

Л. К. Поліщук  
Є. В. Харченко\*

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НЕСТАЦІОНАРНИХ КОЛИВАНЬ СТРІЛИ БУРТОУКЛАДНИКА В ПРОЦЕСІ ЗАВАНТАЖЕННЯ

Вінницький національний технічний університет  
\* Національний університет «Львівська політехніка»

**Анотація.** Побудовано математичну модель та узагальнений алгоритм розрахунку нестационарних коливань стріли буртоукладника, які виникають в процесах завантаження або розвантаження конвеєра. Багатопрогонова металоконструкція стріли складається із шарнірно зчленованих жорстких секцій і розташована під деяким гострим кутом до горизонту. Вона зберігає прямолінійну форму за рахунок того, що опирається нижнім кінцем на нерухому шарнірну опору і утримується в робочому стані за допомогою податливої вантової підвіски. Розрахунок нестационарних коливань довгомірної конструкції зводиться до числового інтегрування нелінійної системи диференціальних рівнянь руху, одержаних за схемою рівнянь Лагранжа другого роду. Наводяться результати досліджень впливу довжини стріли, числа і характеристик проміжних опор, а також швидкості транспортування вантажу на навантаження елементів конструкції.

**Ключові слова:** буртоукладник, завантаження та розвантаження конвеєра, нестационарні коливання стріли, математичне моделювання.

**Abstract.** A mathematical model and a general algorithm for calculating non-stationary vibrations of the boom arrows, which arise in the processes of loading or unloading the conveyor, are constructed. The multi-armored metal structure of the arrow consists of hinged articulated rigid sections and is located at some sharp angle to the horizon. It retains a rectilinear shape due to the fact that it rests on the lower end on a fixed hinge support and is kept in working condition with the help of a pliable cable suspension. The calculation of non-stationary vibrations of a long-term construction reduces to the numerical integration of the nonlinear system of differential equations of motion obtained by the scheme of Lagrange equations of the second kind. The results of research on the influence of the length of the arrows, the number and characteristics of the intermediate supports, and the speed of the cargo transportation on the load of the structural elements are given.

**Keywords:** clamp-forming machine, loading and unloading of the conveyor, nonstationary fluctuations of the arrow, mathematical modeling.

У технологічних процесах переробки сировини на цукрових заводах важливу роль відіграють буртоукладники [11], що являють собою мобільні підйнятно-транспортні машини, обладнані стрічковими конвеєрами, улаштованими на стрілових конструкціях. Від продуктивності конвеєра і довжини стріли буртоукладника істотно залежить ефективність роботи усього виробничого комплексу. Несівна конструкція здебільшого складається з декількох шарнірно з'єднаних секцій, що утримуються в робочому положенні за допомогою вантової підвіски. Під час роботи конвеєра стріла перебуває під дією динамічних навантажень, викликаних вітровими потоками, статичною та динамічною незрівноваженістю обертових елементів, взаємодією завантаженої стрічки, що перебуває у поступальному русі, з опорними роликками. Характер зміни в часі динамічних навантажень стріли в усталеному режимі руху транспортувального органу, здебільшого, є близьким до періодичного. У зв'язку з цим у літературі проводиться модальний аналіз механічних систем стрілових конструкцій з метою уникнення резонансних явищ під час роботи конвеєрів [1, 4–6]. Обчислення параметрів частотного спектру дає можливість запобігти резонансним явищам у механічній системі, а знаходження власних форм сприяє вивченню вимушених коливань несної конструкції.

Методи розрахунку вимушених гармонічних коливань багатопрогових довгомірних систем широко розглядаються у літературі [2, 7–9] і застосовуються у дослідженнях динаміки підйимально-транспортного обладнання [1, 4].

З огляду на необхідність підвищення точності розрахунків стрілових конструкцій на міцність і довговічність широко вивчаються їх нестационарні коливання у різноманітних експлуатаційних режимах роботи підйимально-транспортного обладнання. Розробляються підходи до проведення аналізу взаємодії несівних конструкцій з привідними системами [1, 3, 4], рухомими навантаженнями [8], виконавчими органами машин [10]. З метою спрощення інженерних розрахунків за рахунок дискретизації пружних систем з розподіленими параметрами застосовують методи скінченних елементів [7, 10], скінченних різниць [9], узагальнених переміщень [2] тощо.

Незважаючи на широке застосування континуальних та континуально-дискретних розрахункових моделей механічних систем з довгими ланками, для дослідження динаміки пристроїв, виготовлених у вигляді сукупності шарнірно зчленованих елементів і призначених для переміщення і позиціонування вантажів, застосовують моделі зі скінченним числом ступенів вільності [5, 7, 9]. Ця тенденція є притаманною, зокрема, дослідженням у галузі робототехніки і спрямована на спрощення методів розрахунків динамічних процесів.

Слід зазначити, що нестационарні коливання стрілових конструкцій конвеєрів, які виникають під час заповнення виконавчого органу підйимально-транспортної машини сипким вантажем, вивчені недостатньо. Це пояснюється складністю задач про коливання механічних систем з одночасним урахуванням несталості маси їхніх елементів, а також рухомості навантажень.

У даній праці, у застосуванні до стрілової конструкції, що складається із двох або трьох шарнірно зчленованих жорстких секцій, побудовано математичні моделі нестационарних вимушених коливань механічної системи, обумовлених завантаженням стрічки конвеєра та проведено дослідження впливу конструкційних і експлуатаційних чинників на амплітуди коливань і динамічні навантаження елементів стріли.

Рівняння руху механічної системи складені за схемою рівнянь Лагранжа другого роду. За узагальнені координати прийняті кути повороту жорстких секцій стріли. Швидкість транспортування рівномірно розподіленого по довжині стрічки вантажу прийнята сталою. Зміна в часі довжини завантаженої частини стрічки і, відповідно, інерційних характеристик та навантажень секцій стріли обумовила нелінійний характер математичної моделі. Коефіцієнти жорсткості опорних вузлів системи прийняті сталими. Дисипацію енергії коливань враховано силами в'язкого тертя.

Для числової реалізації запропонованих математичних моделей розроблені алгоритми і комп'ютерні програми розрахунків динамічних процесів в системі MathCAD. При цьому застосовано числовий метод інтегрування диференціальних рівнянь руху з автоматичним вибором кроку. Проведені дослідження нестационарних процесів у дво- та трисекційних стрілових конструкціях буртоукладників. Опрацьовано практичні рекомендації, спрямовані на зменшення динамічних навантажень секцій стріли та на підвищення продуктивності підйимально-транспортної машини.

**Висновки.** Побудовано математичну модель нестационарних коливань трисекційної підвісної стріли буртоукладника, що дає можливість з достатньою точністю проводити аналіз динамічних явищ, які виникають у несній конструкції з жорсткими секціями, на стадії проектування. Як показали дослідження, амплітуди коливань і динамічні навантаження елементів стріли значною мірою залежать від маси транспортованого вантажу, швидкості руху стрічки конвеєра, а також жорсткості утримувальних канатів і можуть змінюватися, в залежності від зазначених технічних характеристик, в широких діапазонах.

Збудження нестационарних коливань системи в процесі завантаження підйимально-транспортної машини може призводити до прослаблення елементів вантової підвіски. Для

усунення згаданого явища необхідно раціонально добирати швидкість транспортування вантажів, що свідчить про доцільність оснащення буртоукладників регульованим гідравлічним або електричним приводом.

### Л і т е р а т у р а

1. Волков Д. П., Черкасов В. А. Динамика и прочность многоковшовых экскаваторов и отвалообразователей. – М.: Машиностроение, 1969. – 408 с.
2. Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений. – М: Стройиздат, 1979. – 320 с.
3. Ловейкін В. С., Ярошенко В. Ф., Коробко М. М. Аналіз режимів пуску ланцюгових конвеєрів сільськогосподарських машин // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Вип. 40. – Мелітополь: ТДАА, 2006. – С. 221–230.
4. Панкратов С. А. Динамика машин для открытых горных и земляных работ (основы теории и расчета). – М.: Машиностроение, 1967. 447 с.
5. Поліщук Л. К., Харченко Є. В. Аналіз вільних коливань механічної системи стріли відвалоутворювача у вертикальній площині // Вібрації в техніці та технологіях. – 2011. – №3(63) – С. 33 – 38.
6. Поліщук Л. К., Харченко Є. В. Модальний аналіз суцільної багатопрогонової стріли відвалоутворювача // Вібрації в техніці та технологіях: Все-укр. наук.-техн. журнал. – Вінниця, 2013. – Вип. №3 (71). – С. 78–84.
7. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений: Учебник для вузов / А. Ф. Смирнов, А. В. Александров, Б. Я. Лашеников, Н. Н. Шапошников / Под ред. А. Ф. Смирнова. – М.: Стройиздат, 1984. – 416 с.
8. Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. – Москва: Машиностроение, 1985. – 472 с.
9. Филин А. П. Прикладная механика твердого деформируемого тела: Сопротивление материалов с элементами теории сплошных сред и строительной механики. – Т. III. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 480 с.
10. Харченко Є. В., Поліщук Л. К., Собковскі С. Розрахунок перехідних процесів у стрічковому конвеєрі з урахуванням рухомості меж транспортувального органу // Технічні вісті. – 2001. – №1(12), 2(13). – С. 102–106.
11. Polishchuk L. K., Kharchenko E. V., Zvirko O. I. Corrosion-Fatigue Crack-Growth Resistance of Steel of the Boom of a Clamp-Forming Machine // Materials Science. – 2015. – Vol. 51, No 2. – P. 229–234.

**Поліщук Леонід Клавдійович**, д.т.н., доцент, Вінницький національний технічний університет, професор кафедри «Галузеве машинобудування», e-mail: leo.polishchuk@gmail.com.

**Харченко Євген Валентинович** – д. т. н., професор, завідувач кафедри опору матеріалів та будівельної механіки, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: kharchen@wp.pl

**Polishchuk Leonid K.**, doctor of engineering sciences, assoc. prof., Vinnytsia National Technical University, professor of department «Engineering branch», e-mail: leo.polishchuk@gmail.com.

**Kharchenko Yevhen V.**, doctor of engineering sciences, professor, Lviv Polytechnic National University, Head of Department Bridges and Structural Mechanics, e-mail: kharchen@wp.pl