

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ КРОКУЮЧОГО КРАНУ З ҐРУНТОМ

В роботі розглянута методика силового розрахунку механізму переміщення крокуючих кранів. Представлена математична модель взаємодії крокуючого крану з ґрунтом під час крокування горизонтальною площадкою, а також під час крокування на підйом. В статті було виведено формули перерахунку для загального випадку, вважаючи, що крокуючий кран крокує по ухилу. Дана методика може використовуватись в ході проектування нових крокуючих машин.

Ключові слова: математична модель, крокуючий кран, механізм крокування, реакція ґрунту.

O.V. DZERZHINSKAYA

Donbas State Machine-Building Academy, Kramatorsk, Ukraine

MATHEMATICAL MODEL OF THE INTERACTION PROCESS CURRENT CRANE WITH GROUND

Walking cranes are used for construction work. Crawling walking equipment is indispensable for working on weak soils. Large supporting surfaces provide a small specific pressure, and the soil softening ensures uniform distribution of pressure under the support surface of the skis. However, the stepper motor has its disadvantages, such as low speed travel, a large mass of walking cranes, inadequate construction of resistance elements of the skier and stepping mechanism and others, led to the emergence of scientific research. However, despite a large number of studies, there are a number of unresolved issues that are of interest to engineering practice. One of such issues is the interaction of the supporting surface of the skis with the soil. The paper considers the method of force calculation of the mechanism of movement of stepping cranes. The mathematical model of the interaction of the stepping crane with the soil, when walking on a horizontal platform, as well as on stepping on the rise, is presented. In the article, the conversion formulas were derived for the general case, considering that the stepping crane is sloping. This technique can be used in the design of new walking machines. The purpose of this work is to construct a model of the process of interaction of the stepping crane with the soil. Insufficient study of the soil properties and the process of their destruction, and the complete lack of knowledge of the patterns of the process of forming and moving the prisms of drawing under the base of the stepping crane, does not allow to determine by calculation, for different conditions of the step, the value and the point of application of the reaction R . For the same reasons it is impossible by calculation to determine the horizontal force of the resistance of the movement of the stepping crane T . When deciding the question of an experimental study of the laws characterizing the process of stepping and its power side, one should also bear in mind the impossibility of a direct measurement of the quantities Δ , R and T . The only practically possible way of determining these quantities is to calculate their values N^C , N^B and α_{pb} through the quantities, and, which it is possible to measure experimentally.

Key words: mathematical model, stepping crane, mechanism of stepping, reaction of soil.

Постановка проблеми. Крокуючі крани використовуються для будівельних робіт. Крокуюче ходове обладнання незамінне для роботи на слабких ґрунтах. Великі опорні поверхні забезпечують малий питомий тиск, а податливість ґрунтів забезпечує рівномірність розподілу тиску під опорною поверхнею лиж. Для вибору конструктивних параметрів механізму крокування, була розроблена математична модель процесу взаємодії крокуючого крану з ґрунтом.

Аналіз останніх досліджень. В теперішній час дослідження процесу взаємодії крокуючої машини з ґрунтом ведуть Є.С. Бріскін, В.В. Чернишов, А.В. Малолетов [1, 2], однак для крокуючих кранів запропонована ними модель потребує доопрацювання. Вивченням питання впливу конструкції опорної поверхні лиж на процес зчеплення з ґрунтом займалися Н.З. Гармаш і Ю.І. Бережний [3], але їх роботи засновані на дослідження тільки однієї форми опорних елементів лиж крокуючого рушія, інші конструкції і конфігурація опорних елементів розглянуті не були. Однак, незважаючи на велику кількість досліджень, виникає ряд невирішених питань, вирішення яких має інтерес для інженерної практики. Одним з таких питань є взаємодія опорної поверхні лижі з ґрунтом.

Метою даної роботи є побудова моделі процесу взаємодії крокуючого крану з ґрунтом.

Виклад основного матеріалу. Прийнята в даний час методика силового розрахунку механізму пересування крокуючих кранів виходить з наступних основних умовних положень (рис. 1):

1. Кут підйому бази при крокуванні визначається тільки конструктивними параметрами машини і кутом повороту валу кривошипа механізму крокування.

2. Вертикальна реакція ґрунту на базу R вважається прикладеною безпосередньо на кромці бази (точка «2»).

3. Сила опору пересуванню крокуючого крана визначається за формулою $T = f_{\sigma} \cdot R$.

4. Розрахунок ведеться з умови, що крокування можливе (відсутнє пробуксовування лиж), якщо

$$f_{\lambda} N^B > f_{\sigma} R,$$

де N^B сила, чисельно рівна тиску лиж на ґрунт.

При такій розрахунковій схемі величини реакції N^B і R не залежать від властивостей ґрунту, оскільки однозначно визначаються постійними конструктивними параметрами машини.

При крокуванні по горизонтальному майданчику ($\beta=0$) з умови рівноваги сил (рис. 1) прикладених до крокуючого крану маємо:

$$\left. \begin{aligned} \sum M_1 &= R(l_1+l_2) - Ql_1 = 0, \\ \sum Y &= N^B + R - Q = 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$R = \frac{l_1}{l_1+l_2} Q, \quad (2)$$

$$N^B = \frac{l_2}{l_1+l_2} Q, \quad (3)$$

де Q – вага крокуючого крану.

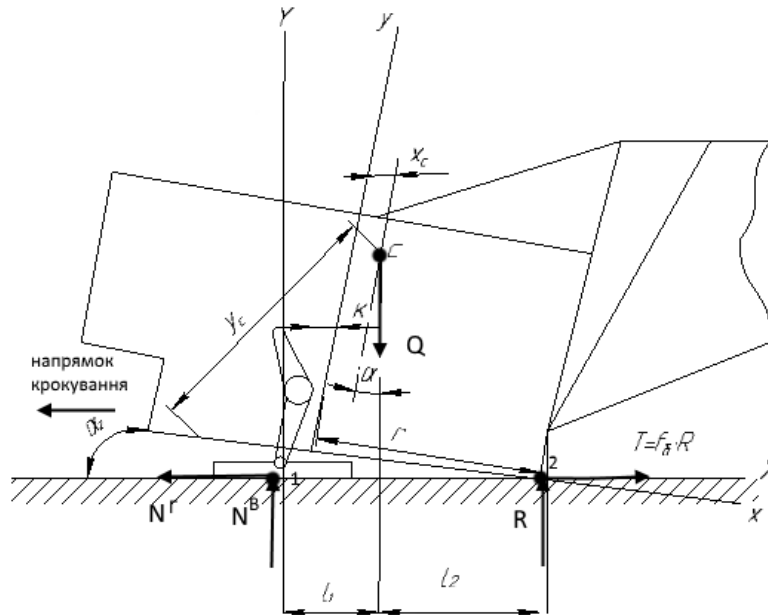


Рис. 1. Схема рівноваги сил крокуючого крану по горизонтальному майданчику ($\beta=0$)

Значення плечей l_1 і l_2 можна визначити з рис. 1, а таким чином

$$l_1 = (k + x_c + y_c \tan \alpha) \cos \alpha,$$

$$l_2 = (r - x_c - y_c \tan \alpha) \cos \alpha.$$

Так як значення кута α не перевищує $\sim 4^\circ$, можна прийняти $\cos \alpha \approx 1$, тоді:

$$l_1 \approx k + x_c + y_c \sin \alpha, \quad (4)$$

$$l_2 \approx r - x_c - y_c \sin \alpha, \quad (5)$$

де r – радіус опорної площини бази;

$x_c - y_c$ – координати центру тяжіння крокуючого крану;

k – відстань від центру кульової опори лижі до осі крокуючого крану.

Підставимо значення l_1 і l_2 з (4) і (5) в (2) і (3), отримуємо

$$R = \frac{k + x_c + y_c \sin \alpha}{k + r} Q, \quad (6)$$

$$N^B = \frac{r - x_c - y_c \sin \alpha}{k + r} Q, \quad (7)$$

У формулах (6) і (7) параметри Q , x_c , y_c і r постійні для цієї конструкції крокуючого крану, а k і α визначаються кутом повороту валу кривошипа механізму крокування і розмірами чотирьохланника. Отже, значення реакцій R і N^B залежать тільки від кута повороту валу кривошипа. Спостереження і досвід, проте, показують, що така ідеалізація розрахункової схеми грубо спотворює дійсну картину, що характеризує процес крокування і розподіл сил. В процесі крокування відбувається (рис. 2) втискування кромки бази в ґрунт на деяку глибину δ_6 з утворенням опорного майданчика a_1 , і під базою на довжині a_2 утворюється призма волочіни ґрунту, зрізаного кромкою при переміщенні бази у напрямку кроку. Сили реакції ґрунту на базу розподіляються по усій поверхні контакту бази з ґрунтом. Рівнодійна цих розподілених сил R буде прикладена в точці "2" на деякій відстані від кромки бази Δ , залежному від властивостей ґрунту, величини реакції R і кута нахилу бази до майданчика α_{nr} .

Кут α_{nr} буде визначатися не тільки конструктивними розмірами крокуючого крана і кутом повороту валу кривошипа, а й величинами вдавнення в ґрунт кромки бази δ_6 і лиж δ_1 .

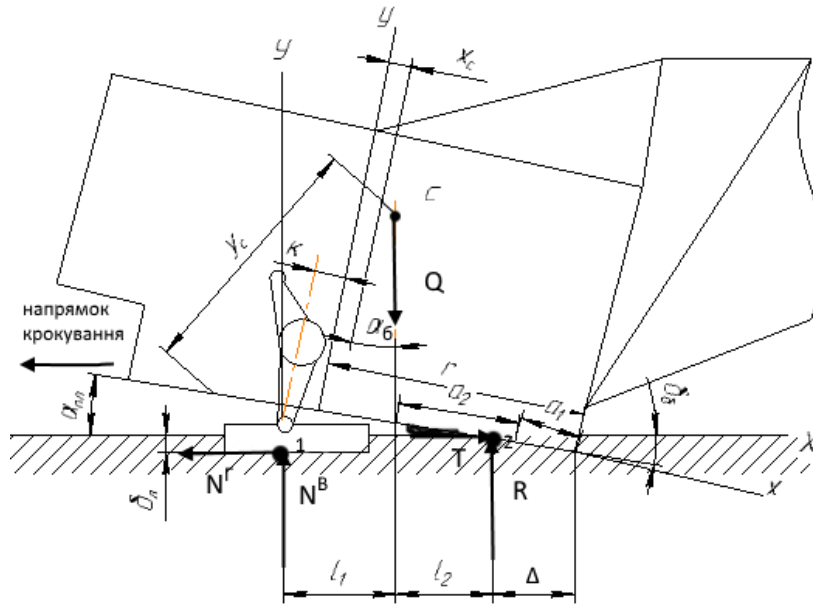


Рис. 2. Схема рівноваги сил крокуючого крану при втискуванні кромки бази в ґрунт на деяку глибину δ_s

Таким чином. Якщо виходити з реальних умов крокування (рис. 2):

$$\sum M_I = R(l_1 + l_2) - Ql_1 = 0,$$

$$\sum Y = N^B + R - Q = 0,$$

Де

$$l_1 \approx k + x_c + y_c \sin \alpha_{nl}, \tag{8}$$

$$l_2 \approx r - x_c - y_c \sin \alpha_{nl}, \tag{9}$$

Тому

$$R = \frac{k + x_c + y_c \sin \alpha_{nl}}{k + r - \Delta} Q, \tag{10}$$

$$N^B = \frac{r - x_c - y_c \sin \alpha_{nl}}{k + r - \Delta} Q, \tag{11}$$

З формул (10) і (11) виходить, що величини реакцій R і N^B залежать від властивостей ґрунту, по якому пересуваються крокуючі крани, і при цьому, оскільки у будь-яких умовах значення $\Delta > 0$, дійсний тиск на базу R буде завжди більше величини, визначуваною розрахунком за формулою (6), вертикальний тиск на лижі N^B – менше величини, визначуваною розрахунком за формулою (7).

Недостатня вивченість властивостей ґрунтів і процесу їх руйнування і повна не вивченість закономірностей процесу формування і переміщення призми волочіння під базою крокуючого крану не дозволяє розрахунковим шляхом визначити для різних умов крокування, величини і точку прикладення реакції R .

З тих же причин неможливо розрахунковим шляхом визначити горизонтальну силу опору пересування крокуючого крану T .

При вирішенні питання про експериментальне дослідження закономірностей, що характеризують процес крокування і його силову сторону, слід мати на увазі також неможливість здійснення безпосереднього виміру величин Δ , R і T . Єдиний практично можливий шлях визначення цих величин полягає в обчисленні їх значень через величини N^Gamma , N^B і α_{nl} , які представляється можливим виміряти експериментальним шляхом. Виведемо формули перерахунку для загального випадку, вважаючи, що крокуючий кран крокує по ухилу. При крокуванні на підйом (кут підйому майданчика β) з мал. 3 запишемо умови рівноваги:

$$\sum M_I = -Q_N l_1 - Q_T [y_c + (l_1 + l_2) \sin \alpha_{nl}] + R(l_1 + l_2) = 0, \tag{12}$$

$$\sum Y = N^B + R - Q = 0, \tag{13}$$

$$\sum X = T + Q_T - N^Gamma = 0, \tag{14}$$

де

$$Q_N = Q \cdot \cos \beta = Q,$$

$$Q_T = Q \cdot \sin \beta,$$

а значення l_1 і l_2 визначаються за формулами (8) і (9).

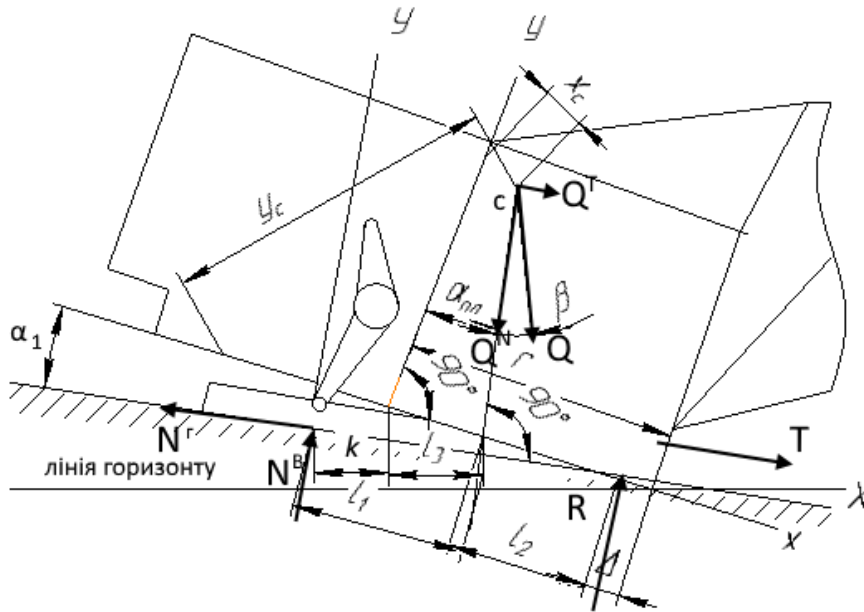


Рис. 3. Схема рівноваги сил крокуючого крану при крокуванні на підйом (кут підйому майданчика β)

З умов (13) і (14) знаходимо

$$R = Q - N^B, \tag{15}$$

$$T = N^{\Gamma} - Q \sin \beta, \tag{16}$$

а з рівняння (12)

$$R = Q \left(\frac{l_1 + y_c \sin \beta}{l_1 + l_2} + \sin \beta \cdot \sin \alpha_{nl} \right),$$

Чи приймаючи, що $\sin \beta \cdot \sin \alpha_{nl} \approx 0$,

$$R = Q \left(\frac{l_1 + y_c \sin \beta}{l_1 + l_2} \right).$$

Після підстановки в цей вираз значень l_1, l_2 з формул (8) і (9) та значення R з (15) знаходимо:

$$\Delta = (k + 2) - \frac{k + x_c + y_c (\sin \beta + \sin \alpha_{nl})}{1 - \frac{N^B}{Q}}. \tag{17}$$

Значення коефіцієнту опору руху бази визначиться по формулі:

$$f_{\delta} = \frac{T}{R} = \frac{N^{\Gamma} - Q \sin \beta}{Q - N^B}, \tag{18}$$

а коефіцієнт зчеплення лиж з ґрунтом:

$$f_{л} = \frac{N^{\Gamma}}{N^B}, \tag{19}$$

З формул (15), (16), (17), (18) і (19) видно, що приведені, що для випадку крокування на підйом, справедливі і при крокуванні вниз по ухилу, якщо значення кута β в цьому випадку вважати негативним.

Розглянемо метод експериментального виміру вертикальної N^B і горизонтальною N^{Γ} сил, що діють з боку ґрунту на лижі механізму крокування.

Вертикальна реакція ґрунту на лижі (рис. 4) є розподіленою силою, рівнодійна якій N^B у разі рівноваги лижі повинна проходити через центр кульової опори ноги механізму крокування (точка O_2).

Горизонтальна сила зчеплення лиж з ґрунтом є також розподіленою по усій опорній поверхні лиж силою. Рівнодійна сил зчеплення N^{Γ} лежить в площині контакту основи лиж з ґрунтом.

Перенесення цієї сили в центр кульової опори ноги називає появу додаткового моменту $m = -N^{\Gamma} \cdot c$, урівноважуваного за рахунок деякого перерозподілу вертикального тиску ґрунту на лижі: передній кінець лижі дещо розвантажується, а задній - навантажується. Таким чином сили N^B і N^{Γ} можна вважати прикладеними до кульової опори ноги механізму крокування. Направимо осі O_2XY , як

показано на рис. 4, і позначимо проекцію рівнодійної $\bar{N} = \bar{N}^B + \bar{N}^{\Gamma}$ на напрям подовжньої осі $O_1 O_2$ нижній частині ноги через N'' , а на напрям, перпендикулярне $O_1 O_2$ через N' .

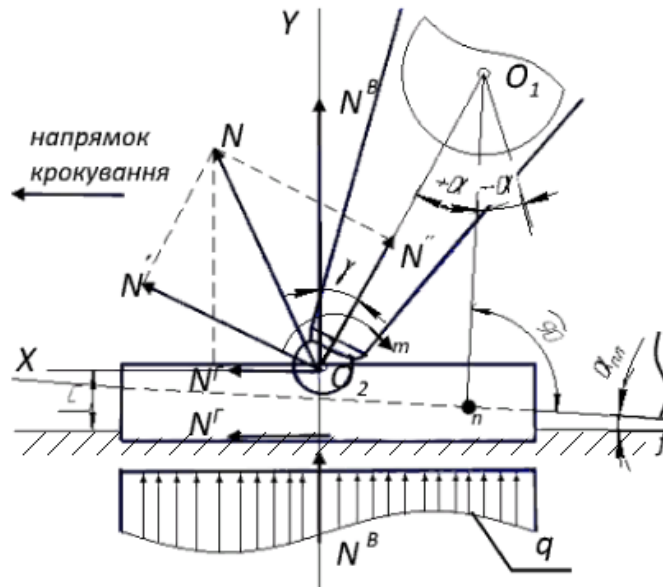


Рис. 4. Сили, що діють з боку ґрунту на лижі механізму крокування

Тоді

$$N^B = N'' \cos \gamma + N' \sin \gamma, \quad (20)$$

$$N^{\Gamma} = N' \cos \gamma - N'' \sin \gamma, \quad (21)$$

де γ – кут нахилу осі $O_1 O_2$ до осі Y .

Кут γ визначається з виразу

$$\gamma = \varphi + \alpha_{пл}, \quad (22)$$

де φ – кут нахилу осі ноги $O_1 O_2$ до лінії $O_1 n$, перпендикулярної основи бази.

$\alpha_{пл}$ – кут нахилу основи бази до майданчика.

Значення кута φ для різних положень кута повороту кривошипа визначається графічною побудовою. Якщо кут φ вважати позитивним при відхиленні лінії ноги $O_1 O_2$ до лінії $O_1 n$ у бік крокування і негативним при відкладанні у бік протилежному напрямку крокування тоді формули (20) і (21) будуть справедливі для будь-якого положення механізму крокування.

Висновки

Представлена модель взаємодії крокуючого крану з ґрунтом, при крокуванні по горизонтальній площадці, а також при крокуванні на підйом. Запропонована методика силового розрахунку механізму переміщення крокуючих кранів, може використовуватися при проектуванні крокуючих кранів.

Література

1. Брискин Е.С. Проблемы разработки шагающих машин / Е.С. Брискин, В.Е. Павловский, В.А. Шурыгин, В.В. Чернышев, А.В. Малолетов, В.А. Серов // Экстремальная робототехника : тр. конф., 25-26.09.2012 г. – Санкт-Петербург : Изд-во ЦНИИ РТК, 2012. – С. 43–50.
2. Брискин Е.С. Моделирование динамики смены стоп шагающих машин / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев // Штучний інтелект. – 2009. – № 3. – С. 293–300.
3. Гармаш Н.З. Конструкция, основы теории и расчета шагающего ходового оборудования горнотранспортных машин / Н.З. Гармаш, Ю.И. Бережной. – М. : Недра, 1971. – 144 с.

References

1. Briskin E.S. Problemy razrabotki shagayushchikh mashin / E.S. Briskin, V.E. Pavlovsky, V.A. Shurygin, V.V. Chernyshev, A.V. Maloletov, V.A. Serov // Ekstremalnaya robototekhnika tr. Conf., 25-26.09.2012: Publishing House CRI RTC- St. Petersburg, 2012. - P. 43-50.
2. Briskin E.S. Modelirovaniye dinamiki smeny stop shagayushchikh mashin / E.S. Briskin, V.V. Chernyshev // Shtuchniy intelekt, 2009. - No. 3. - p. 293-300.
3. Garmash N.Z. Konstruktsiya. osnovy teorii i rascheta shagayushchego khodovogo oborudovaniya gornotransportnykh mashin / N.Z. Garmash, Yu.I. Berezhnoy. - M.: Nedra, 1971. - 144 s.

Рецензія/Peer review : 19.12.2017 р.

Надрукована/Printed : 19.01.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кассов В.Д.