

УДК 624.03+539.3

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.290823.56.970

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАГАТОПОВЕРХОВОГО БУДИНКУ З ПОЛІМЕРБЕТОННИМ КАРКАСОМ

ГАЙДАР А. М.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
МАРТИШ О. П.², канд. техн. наук, доц.,
МАРТИШ О. О.³, канд. техн. наук, доц.,
РУЖЕНСЬКИЙ А. О.⁴, маг.

^{1*}Кафедра технології будівельного виробництва, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (096) 367-70-57, e-mail: nastuel_gaidar@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8993-1458

²Кафедра технології будівельного виробництва, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 410-42-20, e-mail: martysh.oleksandra@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6126-1920

³ Кафедра організації і управління будівництвом, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 905-86-75, e-mail: martysh.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-8864-2555

⁴ Кафедра технології будівельного виробництва, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (098) 762-60-49, e-mail: ruzhenskij@gmail.com

Анотація. *Постановка проблеми.* Актуальна проблема будівництва – це розроблення та впровадження нових типів конструкційних матеріалів із поліпшеними характеристиками: високою міцністю, стійкістю до дії агресивних середовищ, морозостійкістю тощо. Одні з таких матеріалів – полімербетони. Полімербетони можна ефективно використовувати у сучасному будівництві для виготовлення монолітних елементів конструкцій, таких як стінові панелі, плити, колони каркасних будівель. *Мета роботи* полягає у дослідженні динамічних характеристик багатоповерхового будинку з полімербетонним каркасом за дії сейсмічних навантажень. *Методика.* Динамічні розрахунки виконувались за допомогою методу скінченних елементів у програмному комплексі ЛІРА-САПР. *Наукова новизна.* Одержано нові аналітичні формули, які дозволяють наближено оцінити розміри конструктивних елементів полімербетонних будівель. Визначено, як зміни властивостей матеріалу каркаса впливають на вагу будинку, частоти власних коливань та переміщення за дії сейсмічного навантаження. *Практична значимість.* Результати роботи дозволяють виконувати проектні розрахунки, пов'язані з динамічними властивостями багатоповерхових будівель із полімербетонним каркасом. *Висновки.* Застосування полімербетонів для зведення каркасів багатоповерхових будівель дозволяє зменшити розміри поперечних перерізів конструктивних елементів, вагу та матеріаломісткість споруд.

Ключові слова: полімербетонні будівлі; динамічні характеристики; модальний аналіз; сейсмічні навантаження; зниження матеріаломісткості

STUDY OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A MULTI-STORY BUILDING WITH A POLYMER CONCRETE FRAME

HAIDAR A.M.^{1*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
MARTYSH O.P.², Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
MARTYSH O.O.³, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
RUGENSKII A.O.⁴, Master

^{1*}Department of Construction Technologies, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (096) 367-70-57, e-mail: nastuel_gaidar@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8993-1458

²Department of Construction Technologies, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (097) 410-42-20, e-mail: martysh.oleksandra@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6126-1920

³ Department of Organisation and Management in Construction, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (095) 905-86-75, e-mail: martysh.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-8864-2555

⁴ Department of Construction Technologies, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (098) 762-60-49, e-mail: ruzhenskij@gmail.com

Abstract. Formulation of the problem. An urgent problem in construction is the development and introduction of new types of structural materials with improved characteristics: high strength, resistance to aggressive environments, frost resistance, etc. One of these materials is polymer concrete. Polymer concretes can be effectively used in modern construction in the manufacture of monolithic elements of structures, such as wall panels, slabs, columns of frame buildings. **The purpose of the work** is to study the dynamic characteristics of a multi-story building with a polymer concrete frame under the action of seismic loads. **Method.** Dynamic calculations were carried out using the finite element method in the LIRA–CAD software complex. **Scientific novelty.** New analytical formulas have been obtained, which allow an approximate estimation of the dimensions of structural elements of polymer concrete buildings. It was determined how changes in the properties of the frame material affect the weight of the building, the frequency of natural oscillations and displacement under the action of seismic loading. **Practical significance.** The results of the work make it possible to perform design calculations related to the dynamic properties of multi-story buildings with a polymer concrete frame. **Conclusions.** The use of polymer concrete for the construction of frames of multi-story buildings allows to reduce the cross-sectional dimensions of structural elements, reduce the weight and material consumption of buildings.

Keywords: *polymer concrete buildings; dynamic characteristics; modal analysis; seismic loads; reduction of material intensity*

Постановка проблеми. Динамічні характеристики будівель та їх реакція на дію сейсмічних та динамічних навантажень суттєвим чином залежать від механічних властивостей матеріалу каркаса. Останніми роками розробляються нові типи конструкційних матеріалів із поліпшеними характеристиками: високою міцністю, стійкістю до дії агресивних середовищ, морозостійкістю тощо. Одними з таких матеріалів стали полімербетони [1].

Залежно від складу полімербетони характеризуються широким діапазоном показників густини та хімічної стійкості. Великий вибір в'язучих і заповнювачів, а також можливість армування дозволяють виготовляти конструкційні матеріали з різними фізичними, механічними та хімічними характеристиками для застосування в різних галузях промисловості, будівництва, сільського господарства [2–4].

Переваги полімербетонів такі: межа міцності вища, ніж у звичайного бетону, у 4–6 разів (міцність на стиск) та майже в 10 разів (міцність на розтяг); хімічна пасивність та висока стійкість до дії агресивних речовин; висока морозостійкість (витримують 300–500 циклів заморожування і відтавання, за яких зберігаються первинні фізико-механічні властивості); опір

стиранню у 10–15 разів вищий, ніж у звичайного бетону; короткий час застигання суміші; щільна і рівна поверхня; ремонтпридатність; естетичний зовнішній вигляд, різноманітність відтінків і фактур.

Основним недоліком полімербетонів вважається відносно велика вартість. Полімерні бетони можуть бути застосовані у проектних рішеннях, коли традиційні цементні бетони не дозволяють досягнути необхідних експлуатаційних характеристик. Полімербетони можна ефективно використовувати у сучасному будівництві для виготовлення монолітних елементів конструкцій, таких як стінові панелі, плити, колони каркасних будівель [5].

Типові фізико-механічні характеристики полімербетонів такі [1; 5]: густина 300...3 000 кг/м³; міцність на стиск 50...110 МПа; міцність на згин 3...11 МПа; опір стиранню 0,02...0,03 г/см²; коефіцієнт теплопровідності 0,05...0,85 Вт/(м·К); модуль Юнга 10...40 ГПа; морозостійкість F300...F500.

Наведені дані свідчать, що густина і модуль Юнга полімербетонів, які можна застосовувати для зведення каркаса будівель, приблизно дорівнюють аналогічним характеристикам цементних бетонів, тоді як міцність полімербетонів у кілька разів вища. Завдяки цьому можна

зменшити розміри поперечних перерізів конструктивних елементів, вагу та матеріаломісткість споруди.

Мета роботи – дослідити, як зміняться динамічні характеристики каркаса десятиповерхового будинку, якщо його буде виготовлено з полімербетону.

Результати досліджень.

1. *Динамічні характеристики багатоповерхового будинку із залізобетонним каркасом.* Розглянемо 2D-модель десятиповерхового будинку із залізобетонним каркасом, який складається з колон перерізом 400 х 400 мм та ригелів

перерізом 300 × 700 мм (рис. 1). Модуль Юнга матеріалу каркаса $E=32.5$ ГПа і густина $\rho=2400$ кг/м³. Вага споруди становить 1 328 кН.

За допомогою модального аналізу у програмному комплексі ПК ЛІРА-САПР визначено частоти та періоди власних коливань (табл. 1). Зазначимо, що періоди перших трьох форм власних коливань належать до діапазону переважаючих періодів сейсмічних акселерограм 0.1...2 с [6], отож є небезпека резонансу у випадку землетрусу.

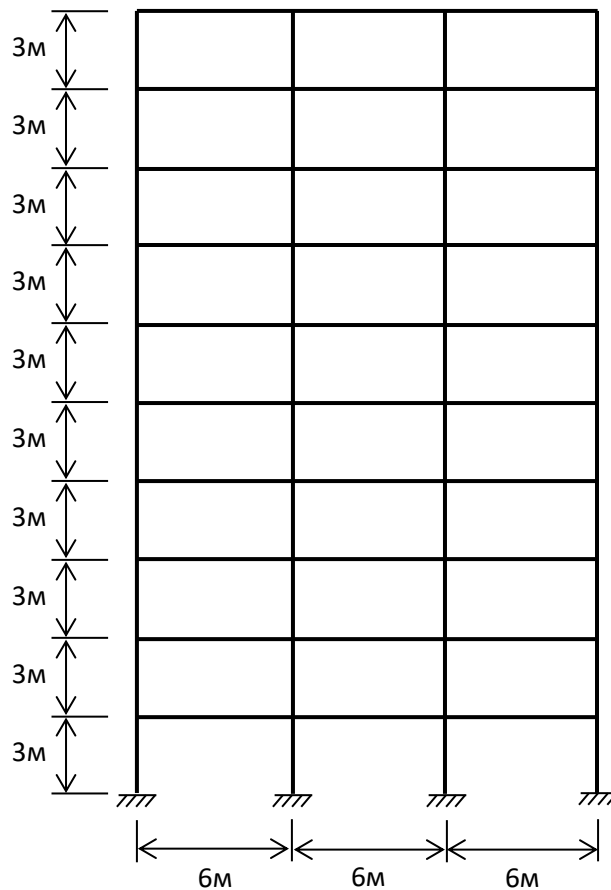


Рис. 1. Модель десятиповерхового каркасного будинку

Таблиця

Частоти та періоди власних коливань

	1 форма	2 форма	3 форма	4 форма	5 форма	6 форма
Частота f , Гц	1.75	5.28	8.99	12.6	16.3	16.5
Період T , с	0.571	0.189	0.111	0.0791	0.0613	0.0605

Розрахунок на сейсмічне навантаження виконано у ПК ЛІРА-САПР для таких

значень параметрів [6]: категорія ґрунту за сейсмічними властивостями II;

розрахункова амплітуда прискорення основи $0.4 g$ (відповідає району сейсмічності 9 балів); коефіцієнт непружної деформації $k_1 = 1$; коефіцієнт відповідальності споруди $k_2 = 1.4$; коефіцієнт поверховості $k_3 = 1.2$; коефіцієнт нелінійного деформування ґрунту $k_{гр} = 1$; напрямні косинуси сейсмічного впливу $C_x = 1$, $C_y = C_z = 0$ (розрахункові сейсмічні навантаження діють горизонтально). За результатами розрахунку максимальні горизонтальні переміщення верхнього поясу каркаса склали 176 мм.

2. *Оцінка розмірів конструктивних елементів та ваги полімербетонного будинку.* Розглянемо, як зміняться динамічні характеристики десятиповерхового будинку, якщо конструкцію каркаса буде виготовлено з полімербетону. Оцінимо зменшення поперечних розмірів елементів каркаса таким чином. Колони працюють на стиск, а ригелі – на згин. Запишемо умови міцності для колонн:

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq \sigma_{\max} \quad (1)$$

і для ригелів:

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq \sigma_{\max}, \quad (2)$$

де σ – нормальні напруження, що виникають у матеріалі; σ_{\max} – межа міцності; N – поздовжнє зусилля; M – згинальний момент; A – площа поперечного перерізу квадратних колон, $A = b_1^2$; b_1 – ширина перерізу колони; W – осьовий момент опору поперечного перерізу прямокутних ригелів, $W = b_2 b_3^2 / 6$; b_2 , b_3 – ширина та висота перерізу ригеля відповідно.

Визначимо коефіцієнт підвищення міцності η полімербетонної будівлі:

$$\eta = \frac{\sigma_{\max}^{(p)}}{\sigma_{\max}}, \quad (3)$$

де $\sigma_{\max}^{(p)}$, σ_{\max} – межі міцності полімербетону та цементного бетону відповідно.

Співвідношення (1) – (3) дозволяють обчислити поперечні розміри $b_1^{(p)}$, $b_2^{(p)}$, $b_3^{(p)}$ конструктивних елементів полімербетонної споруди, для яких одержано прості аналітичні формули:

$$b_1^{(p)} = \frac{b_1}{\eta^{1/2}}, b_2^{(p)} = \frac{b_2}{\eta^{1/3}}, b_3^{(p)} = \frac{b_3}{\eta^{1/3}}. \quad (4)$$

Таким чином, площа поперечного перерізу колон зменшиться у η разів, а ригелів – у $\eta^{2/3}$ разів. Зазначимо, що такий розрахунок має оціночний характер, оскільки не розглядаються умови стійкості колон.

На рисунку 2 наведено вагу каркаса залежно від коефіцієнта η . Одержані результати свідчать, що підвищення міцності матеріалу у 5 разів дозволяє знизити вагу будівлі у 3.4 раза. Це дозволяє знизити матеріаломісткість і вартість споруди, а також заощадити використання природних ресурсів.

3. *Динамічні характеристики десятиповерхового полімербетонного будинку.* Зменшення ваги конструкції викликає підвищення частот власних коливань. Але зі зменшенням поперечних розмірів конструктивних елементів також зменшується жорсткість споруди, що, у свою чергу, зумовлює зниження власних частот. Таким чином, ці два ефекти певною мірою компенсують дію один одного.

На рисунку 3 наведено частоти перших шести форм власних коливань полімербетонного будинку (цифрами позначено номери форм). У цілому підвищення міцності матеріалу у 5 разів і відповідне зменшення поперечних перерізів колон та ригелів спричиняють зниження значень власних частот приблизно удвічі. Зазначимо, що при цьому періоди усіх перших шести форм власних коливань потрапляють до сейсмічно небезпечного діапазону 0.1...2 с.

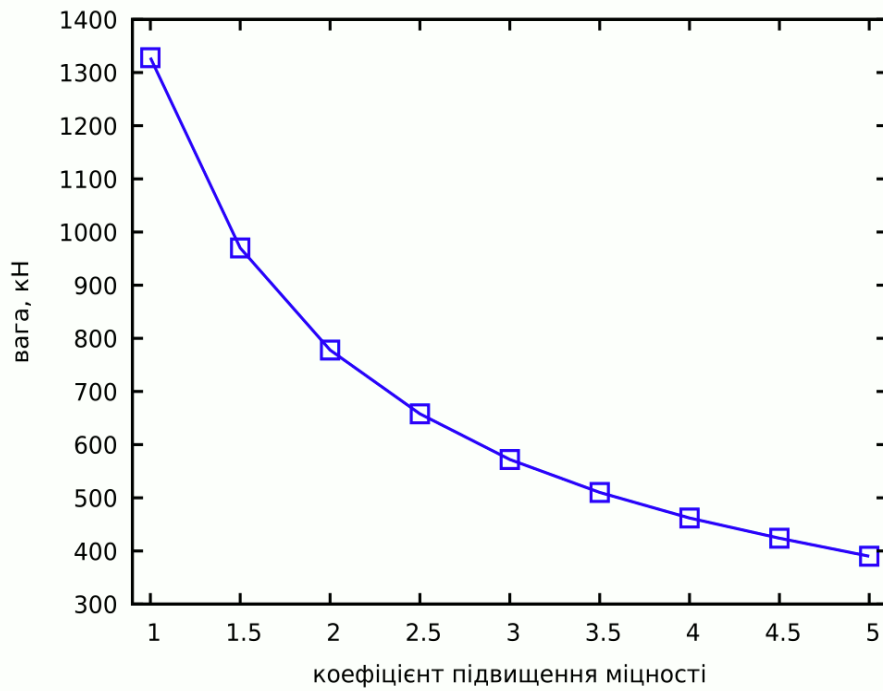


Рис. 2. Вага десятиповерхового будинку з полімербетонним каркасом

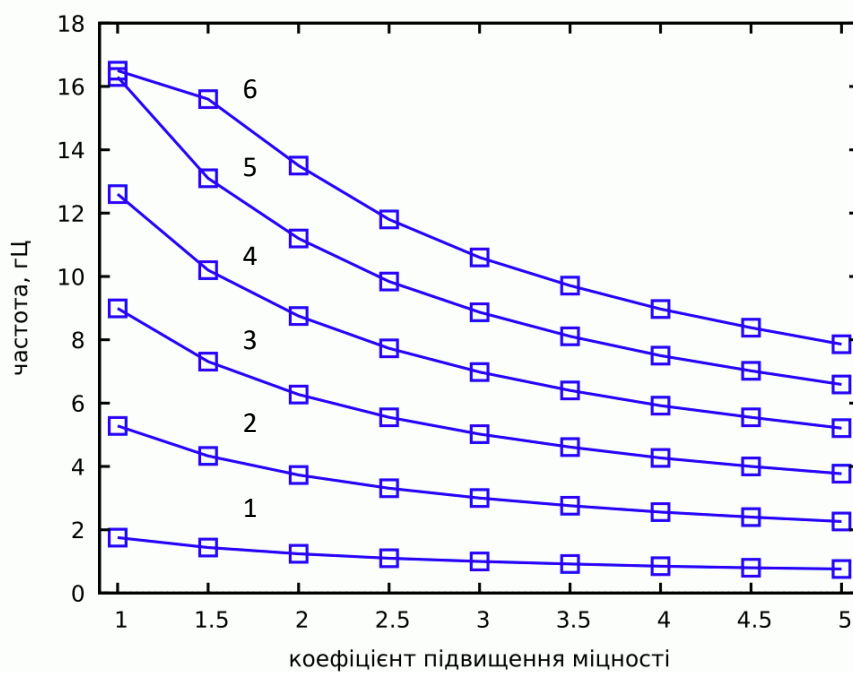


Рис. 3. Частоти власних коливань десятиповерхового будинку з полімербетонним каркасом:
1...6 – номери форм коливань

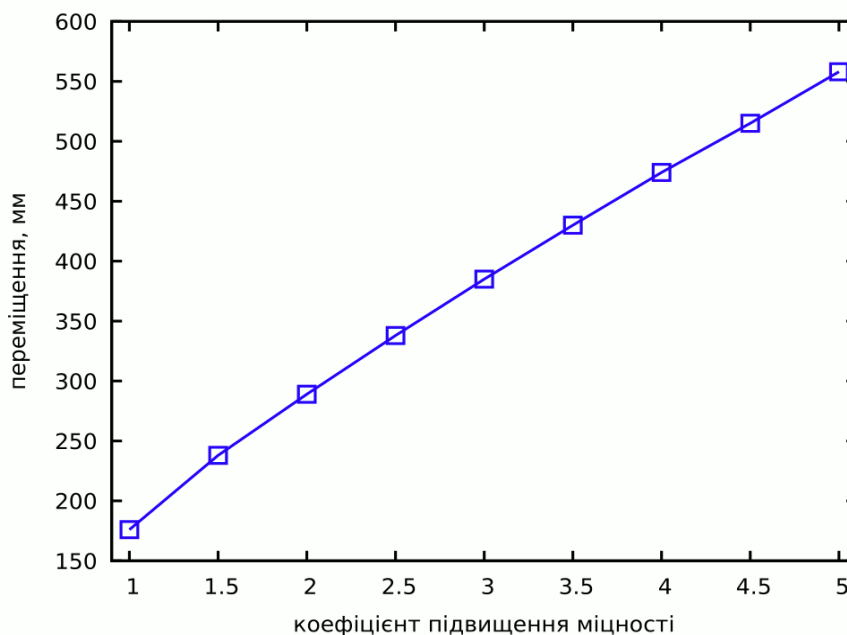


Рис. 4. Максимальні переміщення верхнього поясу полімербетонного каркаса за дії сейсмічного навантаження

Розрахунок полімербетонного будинку на сейсмічне навантаження виконано у ПК ЛІРА-САПР відповідно до значень розрахункових коефіцієнтів, наведених у пункті 1. На рисунку 4 показано максимальні горизонтальні переміщення верхнього поясу каркаса залежно від коефіцієнта підвищення міцності η . Можна зробити висновок, що дана залежність має майже лінійний характер. Компенсувати зменшення жорсткості полімербетонної будівлі за динамічних навантажень можна шляхом установлення демпферів сухого тертя [7].

Висновки

Досліджено динамічні характеристики 2D-моделі десятиповерхового каркасного будинку. Розрахунки виконувались у ПК ЛІРА-САПР. За допомогою модального аналізу визначено частоти та періоди власних коливань. Необхідно зазначити, що періоди перших трьох форм власних коливань належать до діапазону переважаючих періодів сейсмічних акселерограм 0.1...2 с, що викличе виникнення резонансів під час землетрусу.

Виконано розрахунок на сейсмічний вплив та визначено максимальні горизонтальні переміщення верхнього поясу каркаса.

Розглянуто фізико-механічні властивості полімербетонних конструкцій. Модуль пружності та густина цементних та полімерних бетонів приблизно однакові. Але при цьому міцність полімербетонів у 4–6 разів вища за міцність звичайних цементних бетонів, що дозволяє зменшити поперечні перерізи конструктивних елементів, вагу та матеріаломісткість споруди.

На основі аналізу умов міцності запропоновано нові аналітичні формули, що дозволяють наближено оцінити поперечні розміри колон та ригелів, виготовлених із полімербетону. Визначено, що підвищення міцності матеріалу у 5 разів дозволяє знизити вагу будівлі у 3.4 раза.

Досліджено динамічні характеристики десятиповерхового будинку із полімербетонним каркасом. За підвищення міцності матеріалу у 5 разів частоти власних коливань зменшуються приблизно удвічі. Зі зменшенням поперечних розмірів конструктивних елементів також зменшується жорсткість споруди.

Виконано розрахунки полімербетонної будівлі на сейсмічний вплив. Одержані числові результати свідчать, що амплітуда переміщень полегшеної полімербетонної конструкції лінійно пропорційна міцності матеріалу каркаса.

Застосування полімербетонів для зменшення жорсткості полімербетонної зведення каркасу будівель дозволяє будівлі за динамічних навантажень можна зменшити розміри поперечних перерізів конструктивних елементів, вагу та пристроїв сейсмічного захисту, наприклад, матеріаломісткість споруди. При цьому демпферів сухого тертя [7].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kim D.-H. Composite Structures for Civil and Architectural Engineering. London, New York : CRC Press, 1994. 512 p.
2. Афанасьев Н. Ф., Целуйко М. К. Добавки в бетоны и растворы. Київ : Будівельник, 1989. 110 с.
3. Березюк А. Н., Ганник Н. И., Гайдар А. Н и др. Влияние добавок поверхностно-активных веществ на химическую стойкость полимербетонов. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. Дніпропетровськ : ПДАБА, 2011. № 3. С. 38–46.
4. Berezyuk A., Gannik N., Gaidar A. Features of polymer concrete under the influence of an aggressive environment. *Theoretical Foundations of Civil Engineering*. Poland : Warsaw University of Technology, 2013. Vol. 21. Pp. 435–440.
5. Кривенко П. В., Пушкарьова К. К., Барановський В. Б., Кочевих М. О., Гасан Ю. Г., Константиновський Б. Я., Ракша В. О. Будівельне матеріалознавство. За ред. П. В. Кривенко. Київ : Ліра-К, 2015. 624 с.
6. ДБН В.1.1-12-2014. Будівництво у сейсмічних районах України. Київ : Мінрегіон України, 2014. 110 с.
7. Danishevskyy V., Savytskyi V., Gaidar A. Rational design of lightweight earthquake resistant buildings with friction dampers using the particle swarm optimization. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2678. Pp. 020005-1–020005-9.

REFERENCES

1. Kim D.-H. Composite Structures for Civil and Architectural Engineering. London, New York : CRC Press, 1994, 512 p.
2. Afanasyev N.F. and Tseluiko M.K. *Dobavki v betony i rastvory* [Additives in concrete and solutions]. Kyiv : Budivelnyk Publ., 1989, 110 p. (in Russian)
3. Berezyuk A.N., Gannik N.I., Gaidar A.N., etc. *Vliyanie dobavok poverkhnostno-aktivnykh veshchestv na khimicheskuyu stoykost' polimerbetonov* [Influence of surfactant additives on the chemical resistance of polymer concretes]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnipropetrovsk : PDABA, 2011, no. 3, pp. 38–46. (in Russian)
4. Berezyuk A., Gannik N. and Gaidar A. Features of polymer concrete under the influence of an aggressive environment. *Theoretical Foundations of Civil Engineering*. Poland : Warsaw University of Technology, 2013, vol. 21, pp. 435–440.
5. Kryvenko P.V., Pushkaryova K.K., Baranovskyi V.B., Kochevykh M.O., Hasan Y.G., Konstantinivskiy B.Ya. and Raksha V.O. *Budivel'ne materialoznavstvo. Za red. P. V. Kryvenko* [Building materials science. Edited by P.V. Kryvenko]. Kyiv : Lira-K Publ., 2015, 624 p. (in Ukrainian)
6. *DBN V.1.1-12-2014. Budivnytstvo u seysmichnykh rayonakh Ukrayiny* [DBN V.1.1-12-2014. Construction in seismic areas of Ukraine]. Kyiv : Ministry of the Region of Ukraine, 2014, 110 p. (in Ukrainian)
7. Danishevskyy V., Savytskyi V. and Gaidar A. Rational design of lightweight earthquake resistant buildings with friction dampers using the particle swarm optimization. *AIP Conference Proceedings*. 2023, vol. 2678, pp. 020005-1–020005-9.

Надійшла до редакції: 04.06.2023.