УДК 624.014.2:624.042.41:624.042.8

В.О. Попов
О.В. Федоров

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ СУДНОНАВАНТАЖУВАЧІВ КРАНОВОГО ТИПУ ПІД ДІЄЮ ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі досліджено особливості просторової роботи та динамічної поведінки будівельних металоконструкцій великорозмірних суднонавантажувачів кранового типу під дією статичної та пульсаційної складових вітрового навантаження. Встановлено, що зосередження значної маси навантажувальних технологічних агрегатів (рухомої подаючої голівки, приводних механізмів, каскадних телескопічних жолобів) на вільній консолі довгомірної стріли суттєво збільшує інерційність системи та знижує частоту її власних горизонтальних коливань. Показано, що виникнення довгоперіодних низькочастотних коливань створює передумови для небезпечного резонансу споруди з поривами прибережного вітру. На основі скінченно-елементного моделювання обґрунтовано необхідність конструктивного полегшення кінцевої ділянки стріли та регламентації експлуатаційних режимів для гарантування надійності й загальної стійкості суднонавантажувачів.

Ключові слова: суднонавантажувач кранового типу, консольна стріла, вітрове навантаження, низькочастотні коливання, вітровий резонанс, метод скінченних елементів.

Abstract

This paper investigates the spatial behavior and dynamic response of the structural steelwork of large-scale crane-type ship-loaders subjected to static and pulsating wind actions. It is established that concentrating significant mass of loading technological units (movable feeding head, drive mechanisms, telescopic cascade chutes) at the free cantilever tip of a long-span boom substantially increases the system's inertia and reduces its natural horizontal vibration frequency. It is demonstrated that the emergence of long-period, low-frequency oscillations creates preconditions for hazardous resonance of the structure with coastal wind gusts. Based on finite element modeling, the study substantiates the necessity of structural lightening of the boom tip section and strict regulation of operational modes to ensure the reliability and overall stability of ship-loaders.

Keywords: crane-type ship-loader, cantilever boom, wind action, low-frequency oscillations, wind resonance, finite element method.

Вступ

Суднонавантажувачі безперервної дії є ключовою ланкою морської портової інфраструктури, що забезпечує експортну перевалку масових сипучих вантажів аграрної, хімічної, гірничодобувної та енергетичної галузей (зернових культур, мінеральних добрив, руди, вугілля) [1, 2]. В сучасних економічних та логістичних реаліях України, коли підтримання стабільного морського експорту аграрної продукції має стратегічне значення для держави та світової продовольчої безпеки, особливої актуальності набуває ефективне використання і адаптація наявного парку великорозмірних перевантажувальних комплексів кранового типу. Такі агрегати продуктивністю від 1 000 до понад 15 000 т/год дозволяють інтенсивно завантажувати великотоннажні суховантажі (класів Handysize, Panamax, Post-Panamax) без необхідності їх тривалого швартування вздовж причальної лінії [1 – 3].

Водночас експлуатація суднонавантажувачів кранового типу відбувається у відкритій прибережній акваторії, де висотні металоконструкції постійно зазнають дії інтенсивних вітрових потоків, штормових поривів та ожеледних навантажень [4]. Зростання габаритів сучасних суден вимагає збільшення вильоту консольних стріл суднонавантажувачів до 40 – 60 метрів при підйомі верхніх вузлів порталу на висоту до 40 метрів [4, 5]. За таких геометричних параметрів визначальним фактором конструктивної безпеки споруди стає не лише статична міцність елементів каркасу, а й динамічна поведінка довгомірної стрілової консольної системи під дією пульсацій вітрового тиску.

Характерною особливістю конструктивного рішення суднонавантажувачів кранового типу є поєднання масивного опорного порталу на рейковому ходу та довгомірної піднімально-опускальної стріли, підвішеної за допомогою канатно-поліспастної системи і трубчастих розтяжок (тяг) до висотного пілона. Така розрахункова схема створює суттєву анізотропію просторової жорсткості стрілової конструкції. У вертикальній площині стріла працює як пружно-підперта балка на проміжних вантово-поліспастних опорах, що забезпечує її достатню вертикальну жорсткість та обмежує прогини. У горизонтальній площині (з площини стріли) гнучкий канатний підвіс та похилі тяги практично не перешкоджають бічним зміщенням, тому стріла працює як довга тонка консоль (зазвичай шириною лише 1,3–1,6 м при вильоті понад 40 м), закріплена біля основи за допомогою шарнірів [5].

Постановка проблеми

Критичним чинником, що погіршує динамічні характеристики консольних конструкцій суднонавантажувачів, є перевантаження її вільного кінця технологічними агрегатами [5, 6]. У робочому режимі, коли суднонавантажувач подає сипучий матеріал у трюм судна, висувна частина переміщується у крайнє переднє положення в бік моря. При цьому на самому кінці консольної стріли концентрується значна зосереджена маса: масивні суцільнозварні стійки та двотаврові балки подаючої голівки, електроприводи механізму пересування, приводні барабани й натяжні станції конвеєра, обслуговуючі майданчики, а також важка телескопічна відвантажувальна труба (каскадний жолобчастий конвеєр) із приймальним коробом та власною сервісною платформою.

Наявність великої інерційної маси на максимальному плечі відносно шарнірного вузла опирання стріли призводить до різкого зниження частоти власних коливань конструкції у горизонтальній площині та відповідного збільшення періоду її коливань [5, 7]. Оскільки спектр енергії турбулентних поривів вітру (пульсаційної складової вітрового навантаження) зосереджений саме в низькочастотному діапазоні (до 1 Гц), виникає безпосередня загроза входу стрілової системи у вітровий резонанс [3 – 5]. Отже, постає актуальна науково-практична задача – дослідити механізм виникнення небезпечних низькочастотних коливань суднонавантажувачів під дією вітру та обґрунтувати конструктивні шляхи їх усунення за рахунок зменшення маси кінцевої частини стріли.

Основна частина

Для аналітичної оцінки динамічної поведінки консольної стріли суднонавантажувача під дією поривчастого бічного вітру розглянемо її, згідно рекомендацій, [5, 7] як пружно-інерційну систему. У загальному вигляді диференціальне рівняння вимушених коливань пружної конструкції з горизонтальним ступенем вільності, під впливом гармонічної збуджуючої сили (пульсацій вітрового потоку або періодичних динамічних імпульсів) має вигляд:

$$\ddot{z} + \omega^2 z = a_1 \cdot \cos(k \cdot t)\,, \tag{1}$$

де z – узагальнене переміщення кінця консолі (поперек осі стріли); ω – кругова частота власних коливань системи, рад/с; k – частота зміни зовнішньої збуджуючої сили (пульсацій вітрового тиску), рад/с; a_1 – приведена амплітуда вимушених коливань, що враховує співвідношення інтенсивності вітрового імпульсу та інерційної маси системи.

Загальний розв’язок диференціального рівняння (1) записується у вигляді суми власних та вимушених гармонійних коливань:

$$z(t) = C \cdot \cos(\omega \cdot t) + B \cdot \sin(\omega \cdot t) + \frac{a_1}{\omega^2 - k^2} \cdot \cos(k \cdot t)\,. \tag{2}$$

Відповідні амплітудні значення віброамплітуди A_m, віброшвидкості (V_m) та віброприскорення (a_m), що визначають інерційні перевантаження конструкції при усталеному русі, становлять:

$$A_m = \frac{a_1}{\omega^2 - k^2}; \quad V_m = \dot{z_{max}} = \frac{a_1 \cdot k}{\omega^2 - k^2}; \quad a_m = \ddot{z_{max}} = \frac{a_1 \cdot k^2}{\omega^2 - k^2}, \tag{3}$$

Як випливає із залежностей (2) – (3), визначальним фактором динамічної стабільності суднонавантажувача є співвідношення між власною частотою коливань конструкції ω та частотою вітрових пульсацій k [4, 5]. У випадку наближення частоти поривів вітру до власної частоти стріли знаменник ($\omega^2 - k^2$) прямує до нуля, що викликає явище резонансу – лавиноподібне зростання амплітуди коливань $A_m \to \infty$ та динамічних згинальних моментів у елементах каркасу.

При розрахунку бічних коливань стріли як консольного стрижня довжиною L із власною погонною масою металоконструкцій m_0 та зосередженою на вільному кінці сумарною масою навантажувальних агрегатів $M_{кін}$ (подаюча голівка, приводи, телескопічна труба з матеріалом), перша (основна) кругова частота ω_1 та період власних коливань T_1 визначаються за класичними залежностями будівельної механіки:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{3EI_y}{L^3 \cdot (M_{\text{кін}} + 0{,}24m_0L)}}; \quad T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} = 2\pi\sqrt{\frac{L^3 \cdot (M_{\text{кін}} + 0{,}24m_0L)}{3EI_y}}, \tag{4}$$

де EI_y – згинальна жорсткість перерізу стрілової системи у горизонтальній площині.

Формула (4) наочно розкриває фізичну природу проблеми: оскільки погонна маса самої стріли входить у знаменник із малим коефіцієнтом приведення (0,24), головний внесок у інерційність системи створює саме зосереджена маса обладнання на кінці консолі $M_{кін}$, помножена на куб вильоту стріли L^3. Надмірне обтяження кінця стріли важкими сталевими конструкціями подаючої голівки та відвантажувального вузла різко зменшує власну частоту ω_1 (до значень $f_1 = \omega_1 / 2\pi < 0{,}5$ Гц) і збільшує період коливань T_1 до 2,0...2,5 с і більше [5]. Згідно з нормами проектування та дослідженнями [5, 7, 10], конструкції з періодом $T > 0{,}25$ с переходять у категорію нежорстких систем, а при $T > 2{,}0$ с потрапляють у зону максимальної енергії низькочастотних вітрових поривів [4, 5, 10].

Для кількісної верифікації теоретичних положень виконано чисельне моделювання напружено-деформованого стану та модальний аналіз типового великорозмірного суднонавантажувача кранового типу, за допомогою методу скінченних елементів у програмному комплексі «SCAD Office» згідно з рекомендаціями [5, 7]. Як розрахунковий прототип прийнято конструктивну схему пересувного портального суднонавантажувача продуктивністю 1 000 т/год, розробленого фірмою «PWH Anlagen Systeme GmbH» та збудованого у м. Південне Одеської області для перевантаження сипких хімічних речовин (рис. 1).

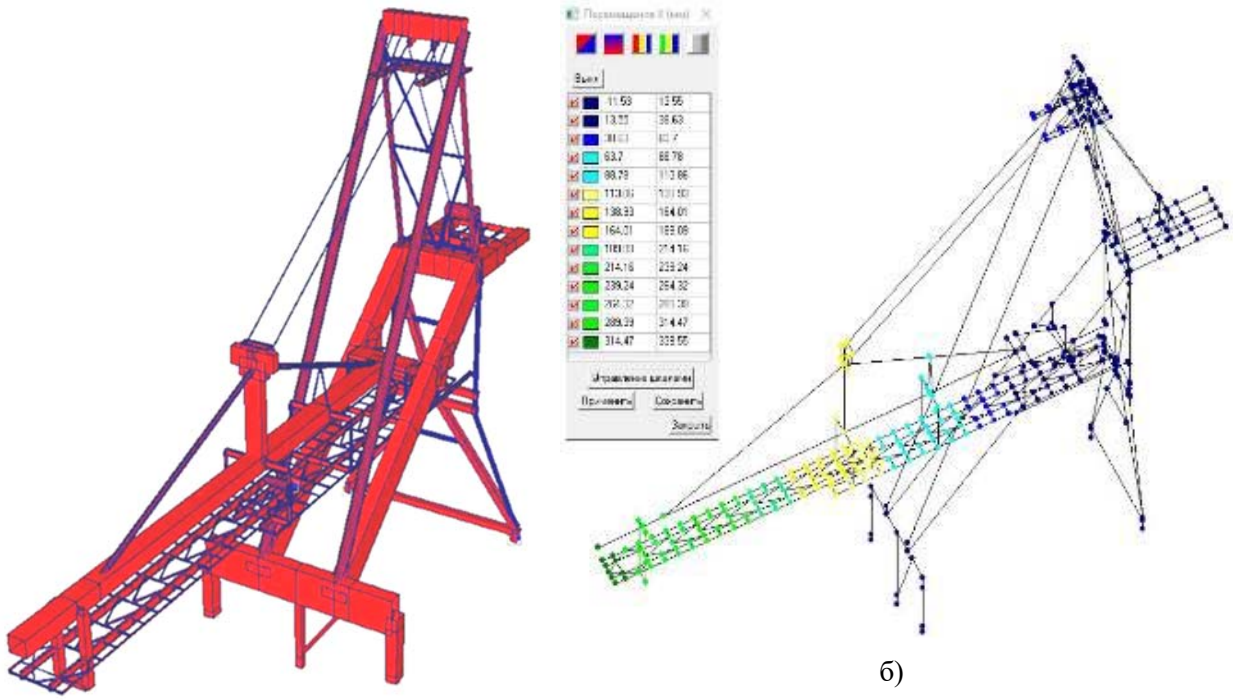


Рис. 1. Загальний вигляд суднонавантажувача № 7.0 з північного боку

На сьогодні споруда здійснює перевантаження продукції аграрної промисловості. Відомості про конструкцію споруди взяті на фірмі ТОВ «Гервін Проект» у звіті з обстеження споруди. Загальна вага будівельних конструкцій суднонавантажувача 276,2 т, клас наслідків СС2 згідно з [2], висота до осі поліспаста – 39,1 м, ширина колії – 15,0...20,2 м, загальна довжина стрілової системи з висувною частиною – 45 м),.

Просторовий каркас споруди змодельовано системою стержневих скінченних елементів, що відтворюють спільну роботу опорного порталу (ходових балок коробчастого перерізу, шарнірної гойдальної опори, похилих головних балок порталу, трубчастого пілона, просторової ферми розкосу та площадки машинного відділення) і консольного стрілового комплексу. Стріловий комплекс включає коробчасту балку стріли з центральною стійкою і трубчастими розтяжками, підвішену на С-подібних рамах просторову ферму шляху руху та висунуту на максимальний виліт подаючу голівку із приводами та підвішеним на кінці вузлом телескопічної відвантажувальної труби. Перерізи конструктивних елементів прийняті у відповідності до проектної документації розробника.

Розрахункові кліматичні впливи задано відповідно до [1] для умов морського узбережжя (характеристичний вітровий тиск W_0 = 0,49 кПа, товщина стінки ожеледі b = 24 мм). Граничне розрахункове значення вітрового тиску зібрано у відповідності до вимог нормативу [1] та рекомендацій [10]. У розрахункових сполученнях також враховано додаткову масу та збільшення навітряної площі конструкцій і канатів при їх обмерзанні (ожеледно-вітрові навантаження згідно з [9]). Скінченно-елементну модель споруди, що розроблена за рекомендаціями [4, 5], та характерні форми її просторових коливань наведено на рис. 2.



а) б)

Рис. 2. Скінченно-елементна модель суднонавантажувача кранового типу: а - тривимірне відображення, б - горизонтальні переміщення основних конструктивних елементів вздовж осі X (поперек осі стріли) від дії сполучень навантажень, включаючи вітрові

Результати проведеного амплітудно-частотного аналізу за першими 30 формами власних коливань, перші чотири з яких докладно описані у табл. 1, повністю підтверджують висунуту гіпотезу про негативний вплив перевантаження кінця стріли на динаміку споруди.

Таблиця 1 – Основні форми та частотні параметри власних коливань системи суднонавантажувача

№ форми	Кругова частота ω, рад/с	Лінійна частота f, Гц	Період коливань T, с	Характер деформування (форма власних коливань) та оцінка динамічної чутливості
1	2,6066	0,4148	2,4105	Горизонтальне відхилення консольної стріли з подаючою голівкою вліво-вправо (з площини стріли). Критичний ризик резонансу з пульсаціями вітру
2	8,2251	1,3091	0,7639	Поступально-поворотні коливання всієї рами порталу в площині «море-берег»
3	9,7111	1,5456	0,6470	Вертикальні коливання навантаженої стріли разом із подаючою голівкою (вверх-вниз)
4	10,0483	1,5992	0,6253	Бічні коливання верхньої надбудови опорного каркасу (вище машвідділення)

Аналіз даних табл. 1 та розширених даних моделювання дозволяє встановити такі закономірності:

1. Із 13 потенційно небезпечних форм коливань споруди (для яких період T > 0,25 с) 10 форм (форми 1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13), серед яких особливо небезпечними є форми 1 та 3, безпосередньо генеруються коливаннями перевантаженого стрілового комплексу та подаючої голівки. Натомість сам опорний портал є достатньо жорстким.
2. Найбільшу загрозу для конструктивної безпеки становить перша форма власних коливань, яка характеризується вкрай низькою частотою f_1 = 0,4148 Гц та великим періодом T_1 = 2,4105 с (більше ніж у 3 рази перевищує період 2-ї форми T_2 = 0,7639 с). Фізично ця форма являє собою маятникове горизонтальне розгойдування кінця стріли з висунутою подаючою голівкою та завантажувальною трубою вліво-вправо (з площини стріли). Саме ця форма вступає у резонансну взаємодію з пульсаційною складовою поривчастого бічного вітру [4, 5].
3. Крім горизонтального розгойдування, значна ексцентрична маса подаючої голівки та підвішеного каскадного конвеєра на кінці стріли зумовлює появу низькочастотних просторово-крутильних коливань стріли «гвинтом» (5-та форма з T_5 = 0,536 с та 11 – 12-та форми з T = 0,28...0,26 с) і бічного згину у вигляді півмісяця (6-та форма з T_6 = 0,464 с).
4. Коливання умовно жорстких підсистем каркасу за формами 14 - 30 (T < 0,25 с), безпечні щодо вітрового резонансу і надалі не розглядаються.

Аналіз моделі напружено-деформованого стану будівельних конструкцій суднонавантажувача за методикою норм [3] на дію основних сполучень навантажень (власна вага, вага устаткування, вітровий тиск, ожеледь та вітер при ожеледі) показав, що вітрові навантаження є визначальними і спричиняють більші внутрішні зусилля, ніж аварійні комбінації з урахуванням 6-бальної сейсміки [5]. Як видно з ізополів горизонтальних переміщень (рис. 2,б), під дією бічного вітру граничні відхилення кінця консолі сягають критичних значень більше 330 мм. При моделюванні було доведено, що елементи опорного порталу мають значний запас несучої здатності. Найбільші розрахункові коефіцієнти використання не перевищують 0,83. Однак, критичними факторами для консольних конструкцій споруди є можлива втрата стійкості плоскої форми згину під час бічного вітрового навантаження. Оскільки першопричиною низької частоти власних коливань (f_1 = 0,415 Гц) і високої чутливості суднонавантажувача до пульсацій вітру є велика зосереджена маса обладнання на кінці консолі $M_{кін}$, головним напрямком удосконалення конструкцій таких споруд під час нового проектування, реконструкції або перепрофілювання є максимальне зниження маси кінцевої частини стріли та висувних агрегатів:

1. Полегшення конструкції відвантажувальної труби (каскадного жолоба): заміна масивних сталевих листових коробів та важких металевих секцій телескопічних труб на сучасні полегшені каскадні гофровані рукави з високоміцних зносостійких полімерних/композитних матеріалів або тонкостінних спецсталей (за аналогією з передовими світовими рішеннями компаній *Bruks Siwertell* та *Bühler*). Це не лише зменшує кінцеву масу $M_{кін}$ на 30 – 50%, але й знижує аеродинамічний опір (парусність) підвішеного рукава під дією вітру.
2. Перенесення важких приводних механізмів із кінця консолей у середину споруди.
3. Оптимізація перерізів консольних конструкцій суднонавантажувачів кранового типу із застосування змінних по довжині перерізів від важких суцільнозварних листових стійок і

масивних прокатних двотаврів на кінці подаючої голівки до легких просторових ґратчастих (фермових) конструкцій із круглих або профільних труб із високоміцних сталей.

4. Зменшення ваги допоміжних конструкцій та огороджень на консольних елементах споруди, що водночас, зменшить площу суцільного навітряного контуру та ожеледні відкладення.
5. Підвищення горизонтальної (бічної) жорсткості стрілової системи (EI_y): розвинення ширини поперечного перерізу стріли у горизонтальній площині та рознесення верхніх блоків поліспаста і вузлів кріплення трубчастих розтяжок по ширині порталу (у вигляді просторового трикутника), що перетворює вертикальний підвіс на просторово-розкріплену вантово-фермову систему, здатну ефективно гасити горизонтальні коливання.
6. Дотримання режимних експлуатаційних заходів, шляхом обмеження робочих режимів споруд при вітрових впливах понад 15 м/с, що зменшить ймовірність появи невигідних сполучень кліматичних і технологічних навантажень.

Висновки

Досліджено особливості динамічної роботи будівельних конструкцій великорозмірних суднонавантажувачів кранового типу під дією вітрових навантажень. Доведено, що головною причиною виникнення небезпечних довгоперіодних коливань із малою власною частотою є конструктивне перевантаження консольного кінця стріли важкими навантажувальними агрегатами (висувною подаючою голівкою, приводами та телескопічною відвантажувальною трубою) при відносно малій згинальній жорсткості стріли з її площини, що корелює з результатми досліджень подібних споруд, наприклад [10].

За результатами скінченно-елементного моделювання у ПК «SCAD Office» встановлено, що перша (основна) форма власних коливань споруди має частоту лише $f_1 \sim 0{,}4$ Гц та період $T_1 \sim 2{,}4$ с і проявляється у горизонтальному розгойдуванні консольної стріли з подаючою голівкою вліво-вправо. Це створює високий ризик резонансної взаємодії конструкції з низькочастотною пульсаційною складовою прибережного вітру, що підтверджується значними горизонтальними переміщеннями кінця консолі (більше 330 мм) та високим рівнем напружень у балках стріли.

Обґрунтовано, що для запобігання вітровому резонансу та зниження динамічних зусиль у каркасі під час проектування і модернізації суднонавантажувачів кінцеву частину стріли необхідно виконувати максимально легкою. Зменшення зосередженої маси на кінці консолі (за рахунок використання полегшених композитних каскадних рукавів, перенесення приводів подаючої голівки ближче до порталу, застосування ґратчастих конструкцій із високоміцних сталей та легких настилів) та ваги самої консолі за рахунок перерозподілу жорсткості системи із використанням на максимальних вильотах полегшених просторових ферм, дозволяє змістити власні частоти коливань стріли у вищий діапазон, вивести споруду із зони вітрового резонансу та суттєво підвищити її експлуатаційну надійність і довговічність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об’єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. Київ : Мінбуд України, 2006. 60 с.
2. ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 37 с.
3. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Київ : Мінрегіон України, 2014. 199 с.
4. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. Київ : Сталь, 2002. 600 с.
5. Пічугін С. Ф., Махінько А. В. Надійність сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд під дією вітрових навантажень. Полтава : ACMI, 2011. 452 с.
6. Bruks Siwertell. High-capacity ship loaders for bulk handling. URL: https://bruks-siwertell.com/products/ship-loaders (дата звернення: 14.10.2026).
7. NEUERO Industrietechnik GmbH. Grain Ship Loaders: Technical Catalogue and Specifications. URL: https://pdf.nauticexpo.com/pdf/neuero-industrietechnik-gmbh/grain-ship-loader/30591-102460.html (дата звернення: 14.10.2026).

8. Bühler Group. Portaload ship loader systems. URL: https://www.buhlergroup.com/global/vi/products/portaload_ship_loadermobile.html (дата звернення: 14.10.2026).
9. MMSTACKER. Types of Ship Loading Chute for Bulk Materials. URL: https://www.mmstacker.com/blog/types-of-ship-loading-chute-for-bulk-materials.html (дата звернення: 14.10.2026).
10. Попов В.О., Курдибаха В. М., Грицун О. В. Моделювання будівельних конструкцій суднонавантажувача під дією кліматичних впливів. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. Науково-технічний збірник. Вінниця : ВНТУ, 2019. Вип. 26, № 1. С. 13–20. DOI: https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-1-13-20.

Попов Володимир Олексійович – к.т.н., доцент кафедри промислового та цивільного будівництва, Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, e-mail: v.a.popov.vntu@gmail.com. ORCID 0000-0003-2379-7764.
Федоров Олексій Віталійович – магістрант факультету будівництва, цивільної та екологічної інженерії Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, Україна, e-mail: fedorov.oleksij1408@gmail.com.

Popov Volodymyr O. – Ph.D. Assistant Professor of department of industrial and civil engineering, civil engineering, architecture and municipal economy, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia national technical university, Vinnytsia city, e-mail: v.a.popov.vntu@gmail.com. ORCID 0000-0003-2379-7764
Fedorov Oleksii V. – student of Faculty of Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia national technical university, Vinnytsia city, Ukraine, e-mail: fedorov.oleksij1408@gmail.com.