТН та самопишучого приладу Н3031, розшифрування сигналів здійснювалося за допомогою тарувальних графіків.

Рух крана в аеродинамічній трубі з розмірами 265х135х1100 мм виконувався за рахунок вітрового навантаження, що створювалось вентилятором ВЗ-1. Фіксування різних швидкостей вітру виконувалось індукційним анемометром та реєструвалось самописцем Н3031. На рис. 3 представлено типові зразки осцилограм процесу угону крана вітром, реєстрації різних швидкостей вітру (V=21 м/с та V=24 м/с) з автоматичною відміткою часу.



а



б

Рис. 3. Осцилограми параметрів пересування моделі козлового крана під дією вітру: а – рух крана при дії вітру швидкістю 21 м/с; б – рух крана при дії вітру швидкістю 24 м/с

Розбіжність теоретичних та експериментальних даних угону визначається співвідношенням:

$$\Delta P = \frac{\delta_V^E - \delta_V^T}{\delta_V^E} - 100\%, \qquad (2)$$

де δ_V^E – максимальне значення швидкості угону крана вітром, отримане під час проведення експерименту; δ_V^T – максимальне значення найбільшої швидкості угону крана, отримане у результаті розрахунку на комп'ютері, яке склало 11 %.

Результати експерименту і порівняння з теоретичними даними наведені на рис. 4.

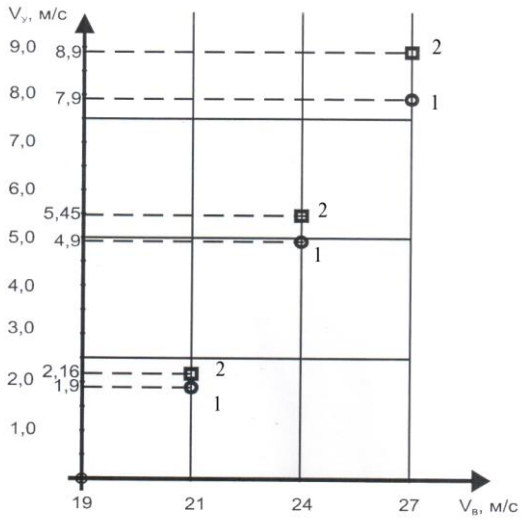


Рис. 4. Порівняльні дані теоретичних та експериментальних результатів: 1 – експериментальні значення; 2 – теоретичні значення

Аналіз впливу основних факторів на похибку швидкості угону доречно виконати за допомогою поліноміальної моделі, складеної з перших членів розкладу в ряд Тейлора функції, яка може бути отримана за допомогою повного факторного експерименту, що є одним із найбільш розроблених і часто використовуваних методів оптимального планування експериментів, до завдань якого входить побудова локально-інтегральної моделі досліджуваного процесу вигляду:

$$Y(x) = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ik} x_i x_k + \\ + \sum b_{ik1} x_i x_k x_1 + \ldots , \qquad (3)$$

де b – коефіцієнти теоретичного рівняння регресії; x – досліджувані фактори; $Y(x)$ – залежність, що вивчається.

Реалізація повного факторного експерименту (ПФЕ) втілювалася за стандартною методикою. Під час проведення ПФЕ в роботі були використані рекомендації з літературних джерел [7, 8].

Вивчення впливу швидкості вітру, маси крана, опору переміщенню, аеродинамічного фактора на величину шляху та швидкості угону, а також оцінка впливу ефекту взаємодії цих факторів, досягалась проведенням ПФЕ типу 2^4. Тоді рівняння (3) перетворюється в цьому випадку до вигляду:

$$S(x) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + \\ + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + \\ + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{123}x_1x_2x_3 + \\ + b_{124}x_1x_2x_4 + b_{134}x_1x_3x_4 + b_{234}x_2x_3x_4 + \\ + b_{1234}x_1x_2x_3x_4, \quad (4)$$

де $S(x)$ – величина швидкості угону крана, що реалізується в даній комбінації досліджуваних факторів; $b_0, b_{ij}, b_{ijk}, b_{1234}$ – коефіцієнти, що підлягають експериментальному дослідженню; x_1, x_2, x_3, x_4 – фактори в кодованому вигляді, що характеризують, відповідно, швидкість вітру, масу крана, опір переміщенню й аеродинамічний фактор.

Позначимо x_1 – і-й фактор в натуральному вигляді; (+1) і (-1) – відповідно верхній та нижній рівні зміни і-го фактора; x_i^0 – номінальне значення і-го фактора.

Для дослідження впливу швидкості вітру та взаємовпливу різних факторів на величину шляху і швидкості угону крана вітром скористаємося формулою визначення швидкості X угону крана вітром.

В табл. 1 представлено умови планування та результати розрахунків.

Таблиця 1 – Умови планування експерименту

	Код	$X_1 = V_b$, м/с	$X_2 = m$, кг	$X_3 = \omega$,	$X_4 = I$, кг/м
x_i^B	+1	2	91	0,05	0,029
x_i^H	-1	1	75	0,003	0,027
x_i^O	0	1,5	83	0,0265	0,028
λ_i	-	0,5	8	0,0235	0,001

Точність вимірювань отриманого ряду оцінок S_{yi} визначалась за G-критерієм Кохрена [9]. Так, за обраного рівня значущості $\alpha = 0,05$ експериментальне значення відношення максимальної оцінки дисперсії до суми всіх оцінок дисперсії $G^E = 0,216 < G^T_{f1,f2} = 0,3311$, що свідчить про рівноточність експерименту. Помилка експерименту склала $S_y = 0.0058$.

Визначивши коефіцієнти рівняння регресії, отримаємо:

$$S(x_1; x_2; x_3; x_4) = 0,23 + 0,2x_1 - \\ - 0,047x_2 - 0,084x_3 + 0,024x_4 - \\ - 0,028x_1x_2 - 0,058x_1x_3 - 0,0014x_1x_4 + \\ + 0,006125x_2x_3 + 0,008375x_2x_4 - \\ - 0,0125x_3x_4 - 0,013125x_1x_2x_3 + \\ + 0,010875x_1x_2x_4 + 0,014875x_1x_3x_4 + \\ + 0,008875x_2x_3x_4 - 0,010375x_1x_2x_3x_4. \quad (5)$$

Помилка при обчисленні коефіцієнтів регресії для ПФЕ типу 2^4 внаслідок ортогональності плану є однаковою і складає $S\{b_i\}$=0,0145.

Перевірку значущості коефіцієнтів рівняння регресії проводимо за *t*-критерієм Стьюдента. Табличне значення $t^T_{\alpha,f}$ - критерію при $\alpha = 0,05$ та за числа ступенів свободи $f = N(\gamma - 1) = 16(5-1) = 64$ дорівнює $t^T_{\alpha,f} = 2,0$.

Виключивши незначущі коефіцієнти рівняння регресії, приведемо рівняння шуканої залежності до остаточного вигляду:

$$S(x) = 0,23 + 0,2x_1 - 0,047x_2 - \\ - 0,084x_3 - 0,058x_1x_3. \quad (6)$$

Перевірка адекватності отриманої регресійної моделі за *F* -критерієм Фішера показала, що експериментальне значення $F^E = 0,2$, тоді як табличне $F^T_{f1,f2} = 1,99$, де за умовами адекватності $f1 = 11, f2 = 64$. Таким чином, при обраному рівні значущості $\alpha = 0,05$, гіпотеза про адекватність підтверджується, оскільки $F^E < F^T_{f1,f2}$.

Істинні же коефіцієнти регресії знаходяться всередині довірчих інтервалів з рівнем надійності 95 %.

Висновки

Проведені дослідження дозволили встановити:

1. Регресійний аналіз результатів експерименту підтвердив коректність прийнятої математичної моделі руху крана під дією вітру.

2. Розбіжність між результатами експериментального і теоретичного дослідження становить, в середньому, 11 %.

3. Результати теоретичних та експериментальних досліджень можуть бути основою для проведення комп'ютерного моделювання процесу пересування крана при вітрових навантаженнях.

Література

1. Гайдамака В.Ф. Работа грузоподъемных машин при бесступенчатом торможении. Харьков : Вища школа, 1988. 141 с.
2. Ерофеев Н.И., Подобед В.А., Лисовой П.Я. Определение допустимых рабочих скоростей ветра грузоподъемных кранов // Судостроение и судоремонт: Сб. науч. Тр. Одесса. 1977. №9. С. 100–107.
3. Зубко Н.Ф., Подобед В.А. Нормирование ветровых загрузок для рабочего состояния грузоподъемных кранов // Безопасность труда в промышленности. 1982. №5. С. 54–55.
4. Подобед В.А. Повышение эффективности использования портовых кранов при ветровых нагрузках: Автореф. дис. на соискание ученой степени д.т.н.. М.: 2007. 41 с.
5. Спицына Д.Н., Буланов В.Б., Абрамович И.И. Динамические воздействия ветровой нагрузки на козловые краны М.: Труды ВНИГПТМАШ. 1976. №1. С. 88–96.
6. Иваненко О.И., Мартынов А.В. Определение параметров угона грузоподъемных кранов ветром // Конструирование и производство транспортных машин. Харьков, 1989. Вып. 21. С. 47–52.
7. Рафалес-Ламарка Э.Э. Методология научно-технического исследования. Луганск. изд-во Луганского маш. ин-та.1992. 219 с.
8. Хартман К., Левицина Э., Шефер В. и др. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М.: Мир. 1977. 552 с.
9. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.

References

1. Gaydamaka V.F. Rabota gruzopod'emnyih mashin pri besstupenchatom tormozhenii. Har-kov : Vischa shkola, 1988. 141 s. [in Russian].
2. Erofeev N.I., Podobed V.A., Lisovoy P.Ya. Opredelenie dopustimyih rabochih skorostey vetra gruzopod'emnyih kranov // Sudostroe-nie i sudoremont: Sb. nauch. Tr. Odessa. 1977. #9. S. 100-107. [in Russian].
3. Zubko N.F., Podobed V.A. Normirovanie vetrovyih zagruzok dlya rabochego sostoyaniya gruzopod'emnyih kranov Bezopasnost truda v promyishlennosti. 1982. #5. S. 54-55. [in Russian].
4. PodobedV.A. Povyishenie effektivnosti ispolzovaniya portovyih kranov pri vetrovyih nagruzkah Avtoref. dis. na soiskanie uchenoy stepeni d.t.n.. M.: 2007. 41 s. [in Russian].
5. Spitsyina D.N., Bulanov V.B., Abramovich I.I. Dinamicheskie vozdeystviya vetrovoy nagruzki na kozlovyie kranyi M.: Trudyi VNIGPTMASh. 1976. #1. S. 88-96. [in Russian].
6. Ivanenko O.I., Martyinov A.V. Opredelenie parametrov ugona gruzopod'emnyih kranov vetrom Konstruirovanie i proizvodstvo transportnyih mashin. Harkov, 1989. Vyip. 21. S. 47-52. [in Russian].
7. Rafales-Lamarka E.E. Metodologiya nauchno-tehnicheskogo issledovaniya. Lugansk. izd-vo Luganskogo mash. in-ta.1992. 219 S. [in Russian].
8. Hartman K., Levitsina E., Shefer V. i dr. Planirovanie eksperimenta v issledovanii tehnologicheskih protsessov. M.: Mir. 1977. 552 s. [in Russian].
9. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnyih usloviy. M.: Nauka, 1976. 279 s. [in Russian].

Іваненко Олег Іванович[1], к.т.н., доцент кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А.М. Холодова, olehiv2@gmail.com, тел.: +38050-905-74-90,
Рагулін Віталій Миколайович[2], к.т.н., доцент кафедри інженерної та комп'ютерної графіки, ragulinrvn@ukr.net, тел.: +38-050-545-80-70,
Назарько Ольга Олександрівна[1], к.т.н., доцент кафедри інженерної та комп'ютерної графіки, olganazamail@gmail.com, тел.: +38-066-66838-96,
[1]Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002.

Research of model tests of parameters movement of the goat crane under action of load loads

Abstract. Problem. *The results of experimental researches of parameters of movement of the model of the gantry crane under the influence of wind loadings are resulted.* ***Goal.*** *The assessment of the accuracy and reliability of the obtained results is performed and further directions of research are outlined.* ***Methodology.*** *The adopted test program included the definition of similarity criteria and scale of the model, where the main parameter was the speed of the crane when exposed to wind.* ***The results.*** *The influence of various factors and assessment of the impact of their interaction was achieved by conducting PFE type 24*

Key words: *research, experiment, crane, model, installation, movement, wind load, parameters, results, comparison.*

Ivanenko Oleh[1], PhD, Assoc. Prof. Department of Construction and Road-Building Machinery, olehiv2@gmail.com, tel.: +38050-905-74-90,
Vitaliy Ragulin[1], PhD, Assoc. Prof. Department of Engineering and Computer Graphics, ragulinrvn@ukr.net, tel.: +38-050-545-80-70,
Nazarko Olga[1], PhD, Assoc. Prof. Department of Engineering and Computer Graphics, olganazamail@gmail.com, tel.: +38-066-66838-96,
[1]Kharkiv National Automobile and Highway University Yaroslava Mudrogo str., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002