

ISSN 2313-6669

2019'2



Науково-технічний, виробничий та  
інформаційно-аналітичний журнал

[journal-niisk.com](http://journal-niisk.com)

**НАУКА**

**ТА БУДІВНИЦТВО**

**2019'2**





# НАУКА



# ТА БУДІВНИЦТВО

## 2 [20]'2019

### ЗАСНОВНИК

Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»

Свідоцтво про державну реєстрацію  
КВ № 20575-10375 Р від 24.02.2014 р.

#### Редакційна колегія:

**Голова редакційної колегії:**

Фаренюк Г.Г., д.т.н., Україна

**Головний редактор:**

Тарасюк В.Г., к.т.н., с.н.с., Україна

**Редакційна колегія:**

Балаш Г., д.т.н., проф., Угорська Республіка

Бамбура А.М., д.т.н., проф., Україна

Брандль Х., д.т.н., проф., Австрійська Республіка

Ванічек І., д.т.н., проф., Чеська Республіка

Дорофеев В.С., д.т.н., проф., Україна

Єгупов К.В., д.т.н., проф., Україна

Жарко Л.О., к.т.н., доцент, Україна

Жусупбеков А.Ж., д.т.н., проф., Республіка Казахстан

Іванченко Г.М., д.т.н., проф., Україна

Івлєва Н.П., к.е.н., с.н.с., Україна

Калюх Ю.І., д.т.н., проф., Україна

Кашченко О.В., д.т.н., проф., Україна

Кривошеєв П.І., к.т.н., проф., Україна

Лаповська С.Д., д.т.н., с.н.с., Україна

Мар'єнков М.Г., д.т.н., с.н.с., Україна

Матвєєв І.В., к.т.н., с.н.с., Україна

Немчинов Ю.І., д.т.н., проф., Україна

Слюсаренко Ю.С., к.т.н., с.н.с., Україна

Шейніч Л.О., д.т.н., проф., Україна

Шилюк П.С., к.т.н., Україна

Шокарев В.С., к.т.н., с.н.с., Україна

Виконавчий редактор: Гах Н.Д., к.т.н., Україна

Секретар: Глазкова С.В., к.т.н., Україна

Дизайнер: Чорна К.В., Україна

Затверджено до друку Науково-технічною радою ДП НДІБК (Протокол №2 від 23.05.2019 р.).

Журнал включено до переліку наукових фахових видань, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт (Затверджено наказом Міністерства освіти і науки України від 06.03.2015 р. № 261).

При передруках посилання на «Наука та будівництво» є обов'язковим. За зміст реклами відповідає рекламодавець. Редакція не завжди поділяє думку авторів.

**Адреса редакції:** вул. Преображенська, 5/2, м. Київ-37, 03037, тел.: + 38 (044) 249-38-04  
E-mail: journal@ndibk.gov.ua,  
www.journal-niisk.com

© «Наука та будівництво» 2019

**Підписано до друку: 05.06.2019**

**ТОВ «Мастеркниг»**

**Наклад 100 примірників**

## ЗМІСТ

4

**Фаренюк Г.Г., Вайнберг О.І., Хлапук М.М., Шумінський В.Д.**  
Надійність та безпека гідротехнічних споруд в умовах тривалої експлуатації

19

**Немчинов Ю.І., Мар'єнков М.Г., Калюх Ю.І., Бабік К.М., Дирда В.І.**  
Захист житлових будинків від сейсмічних навантажень та динамічних впливів залізничного транспорту

31

**Тарасюк В.Г., Жарко Л.О., Овчар В.П., Борецька Н.С.**  
До визначення міцності і класу бетону

38

**Дворкін Л.Й., Бордюженко О.М., Ковалик І.В., Марчук В.В.**  
Розрахунок складу сухої будівельної суміші за критерієм мінімальної вартості

47

**Трофимчук О.М., Гомілко О.М., Савицький О.А.**  
Вертикальний імпеданс фундаменту на шарі водонасиченого ґрунту

56

**Махінько Н.О.**  
Імовірнісне представлення коефіцієнта критичного фактору в задачах надійності будівельних конструкцій

62

**Тимофєєв М.В., Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гетманчук Г.О.**  
Розрахунок погодинної природної кратності повітрообміну та її вплив на енергопотребу будівель в динамічних сіткових моделях



# SCIENCE & CONSTRUCTION

2 (20)'2019

## FOUNDER

State enterprise «State Scientific Research Institute of Building Constructions»

Certificate of state registration

KV № 20575-10375 R dated on 24.02.2014

### Head of Editorial Board:

Farenjuk G., Dr., Ukraine

### Editor-in-chief:

Tarasyuk V., PhD, Sen. Scientist, Ukraine

### Editorial Board

Balazs G., Prof., Republic of Hungary

Bambura A., Dr., Prof., Ukraine

Brandl H., Dr., Prof., Republic of Austria

Dorofeev V., Dr., Prof., Ukraine

Yegupov K., Dr., Prof., Ukraine

Zharko L., PhD, Ass. Prof., Ukraine

Zhussupbekov A., Dr., Prof., Republic of Kazakhstan

Ivanchenko G., Dr., Prof., Ukraine

Ivleva N., PhD, Sen. Scientist, Ukraine

Kaliukh Yu., Dr., Prof., Ukraine

Kashchenko O., Dr., Prof., Ukraine

Kryvosheiev P., PhD, Prof., Ukraine

Lapovska S., Dr, Sen. Scientist, Ukraine

Maryenkov M., Dr, Sen. Scientist, Ukraine

Matveev I., PhD, Sen. Scientist, Ukraine

Nemchynov Iu., Dr, Prof., Ukraine

Slyusarenko Yu., PhD, Sen. Scientist, Ukraine

Sheinich L., Dr, Prof., Ukraine

Shiliuk P., PhD, Ukraine

Shokarev V., PhD, Sen. Scientist, Ukraine

Vanicek I., Dr, Prof., Czech Republic

Executive Editor: Gakh N., PhD, Ukraine

Secretary: Glazkova S., PhD, Ukraine

Designer: K. Chorna

Issue is approved for print by Scientific and technical Council of SE NIISK (Protocol № 2 dated on 23.05.2019)

Journal is included in List of the scientific professional issues, where the dissertation works results may be published (It is approved by order of Ministry of education and science of Ukraine, dd. 06.03.2015, № 261).

The referencing on «Science & Construction» is obligatory when reprinting. The advertiser is responsible for content of advertisement. The Editorial Board may be not agreed with authors' opinion.

### Address of Editorial Board:

5/2 Preobrazhenska str., Kyiv-37, 03037,

tel.: + 38 (044) 249-38-04

E-mail: journal@ndibk.gov.ua,

www.journal-niisk.com

© «Science & Construction», 2019

Signed for printing: 05.06.2019

Printing: TOV «Masterknig»

Drawing: 100 copy

## CONTENT

4

**Farenjuk G., Vaynberg O.,  
Khlapak N., Shuminskyi V.**

The hydraulic engineering structures reliability and safety in conditions of continuous operation

19

**Nemchynov Iu., Marienkov N., Kaliukh Iu.,  
Babik K., Dyrda V.**

Residential buildings protection against seismic loads and rail transport dynamic actions

31

**Tarasiuk V., Zharko L.,  
Ovchar V., Boretskaia N.**

The determination of concrete strength and grade

38

**Dvorkin L., Borduzhenko O.,  
Kovalyk I., Marchuk V.**

Calculation of the content of dry building mixture due to minimum-cost criterion

47

**Trofymchuk O., Homilko O.,  
Savytskyi O.**

The vertical impedance of the foundation on a water-saturated soil layer

56

**Makhinko N.**

Probabilistic representation of the critical factor coefficient in the reliability problems of structures

62

**Tymofeyev M., Deshko V.,  
Bilous I., Hetmanchuk H.**

Calculation of the natural rate of air exchange per hour and its influence on the energy needs of buildings in net dynamic models



УДК 626.8 (075.8)



**ФАРЕНЮК Г.Г.**

Д-р технічних наук, директор, ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», м. Київ, Україна, e-mail: farenyuk@ndibk.gov.ua, тел.: + 38 (044) 249-72-34, ORCID: 0000-0002-5703-3976



**ВАЙНБЕРГ О.І.**

Д-р технічних наук, заступник генерального директора, ПрАТ «Укргідропроект», м. Харків, Україна, e-mail: vaynberg@uhp.kharkov.ua, тел.: +38 (067) 573-48-08, ORCID: 0000-0002-9858-0001



**ХЛАПУК М.М.**

Д-р технічних наук, директор, Навчально-науковий інститут водного господарства та природооблаштування Національного університету водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна, e-mail: khlapuk@ukr.net, тел.: +38 (067) 362-11-15, ORCID: 0000-0001-5469-4181



**ШУМІНСЬКИЙ В.Д.**

Канд. технічних наук, провідний науковий співробітник, ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», м. Київ, Україна, e-mail: shumikvd@gmail.com, тел.: +38 (095) 040-72-07, ORCID: 0000-0001-9270-6649

## НАДІЙНІСТЬ ТА БЕЗПЕКА ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД В УМОВАХ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

### АНОТАЦІЯ

У статті розглянуто питання забезпечення надійності та безпеки гідротехнічних споруд, що знаходяться в тривалій експлуатації. Наведено загальну характеристику гідроенергетичних об'єктів України, у тому числі Дніпровського каскаду ГЕС. Показано, що важливою проблемою гідроенергетики України слід вважати розробку спеціальних заходів щодо забезпечення безпеки гідротехнічних споруд Дніпровського каскаду ГЕС, що знаходяться в тривалій експлуатації. Дано аналіз діючих в Україні нормативних документів, що регламентують вимоги та забезпечують безпеку гідротехнічних споруд. Показано, що в даний час в Україні діє низка застарілих нормативних документів щодо надійності і безпеки гідротехнічних споруд при їх проектуванні, будівництві та експлуатації. Тому необхідно невідкладно організувати роботу зі створення сучасної нормативної бази щодо проектування, будівництва та експлуатації гідротехнічних споруд. Для правового регулювання діяльності із забезпечення безпеки гідротехнічних споруд

необхідно якнайшвидше завершити розробку проекту та прийняття Закону України «Про безпеку гідротехнічних споруд». Наведено підходи щодо забезпечення безпеки гідротехнічних споруд, тривалість експлуатації яких не перевищує проектного терміну служби. Критерії безпеки і технічні стани, що застосовуються в даний час до гідротехнічних споруд, що експлуатуються, є застарілими. Тому, на основі проведення спеціальних досліджень, необхідно розробити новий сучасний нормативний акт, що регламентує підходи до визначення критеріїв безпеки та відповідних цим критеріям технічних станів гідротехнічних споруд, що експлуатуються. Дано обґрунтування підходів, що дозволяють забезпечити безпеку гідротехнічних споруд, що експлуатуються, після закінчення призначеного терміну служби.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** гідротехнічні споруди, надійність, безпека, експлуатація, гідровузол, гребля, обстеження, термін служби, технічний стан, навколишнє середовище, аварія.



## НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**ФАРЕНЮК Г.Г.** Д-р технических наук, директор, ГП «Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций», г. Киев, Украина, e-mail: farenyuk@ndibk.gov.ua, тел.: + 38 (044) 249-72-34, ORCID: 0000-0002-5703-3976

**ВАЙНБЕРГ О.И.** Д-р технических наук, заместитель генерального директора, ЧАО «Укргидропроект», г. Харьков, Украина, e-mail: vaynberg@uhp.kharkov.ua, тел.: +38 (067) 573-48-08, ORCID: 0000-0002-9858-0001

**ХЛАПУК М.М.** Д-р технических наук, директор, Учебно-научный институт водного хозяйства и природоустройства Национального университета водного хозяйства и природопользования, г. Ровно, Украина, e-mail: khlapuk@ukr.net, тел.: +38 (067) 362-11-15, ORCID: 0000-0001-5469-4181

**ШУМИНСКИЙ В.Д.** Канд. технических наук, ведущий научный сотрудник, ГП «Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций», г. Киев, Украина, e-mail: shumikvd@gmail.com, тел.: +38 (095) 040-72-07, ORCID: 0000-0001-9270-6649

### АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены вопросы обеспечения надежности и безопасности гидротехнических сооружений, находящихся в длительной эксплуатации. Приведена общая характеристика гидроэнергетических объектов Украины, в том числе, Днепровского каскада ГЭС. Показано, что важной проблемой гидроэнергетики Украины следует считать разработку специальных мероприятий по обеспечению безопасности гидротехнических сооружений Днепровского каскада ГЭС, находящейся в длительной эксплуатации. Дан анализ действующих в Украине нормативных документов, регламентирующих требования, обеспечивающие безопасность гидротехнических сооружений. Показано, что в настоящее время в Украине действует ряд устаревших нормативных документов, регламентирующих требования, обеспечивающие надежность и безопасность гидротехнических сооружений при их проектировании, строительстве и эксплуатации. Поэтому необходимо в ближайшее время организовать работу по созданию современной нормативной базы для проектирования, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений. Для правового регулирования деятельности по обеспечению безо-

пасности гидротехнических сооружений представляется необходимым организовать работу по скорейшему завершению разработки проекта и принятию Закона Украины «Про безопасность гидротехнических сооружений». Приведены применяемые в мире, а также регламентированные действующими нормами в Украине подходы, обеспечивающие безопасность гидротехнических сооружений, продолжительность эксплуатации которых не превышает проектного срока службы. Показано, что используемые в настоящее время критерии безопасности и техническое состояние этих эксплуатируемых гидротехнических сооружений являются устаревшими. Поэтому, на основе проведения специальных исследований необходимо разработать новый современный нормативный акт, регламентирующий подходы к определению критериев безопасности и соответствующих этим критериям технических состояний эксплуатируемых гидротехнических сооружений. Дано обоснование подходов, позволяющих обеспечить безопасность эксплуатируемых гидротехнических сооружений после окончания назначенного срока службы.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** гидротехнические сооружения, надежность, безопасность, эксплуатация, гидроузел, плотина, обследование, срок службы, техническое состояние, окружающая среда, авария.

## THE HYDRAULIC ENGINEERING STRUCTURES RELIABILITY AND SAFETY IN CONDITIONS OF CONTINUOUS OPERATION

**FARENYUK G.G.** Dr., Director, State Enterprise «The State Research Institute of Building Constructions», Kyiv, Ukraine, e-mail: farenyuk@ndibk.gov.ua, tel.: +38 (097) 645-38-70, ORCID: 0000-0002-5591-1827

**VAYNBERG O.I.** Dr., Deputy Director General, PJSC «Ukrhydroprojekt», Kharkiv, Ukraine, e-mail: vaynberg@uhp.kharkov.ua, tel.: +38 (067) 573-48-08, ORCID: 0000-0002-9858-0001

**KHLAPUK N.M.** Dr., Director, Educational and Scientific Institute of Water Management and Environmental Engineering, National University of Water and Environmental Engineering (NUWEE), Rivne, Ukraine, e-mail: khlapuk@ukr.net, tel.: +38 (067) 362-11-15, ORCID: 0000-0001-5469-4181

**SHUMINSKYI V.D.** PhD, Ass. Prof., Lead Researcher, State Enterprise «The State Research Institute of Building Constructions», Kyiv, Ukraine, e-mail: shumikvd@gmail.com, tel.: +38 (095) 040-72-07, ORCID: 0000-0001-9270-6649



## ABSTRACT

The paper deals with the issues of ensuring the reliability and safety of hydraulic structures (HS) that are in a long-term operation. The main differences between the hydraulic and other engineering structures are caused by the constant mechanical, physical, chemical and biological water effects on them. An important factor is the HS individuality associated with the uniqueness of hydrological, topographic, engineering-geological and other natural conditions, in which the HS is built, as well as the fact that the hydraulic structures are massive and have significant dimensions.

The general characteristic of hydropower structures of Ukraine, including the Dniproviski hydroelectric power chain, is given. It is shown that the special measures development to ensure the safety of the Dniproviski hydroelectric power chain hydraulic structures, which are in long-term operation, should be considered as an important task. The analysis of the existing regulations of Ukraine that govern the requirements and ensure the HS safety is presented. It is shown that currently in Ukraine a number of outdated regulations govern the requirements to the HS reliability and safety ensuring during their design, construction and operation. Therefore, it seems necessary to organize in the near future a work on the modern regulatory framework creation for the HS design, construction and operation. For legal regulation of activities on the HS safety ensuring it is necessary to complete as quickly as possible the draft «Law of Ukraine on the hydraulic structures safety» and adopt it. The approaches, which are used in the world or regulated by the current standards of Ukraine, to ensuring the HS safety during the service life not exceeding the prescribed life span, are presented. It is shown that the safety criteria and technical conditions currently applied for such in-service HS are outdated. Therefore, it is necessary to develop on the basis of special studies a new modern regulatory document that should govern the approaches to the determination of safety criteria and operated HS technical conditions corresponding to those criteria. The substantiation of the approaches, which should allow ensuring the operated HS safety after the prescribed life span expiration, is given.

Given the energy importance of the Dniproviski hydroelectric power chain, its high environmental and social responsibility, as well as the long-term operation, it is necessary to develop the special measures to ensure the entire chain HS reliability and safety. The most long-term operated Dniproviski chain hydraulic structures should be considered as the priority projects.

**KEY WORDS:** hydraulic structures, reliability, safety, operation, hydroelectric, dam, inspection, life span, technical condition, environment, accident.

## ВСТУП

Гідротехнічні споруди (далі – ГТС) є широко поширеними складними інженерними об'єктами і відомі з давніх часів. Економічна, екологічна та

соціальна відповідальність цих об'єктів надзвичайно висока. Тому питанням надійності і безпеки ГТС у всьому світі приділяється значна увага. Згідно діючих в Україні норм проектування [1, 2] ГТС розглядаються як потенційно небезпечні об'єкти, надійність і безпека яких повинні бути забезпечені в період будівництва, експлуатації, а також під час консервації та ліквідації цих споруд.

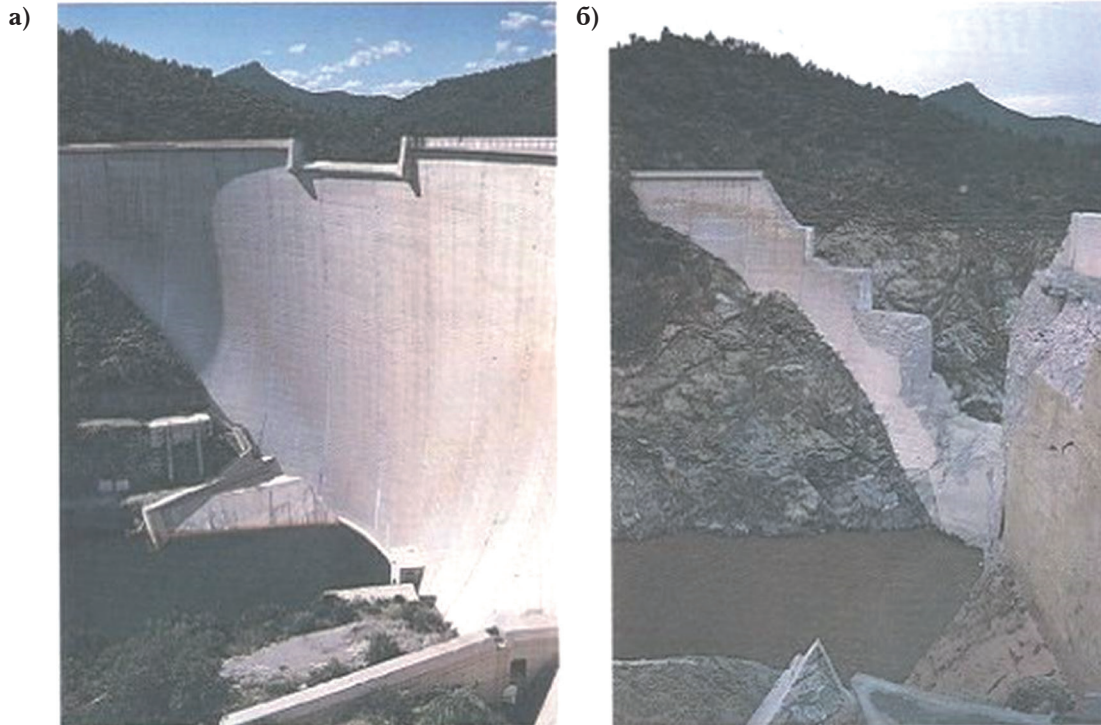
У статті прийнято наступні визначення понять «надійність» і «безпека», що, зазвичай, використовуються у гідротехніці. Надійність – це інтегральна властивість технічного об'єкта, що характеризує його здатність виконувати необхідні функції при встановлених режимах і умовах експлуатації, технічного обслуговування і ремонту протягом заданого періоду часу. Безпека – це властивість технічного об'єкта не завдавати шкоди життю і здоров'ю людей, а також навколишньому середовищу. Тому, зазвичай, розглядаються соціальна та екологічна безпеки гідротехнічних об'єктів. Безпека часто трактується як надійність по відношенню до життя і здоров'я людей, навколишнього середовища. Безпека ГТС істотно залежить від їх надійності, але не завжди визначається тільки нею.

Основні відмінності ГТС від інших інженерних споруд пов'язані з механічним, фізико-хімічним і біологічним впливом води на ГТС. Важливим фактором є індивідуальність ГТС, що визначається унікальністю гідрологічних, топографічних, інженерно-геологічних та інших природних умов, в яких зводяться ГТС, а також тим, що конструкції ГТС відрізняються масивністю і значними розмірами.

Перші згадки про будівництво і використання ГТС для водопостачання населення міст, зрошення земель, захисту від повеней пов'язані ще з шумерською цивілізацією, що існувала за 4000 років до н.е. Серед ГТС, що збереглися до нашого часу з давніх часів, гребля Кофіні, висотою 10 м в Греції, що за 3300 років служби пережила повені та землетруси і на даний час знаходиться у робочому стані. Досі успішно експлуатуються дві великі греблі в Іспанії, побудовані у другому столітті нашої ери до часів Римської імперії – гребля Прозерпіна висотою 21,4 м і гребля Корналбо висотою 24 м з шахтним водоскидом.

За даними Міжнародної комісії з великих гребель (ICOLD), зараз у світі експлуатуються більше 45 000 високих гребель (крім споруд Китаю) висотою більше 15 метрів або з водосховищами обсягом не менш 1 млн м<sup>3</sup>. Загальна кількість всіх гребель, що було побудовано на нашій планеті, за деякими оцінками перевищує 800 000. В Україні налічується понад 1150 гребель різної висоти, серед яких найбільш відповідальними і потенційно небезпечними спорудами є високі греблі, що входять до складу гідроенергетичних вузлів.

За останні 70 років у світі сталося понад 1000 аварій на великих ГТС (рис. 1-5). Найбільш



**Рис. 1.** Аркова гребля Мальпасе (Франція), висота 66 м: до аварії (а) та після аварії (б) у 1959 р., в якій загинуло 412 осіб



**Рис. 2.** Аварія на греблі Баньцяо, (Китай), 1975 р., висота греблі 118 м, загинуло біля 26 тис. людей, 145 тис. померло внаслідок голоду й епідемії, зруйновано 5 960 000 будинків, постраждало майже 11 млн. осіб

небезпечною аварією на ГТС є гідродинамічна аварія, ознакою якої є поширення з великою швидкістю значних мас води, що створює загрозу виникнення техногенної надзвичайної ситуації. Гідродинамічна аварія може виникнути під час руйнування гребель, дамб, шлюзів, затворів, розгерметизації напірних трактів, при зсувах

і обвалах у водосховищах (рис. 6), аварійному спрацюванні водосховищ тощо. При виникненні гідродинамічної аварії утворюється хвиля прориву, що може призвести до затоплення значних територій та великих людських та економічних втрат, тому забезпеченню надійності і безпеки ГТС слід приділяти особливу увагу.



**Рис. 3.** Руйнування греблі Тетон (США) в 1976 р., висота 93 м, загинуло 11 осіб.



**Рис. 4.** Аварія на греблі Шіх Канг під час землетрусу, (Тайвань), висота 25 м, 1999 р.





**Рис. 5.** Верховий басейн ГАЕС Таум Саук (США, 2005 р.): до аварії (а) та після (б)



**Рис. 6.** Вид на греблю Вайонт, (Італія), висота 262 м, до аварії (а) та після аварії (б) у 1963 р., загинуло майже 3000 осіб



**МЕТА РОБОТИ.** Розробка підходів, що дозволяють забезпечити надійність і безпеку ГТС, що знаходяться в тривалій експлуатації.

**МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.** Аналіз сучасної нормативної бази і технічного стану найбільш важливих і відповідальних ГТС України, що знаходяться в тривалій експлуатації.

### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ГІДРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ УКРАЇНИ

Гідроенергетика України представлена Дніпровським каскадом гідроелектростанцій (далі – ГЕС), потужність якого становить 3920 МВт, Дністрівським каскадом ГЕС потужністю 744 МВт та діючими малими ГЕС, загальна потужність яких близько 100 МВт.

Серед цих гідроенергетичних об'єктів найбільше значення має Дніпровський каскад ГЕС, до складу якого входять шість гідроелектростанцій –

Київська, Канівська, Кременчуцька, Середньодніпровська, Дніпровська та Каховська, що побудовано в період з 1932 р. по 1972 р. Загальні дані про ГЕС Дніпровського каскаду наведено в табл. 1. Будівництво Дніпровської ГЕС-2 (закінчено в 1978 р.) дозволило значно збільшити потужність ГЕС і середньорічне вироблення електроенергії.

Будівництво гідроелектростанцій Дніпровського каскаду дозволило забезпечити вироблення екологічно чистої пікової електроенергії, що створює сприятливі умови роботи енергосистеми України. В даний час здійснюється реконструкція ГЕС Дніпровського каскаду, що дозволить підвищити надійність і безпеку основних споруд ГЕС каскаду, а також підвищити енергетичні характеристики. Дані про встановлену потужність і середньорічне вироблення цих ГЕС до і після реконструкції наведено в табл. 2. В результаті реконструкції сумарна встановле-

Таблиця 1. Загальні дані про ГЕС Дніпровського каскаду

ГЕС	Рік введення ГЕС в експлуатацію			Максимальний напір на ГЕС, м	Витрата води через агрегати, м <sup>3</sup> /с
	Першого агрегату	Останнього агрегату	Водосховища		
Київська	1964	1968	1965	11,8	5800
Канівська	1972	1975	1974	13,5	7550
Кременчуцька	1959	1960	1961	13,6	5700
Середньодніпровська	1963	1964	1964	15,26	4400
Дніпровська ГЕС-1	1932	1932	1932	38,2	2150
Дніпровська ГЕС-2	1978	1978			2860
Каховська	1955	1956	1956	16,5	5700

Таблиця 2. Енергетичні характеристики ГЕС Дніпровського каскаду

ГЕС	Кількість агрегатів	Встановлена потужність, МВт		Середнє багаторічне вироблення, млн кВт·год/ рік	
		до реконструкції	після реконструкції	до реконструкції	після реконструкції
Київська	20	361	440	688	709
Канівська	24	444	528	916	945
Кременчуцька	12	625	682,8	1495	1516
Середньодніпровська	8	352	387	1159	1232
Дніпровська ГЕС-1	9	585	648	1534	1634
Дніпровська ГЕС-2	8	876,6	900	2209	2271
Каховська	6	300	334,8	1254	1295



на потужність ГЕС Дніпровського каскаду буде підвищена на 187 МВт, а середнє багаторічне вироблення цих станцій збільшиться на 347 ГВт·год.

Водосховища Дніпровського каскаду ГЕС, сумарний корисний об'єм яких становить 21,15 км<sup>3</sup>, забезпечують необхідний судноплавний шлях по всій довжині р. Дніпро. Крім того, ці водосховища використовуються для водопостачання, зрошення та іригації великих районів України.

Інженерно-геологічні умови майданчиків розміщення гідровузлів Дніпровського каскаду ГЕС різні. Основні споруди Кременчуцької і Дніпровської ГЕС розташовано на скельних ґрунтах, а всіх інших електростанцій – на нескельних ґрунтах, що мають порівняно низькі міцнісні характеристики.

До складу гідровузлів Дніпровського каскаду ГЕС входять ГТС різних типів: водозливні і глухі бетонні греблі, руслові залізобетонні будівлі ГЕС, у тому числі поєднані з паводковими водоскидами, земляні греблі, судноплавні шлюзи різних типів. В табл. 3 наведено дані про склад основних споруд гідровузлів Дніпровського каскаду ГЕС.

В даний час експлуатація ГТС, що входять до складу гідровузлів Дніпровського каскаду ГЕС, здійснюється власником цих гідровузлів – ПрАТ «Укргідроенерго». Забезпечення надійності та безпеки цих споруд здійснюється на основі оцінки їх технічного стану шляхом аналізу результатів

візуальних обстежень і натурних інструментальних спостережень.

Слід зазначити, що, незважаючи на велику тривалість експлуатації, до теперішнього часу не було скільки-небудь значної аварії на ГТС гідровузлів Дніпровського каскаду ГЕС. Ця обставина дозволяє вважати достатніми на даний час надійність і безпеку цих споруд.

Наведений вище аналіз енергетичної значущості Дніпровського каскаду ГЕС і його високої екологічної та соціальної відповідальності, розходження природних умов, в яких зведені гідровузли каскаду, велика різноманітність конструкцій ГТС, що входять в гідровузли, а також значна тривалість експлуатації (від 47 до 87 років) дозволяють зробити висновок про те, що пріоритетним завданням для гідроенергетики України є розробка спеціальних заходів щодо забезпечення надійності безпеки цих споруд. При цьому Дніпровську ГЕС, що має найбільший термін експлуатації, слід розглядати як першочерговий об'єкт. Нормативні документи, що регламентують вимоги щодо забезпечення безпеки ГТС, як і інших будівельних конструкцій, повинні відповідати вимогам, які ставляться до них законодавством України та чинними нормативними актами в галузі будівництва, в тому числі гідротехнічного будівництва [1-3]. Ці споруди повинні сприймати навантаження і впливи, склад і значення яких визначаються згідно з ДБН В.1.2-2 [4].

Таблиця 3. Склад основних споруд гідровузлів Дніпровського каскаду ГЕС

ГЕС	Склад основних споруд ГЕС
Київська	Будівля ГЕС, поєднана з поверхневим водоскидом, із стоянами і монтажним майданчиком; земляна гребля і дамба; однокамерний судноплавний шлюз
Канівська	Будівля ГЕС, поєднана з поверхневими водоскидами, із стоянами і монтажним майданчиком; земляна гребля; судноплавний однокамерний шлюз
Кременчуцька	Будівля ГЕС із стоянами та монтажним майданчиком; водозливна гребля із стоянами, земляні греблі; судноплавний однокамерний шлюз; безнапірна дамба; берегоукріплювальні споруди Табуріщенського мису
Средньодніпровська	Будівля ГЕС із стоянами і монтажним майданчиком; водозливна гребля із стоянами, земляні греблі, судноплавний шлюз; Орельська захисна дамба
Дніпровська	Будівля ГЕС-1; будівля ГЕС-2; бетонна водозливна гребля; щитова стінка; глуха гравітаційна гребля, однокамерний і трикамерний судноплавні шлюзи
Каховська	Будівля ГЕС суміщеного типу з донними водоскидами із стоянами і монтажним майданчиком; водозливна гребля із стоянами; земляна гребля; судноплавний шлюз; водозабірні споруди Північно-Кримського зрошувального каналу



Основні принципи, яких необхідно дотримуватися для забезпечення соціальної та екологічної безпеки будівельних конструкцій, будівель і споруд, визначено в [5]. Вимоги, що забезпечують основні аспекти безпеки, викладено в наступних нормативних актах:

- забезпечення механічного опору і стійкості згідно з ДБН В.1.2-6 [6];
- забезпечення пожежної безпеки згідно з ДБН В.1.1-7 [7] та ДБН В.1.2-7 [8];
- забезпечення техногенної безпеки та інженерно-технічних заходів цивільного захисту (цивільної оборони) згідно з ДБН В.1.2-4 [9];
- забезпечення безпеки життя і здоров'я людини та захисту навколишнього середовища згідно з ДБН В.1.2-8 [10], ДБН А.2.2-1 [11], ДСТУ Б А.2.2-7 [12];
- забезпечення безпеки експлуатації з виключенням ризиків нещасних випадків згідно з ДБН В.1.2-9 [13];
- забезпечення захисту від шуму згідно з ДБН В.1.2-10 [14];
- забезпечення економії електроенергії та водних ресурсів згідно з ДБН В.1.2-11 [15];
- забезпечення сейсмостійкості будівельних конструкцій і споруд згідно з ДБН В.1.2-11 [16].

Для врахування особливостей конструкцій та умов роботи ГТС, крім перерахованих вище ДБН та ДСТУ, слід користуватися додатковими нормативними документами щодо проектування, будівництва і експлуатації.

В Україні найбільш загальним документом, що використовується при проектуванні, будівництві та експлуатації ГТС, є ДБН В.2.4-3 [3]. Поряд з цим документом використовуються будівельні норми і правила (СНиП): СНиП 2.02.02-85 [17], СНиП 2.06.04-82\* [18], СНиП 2.06.06-85 [19], СНиП 2.06.07-87 [20], СНиП 2.06.08-87 [21], СНиП 2.06.09-84 [22]. Перераховані будівельні норми і правила, що були прийняті в 80-і роки минулого століття, значною мірою застаріли та суперечать чинним в Україні правовим і нормативним документам.

Два нормативних акта, що стосуються ГТС: ДБН В.2.4-20:2014 «Греблі з ґрунтових матеріалів. Основні положення» і ДБН В. 2.4-8:2014 «Визначення розрахункових гідрологічних характеристик», не введено в дію.

Викладені обставини дозволяють зробити висновок щодо необхідності найближчим часом організувати роботу зі створення сучасної нормативної бази, що дозволить забезпечити безпеку ГТС під час їх проектування, будівництва та експлуатації.

Згідно ДБН В.2.4-3 [3] ГТС поділяються на такі класи наслідків (відповідальності) залежно від соціально-економічної відповідальності та наслідків можливих аварій: СС3, СС2-1, СС2-2,

СС1. Найбільш безпечними є споруди класу СС3, найменш безпечними – класу СС1.

Для оцінки надійності і безпеки ГТС, згідно з нормами проектування, слід використовувати метод граничних станів. Відповідно до цього методу необхідно, щоб умова недопущення граничних станів забезпечувалася на всіх етапах будівництва та експлуатації, в тому числі і в кінці обґрунтованого призначення терміну служби споруд. Призначені терміни служби основних ГТС повинні бути не менше розрахункових термінів служби, що приймаються рівними 100 років для споруд класів наслідків (відповідальності) СС3, СС2-1 і рівними 50 років для споруд класів СС2-2 та СС1 [3].

При виконанні розрахунків за методом граничних станів [3] необхідно приймати значення нормативних коефіцієнтів залежно від класу споруди, його типу, розрахункового сполучення навантажень і впливів, матеріалу споруди, виду ґрунтів основи та інших факторів.

Норми проектування допускають виконання розрахунків надійності і безпеки ГТС імовірнісними методами. В результаті таких розрахунків повинна бути отримана розрахункова щорічна ймовірність виникнення аварії на споруді. Ця розрахункова ймовірність для напірних ГТС [3] не повинна перевищувати допустиме значення щорічної ймовірності, що приймається в залежності від класу наслідків (відповідальності) споруд: для СС3 –  $5 \cdot 10^{-5}$  1/рік; для СС2-1 –  $5 \cdot 10^{-4}$  1/рік; для СС2-2 –  $3 \cdot 10^{-3}$  1/рік; для СС1 –  $6 \cdot 10^{-3}$  1/рік.

ГТС класів наслідків (відповідальності) СС3, СС2-1 практично завжди є унікальними об'єктами, що вимагають особливої уваги. Під час проектування, будівництва та експлуатації таких об'єктів необхідно проводити науково-технічний супровід згідно ДБН В. 1.2-5 [23] та науково-технічний моніторинг згідно з ДСТУ-Н Б В.1.2-17 [24].

### **СУЧАСНІ ПІДХОДИ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ І БЕЗПЕКИ ГТС, ЩО ЕКСПЛУАТУЮТЬСЯ**

У європейських країнах та високорозвинених країнах Північної Америки для забезпечення експлуатаційної безпеки ГТС використано підходи, що забезпечують надійність і безпеку ГТС з тривалістю експлуатації не більшою призначеного терміну служби, що засновано на наступних принципах.

1. Вважається, що на початок експлуатації споруди є безпечними, оскільки при проектуванні і будівництві гідровузлів було виконано всі вимоги норм проектування і провадження робіт, а також чинного в країні законодавства. Відповідальність за дотримання цих вимог несуть власник споруди та будівельні організації. Контроль за дотриманням цих вимог здійснюється відповідною державною службою нагля-



ду, наприклад, службою генерального інспектора з безпеки ГТС.

2. Вважається, що перед початком експлуатації на спорудах встановлена і нормально функціонує контрольно-вимірвальна апаратура (далі – КВА), що дозволяє здійснювати контроль стану споруд. Склад і обсяг КВА, методи вимірювань визначаються проектною організацією із залученням в необхідних випадках науково-дослідних і спеціалізованих організацій.
3. До початку експлуатації гідровузлів повинні бути розроблені необхідні інструкції з експлуатації, що визначають дії персоналу у всіх можливих ситуаціях, що можуть виникнути на гідровузлі. Склад і зміст інструкцій з експлуатації розробляються проектною організацією у співпраці з експлуатуючою організацією. У необхідних випадках залучаються спеціалізовані організації. Відповідальність за розробку і впровадження інструкцій з експлуатації несуть власник і експлуатуюча організація. Контроль складу та змісту інструкцій з експлуатації здійснюється державною службою нагляду.
4. Власником споруд і організацією, що їх експлуатує, повинна бути забезпечена досить висока кваліфікація експлуатаційного персоналу. Контроль рівня кваліфікації експлуатаційного персоналу здійснюється державною службою нагляду. Вважається, що при дотриманні інструкцій з експлуатації висококваліфікованим експлуатаційним персоналом буде забезпечена безпечна експлуатація гідротехнічних споруд у звичайних умовах. Крім того, власник споруд та експлуатуюча організація з періодичністю зазвичай 5 років організують комплексне обстеження споруд з обов'язковим залученням державної служби нагляду. Таке ж комплексне обстеження обов'язково організовується після надзвичайних ситуацій, таких як великі повені і сильні землетруси. У результаті таких обстежень виявляються відхилення від проектних умов роботи, у разі необхідності, намічаються заходи щодо приведення споруд до проектного стану, надається дозвіл на подальшу експлуатацію протягом наступних 5 років. В Україні в значній мірі застосовуються перераховані вище принципи, що забезпечує безпечну експлуатацію ГТС протягом визначеного терміну служби.

Практично у всіх розвинених країнах прийнято закон «Про безпеку гідротехнічних споруд», що пов'язано з надзвичайно високою економічною, екологічною та соціальною відповідальністю ГТС. В Україні досі не прийнято відповідного закону, хоча розробка законопроекту ведеться вже досить тривалий час. Такий закон дозволив би забезпе-

чити регулювання правових відносин, що виникають при здійсненні діяльності щодо забезпечення безпеки ГТС на всіх етапах їх життя, включаючи проектування, будівництво, експлуатацію, консервацію і ліквідацію. Закон міг би встановити обов'язки органів державної влади, власників та експлуатуючих організацій із забезпечення безпеки гідротехнічних споруд. Тому видається необхідним організувати роботу щодо якнайшвидшого завершення розробки проекту закону та його прийняття.

### **ЧИННІ В УКРАЇНІ НОРМАТИВНІ ДОКУМЕНТИ І АКТИ, ЩО РЕГУЛЮЮТЬ ПИТАННЯ НАДІЙНОСТІ І БЕЗПЕКИ ГТС, ЩО ЕКСПЛУАТУЮТЬСЯ**

Відповідно до викладених вище принципів для ГТС, тривалість експлуатації яких не перевищує призначеного терміну служби, Міністерством енергетики та вугільної промисловості України прийнято Галузевий керівний документ ГДК 34.03.106 [25]. Цей документ визначає завдання, функції та структуру галузевої системи нагляду за безпекою ГТС і гідромеханічного обладнання електростанцій України (гідралічних, гідроакумуючих, атомних і теплових), що експлуатуються чи будуються. Основним завданням галузевої системи нагляду є розробка і контроль виконання заходів, що забезпечують надійність і безпеку ГТС відповідно до діючих правил і норм проектування, будівництва та експлуатації цих споруд.

Згідно ГДК 34.03.106 [25] нагляд за безпекою ГТС повинен здійснюватися експлуатаційним персоналом енергокомпаній – власником цих споруд. Такий нагляд повинен здійснюватися згідно з вимогами діючих в енергокомпанії інструкцій з експлуатації і передбачати:

- систематичні огляди, обстеження та спостереження гідротехнічних споруд;
- контроль стану і роботи ГТС шляхом проведення систематичних інструментальних спостережень за допомогою вимірвальної техніки, діагностування стану споруд;
- контроль відповідності ГТС проектним рішенням, вимогам діючих норм і правил будівництва, а також експлуатації;
- своєчасне виявлення порушень в роботі ГТС і розробку заходів щодо їх усунення;
- своєчасне виконання ремонтних і реконструкційних заходів, що забезпечують безпечний стан і роботу споруд;
- підготовку та атестацію персоналу, що експлуатує ГТС, контроль дій персоналу.

Оцінка стану та працездатності ГТС здійснюється за результатами:

- комплексних випробувань під час початкового встановлення споруди під навантаження (напір);
- поточного контролю експлуатаційним персоналом шляхом обходів і оглядів, візуальних спо-



стережень та інструментальних спостережень з використанням КВА;

- централізованих обстежень спеціалізованими комісіями;
- цільовими випробуваннями та дослідженнями, що можуть проводитися експлуатаційним персоналом станції, а також із залученням спеціалізованих організацій.

Централізовані обстеження ГТС ГЕС, ГАЕС і ТЕС проводяться спеціалізованими комісіями регулярно, зазвичай кожні 5 років, відповідно до графіків, затверджених Міненергівугілля. До складу цих комісій входять представники наступних організацій: Міненергівугілля, енергокомпанії – власника електростанції, наглядових органів – підприємства ВАТ «ЛьвівОРГРЕС» та Державної інспекції з експлуатації електричних станцій і мереж, генерального проектувальника ГТС і гідромеханічного обладнання, генерального підрядника з будівництва, провідної науково-дослідної організації.

Робота комісії з організації та проведення централізованого обстеження регламентується галузевим керівним документом ГДК 34.21.342 [26].

За результатами централізованого обстеження складається акт, в якому надається оцінка стану ГТС і гідромеханічного обладнання електростанції, робляться висновки щодо можливості їх подальшої експлуатації, пропонуються конкретні заходи щодо забезпечення надійності і безпеки ГТС і гідромеханічного обладнання з термінами їх виконання.

Для оцінки технічного стану та безпеки ГТС на основі проведених експлуатаційним персоналом станції візуальних та інструментальних спостережень слід використовувати критерії безпеки. Критерії безпеки – це граничні значення кількісних і якісних показників стану споруд. В якості таких критеріїв в даний час використовуються гранично допустимі показники, значення яких визначаються відповідно до [27]. Згідно з цим документом розглядаються два стани: спорудження безпечно і небезпечно. Вважається, що безпека споруди забезпечена, якщо виміряні показники стану цієї споруди не перевищують гранично допустимих значень. Критерії безпеки та відповідні їм стани споруд, що викладено в [27], значною мірою застаріли і необхідно розробити новий документ, який забезпечить більшу диференціацію критеріїв безпеки та відповідних їм станів споруд. Видається, що це мають бути державні будівельні норми (ДБН), в яких необхідно викласти основні вимоги щодо визначення критеріїв безпеки ГТС і на основі цього ДБН розробити галузеві будівельні норми (ГБН) Міністерства енергетики та вугільної промисловості України «Методичні рекомендації щодо визначення критеріїв безпеки гідротехнічних споруд, що експлуатуються» на основі спеціальних досліджень.

## **НАДІЙНІСТЬ І БЕЗПЕКА ГТС ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ ПРИЗНАЧЕНОГО ТЕРМІНУ СЛУЖБИ**

В даний час відсутні нормативні документи і акти, що регламентують вимоги, виконання яких забезпечує можливість безпечної експлуатації ГТС після закінчення призначеного терміну служби. Слід зазначити, що у світовій практиці також відсутні такі документи, а питання про продовження експлуатації ГТС вирішується незалежно від тривалості їх служби на основі результатів регулярних (зазвичай, 1 раз на 5 років) комплексних обстежень, що проводяться власником споруд та експлуатуючою організацією з обов'язковим залученням державної служби нагляду.

Енергетична значимість, висока екологічна і соціальна відповідальність, а також тривала експлуатація ряду важливих гідроенергетичних об'єктів України є тими обставинами, що викликають необхідність розробки заходів щодо забезпечення подальшої безпечної експлуатації цих об'єктів після закінчення призначеного терміну служби. На нашу думку, такі заходи повинні базуватися на ряді спеціально розроблених нормативних галузевих керівних документів Міненергівугілля, до складу яких повинні входити:

- положення про порядок продовження експлуатації ГТС електростанцій після закінчення призначеного терміну служби (далі – Положення);
- типова технічна програма робіт з обґрунтування можливості продовження експлуатації ГТС після закінчення призначеного терміну служби (далі – Технічна програма).

Основні положення, які необхідно висвітлити в цих нормативних документах, викладено нижче.

## **ПОЛОЖЕННЯ ЩОДО ПОРЯДКУ ПРОДОВЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГТС ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ ПРИЗНАЧЕНОГО ТЕРМІНУ СЛУЖБИ**

У Положенні має бути вказано, що основним завданням при продовженні експлуатації ГТС після закінчення призначеного терміну служби є забезпечення їх надійності та безпеки. Доцільно встановити обов'язки державних органів (Міненергівугілля), власників і експлуатуючих організацій при здійсненні діяльності щодо забезпечення безпечної експлуатації ГТС після закінчення призначеного терміну служби.

Необхідно навести перелік робіт, що необхідно виконати для прийняття обґрунтованого рішення про долю ГТС електростанцій після закінчення призначеного терміну служби. Доцільно включити наступні роботи.

1. Створення комісії Міністерства енергетики та вугільної промисловості України (далі – Комісія) для організації та проведення робіт із забезпечення безпеки ГТС електростанцій (ГЕС, ГАЕС і ТЕС) після закінчення призначеного терміну служби.



2. Проведення «стандартного» централізованого обстеження ГТС електростанції відповідно до ГДК 34.03.106 [25] під керівництвом та за участю комісії.
3. Розробка, розгляд, узгодження та затвердження Технічного завдання на виконання робіт із забезпечення безпеки ГТС електростанції після закінчення призначеного терміну служби. Таке завдання розробляється на основі аналізу заключного акта «стандартного» централізованого обстеження після його затвердження Міненерговугілля.
4. Виконання робіт, пов'язаних з поглибленням централізованим обстеженням ГТС електростанції, згідно із затвердженим технічним завданням із залученням в необхідних випадках науково-дослідних, вишукувальних і проектних організацій. Підготовка звітів за результатами виконаних робіт.
5. Аналіз результатів, отриманих при виконанні поглибленого централізованого обстеження, і підготовка висновку Комісії з пропозиціями щодо можливості продовження терміну безпечної експлуатації ГТС.
6. Узгодження підготовленого Комісією висновку наглядовим органом Міненерговугілля «ЛьвівОРГРЕС», власником станції та експлуатаційною організацією.
7. Підготовка, погодження, прийняття та затвердження рішення щодо подальшої експлуатації (або припинення експлуатації) ГТС електростанції.
8. Проведення власником і/або експлуатаційною організацією заходів, передбачених висновком Комісії заходів, що забезпечують безпеку ГТС електростанцій після закінчення призначеного терміну служби.
9. Забезпечення наглядовим органом Міненерговугілля «ЛьвівОРГРЕС» контролю виконання передбачених висновком Комісії заходів, що забезпечують безпеку ГТС.

До складу Комісії Міністерства енергетики та вугільної промисловості України для організації та проведення робіт щодо забезпечення безпеки ГТС після закінчення призначеного терміну служби повинні бути включені представники тих самих організацій, що і в комісії для проведення регулярних централізованих обстежень споруд, тривалість експлуатації яких менше призначеного терміну служби.

В результаті роботи Комісії має бути прийнято одне з наступних рішень щодо долі ГТС:

- дозволена подальша експлуатація протягом прийнятого комісією обмеженого терміну при проектних параметрах ГТС;
- дозволена подальша експлуатація протягом

- прийнятого комісією обмеженого терміну при знижених параметрах ГТС;
- необхідно виконати ремонт або реконструкцію ГТС;
- ГТС слід вивести з експлуатації.

### **ТИПОВА ТЕХНІЧНА ПРОГРАМА РОБІТ З ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ПРОДОВЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГТС ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ ПРИЗНАЧЕНОГО ТЕРМІНУ СЛУЖБИ**

У Технічній програмі повинні бути розглянуті всі основні конструкції ГТС, їх матеріали і характеристики, типи і основні характеристики скельних і нескельних основ.

У Технічній програмі слід навести перелік робіт, що необхідно виконати при аналізі результатів поглибленого централізованого обстеження ГТС. Представляється доцільним включити наступні роботи.

1. Аналіз складу, конструктивних особливостей і умов роботи основних споруд гідровузла, їх конструкцій і основ.
2. Збір і аналіз раніше отриманих результатів інженерних вишукувань, проектних матеріалів, розрахунків і розрахункових досліджень, науково-дослідних робіт, виконаних при проектуванні споруд у процесі їх експлуатації, при проведенні ремонтів та реконструкцій, а також результатів натурних візуальних та інструментальних спостережень.
3. Оцінка технічного стану, надійності та безпеки основних споруд гідровузла, їх відповідності вимогам сучасних норм з використанням зібраних та проаналізованих даних, отриманих до початку виконання робіт щодо забезпечення безпечної експлуатації ГТС після закінчення призначеного терміну служби.
4. Розробка переліку додаткових вишукувальних і науково-дослідних робіт, необхідних для отримання більш детальної інформації щодо технічного стану споруд, їх елементів і ґрунтів основи, а також для виключення невизначеностей, що можуть виникнути при аналізі даних, отриманих до початку виконання робіт щодо забезпечення безпечної експлуатації споруд після закінчення призначеного терміну служби.
5. Додаткові інженерні вишукування та натурні інструментальні дослідження споруд, конструкцій і їх елементів, властивостей матеріалів, ґрунтів основи з метою отримання більш докладної інформації для оцінки технічного стану споруд і його прогнозу при подальшій експлуатації.
6. Виконання розрахунків (і/або розрахункових досліджень) споруд на основі раніше отриманих даних, а також даних додаткових інженерних вишукувань і натурних інструментальних



досліджень споруд, конструкцій і їх елементів, властивостей матеріалів з прогнозом стану споруд при подальшій експлуатації. До числа таких розрахунків повинні входити:

- розрахунки напружено-деформованого стану, механічної міцності і стійкості споруд, їх конструкцій і основ;
- розрахунки фільтраційного режиму гідровузла в цілому та окремих споруд, фільтраційної міцності матеріалів споруд та ґрунтів основи;
- гідравлічні розрахунки водопропускних споруд з оцінкою пропускної спроможності гідровузла, умов протікання потоку у водосховищі та у нижньому б'єфі, можливості та небезпеки утворення розмивів.

7. Аналіз результатів, отриманих при виконанні додаткових вишукувань, досліджень і розрахунків, з оцінкою можливості продовження терміну безпечної експлуатації ГТС.
8. Розробка критеріїв безпеки, умов та термінів, при яких буде забезпечена подальша безпечна експлуатація ГТС електростанцій після закінчення призначеного терміну служби.
9. Розробка заходів, що забезпечують безпеку ГТС електростанцій після закінчення призначеного терміну служби.

## ВИСНОВКИ

1. Слід вважати важливим завданням розробку спеціальних заходів щодо забезпечення надійності безпеки ГТС Дніпровського каскаду ГЕС завдяки енергетичної значимості, його високої екологічної та соціальної відповідальності, а також тривалості експлуатації (від 47 до 87 років). Дніпровську ГЕС, що найбільш довго експлуатується, доцільно розглядати як першочерговий об'єкт.
2. В даний час в Україні діє низка застарілих нормативних документів, що регламентують вимоги, які забезпечують надійність і безпеку ГТС при їх проектуванні, будівництві та експлуатації. Тому необхідно найближчим часом створити сучасну нормативну базу з державних будівельних норм (ДБН) та стандартів (ДСТУ) для проектування, будівництва та експлуатації ГТС.
3. Для правового регулювання діяльності із забезпечення безпеки ГТС необхідно завершити розробку законопроекту і прийняти Закон України «Про безпеку гідротехнічних споруд».
4. На основі проведення спеціальних досліджень необхідно розробити новий сучасний нормативний документ, що регламентує методику визначення критеріїв безпеки та відповідних цим критеріям технічних станів ГТС, що експлуатуються.

5. Необхідно розробити систему державних будівельних норм (ДБН), стандартів (ДСТУ) та галузевих будівельних норм (ГБН) Міністерства енергетики та вугільної промисловості України, щодо забезпечення безпеки ГТС електростанцій, які перебувають у тривалій експлуатації, а також вимоги, виконання яких забезпечить безпечну експлуатацію ГТС електростанцій після закінчення призначеного терміну служби.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Про об'єкти підвищеної небезпеки: Закон України від 18.01.2001 № 2245-III.
2. Методики ідентифікації потенційно небезпечних об'єктів: Наказ МНС України від 23.02.2006 р., № 98 зареєстровано в Мініюсті України 20.03.2006 р. за № 286/12160.
3. ДБН В.2.4-3-2010 Гідротехнічні споруди. Основні положення. – Чинні від 2011-01-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2010. – 37 с.
4. ДБН В.1.2-2:2006 Навантаження і впливи. Норми проектування. – Чинні від 2007-01-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2006. – 59 с.
5. Технічний регламент будівельних виробів, будівель і споруд: Постанова Кабінету Міністрів України від 20.12.2006 р. № 1764.
6. ДБН В.1.2-6-2008 Основні вимоги до будівель і споруд. Механічний опір та стійкість. – Чинні від 2008-10-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2008. – 15 с.
7. ДБН В.1.1-7-2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. – Чинні від 2017-06-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2016. – III, 41 с.
8. ДБН В.1.2-7-2008 Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека. – Чинні від 2008-10-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2008. – 30 с.
9. ДБН В.1.2-4-2006 Інженерно-технічні заходи цивільного захисту (цивільної оборони). – Чинні від 2006-06-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2006. – 34 с.
10. ДБН В.1.2-8-2008 Основні вимоги до будівель і споруд. Безпека життя і здоров'я людини та захист навколишнього природного середовища. – Чинні від 2008-10-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2008. – 22 с.
11. ДБН А.2.2-1:2003 Склад і зміст матеріалів оцінки впливів на навколишнє середовище (ОВНС) при проектуванні і будівництві підприємств, будинків і споруд. Чинні від 2004-04-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2004. – 21 с.
12. ДСТУ Б А.2.2-7:2010 Проектування. Розділ





- інженерно-технічних заходів цивільного захисту (цивільної оборони) у складі проектної документації об'єктів. Основні положення. – Чинний від 2010-07-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2010. – 24 с.
13. ДБН В.1.2-9-2008 Основні вимоги до будівель і споруд. Безпека експлуатації. – Чинні від 2008-10-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2008. – 21 с.
  14. ДБН В.1.2-10-2008 Основні вимоги до будівель і споруд. Захист від шуму. – Чинні від 2008-10-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2008. – 10 с.
  15. ДБН В.1.2-11-2008 Основні вимоги до будівель і споруд. Економія енергії. – Чинні від 2008-10-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2008. – 12 с.
  16. ДБН В.1.1-12-2014 Будівництво у сейсмічних районах України. – Чинні від 2014-10-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», – 110 с.
  17. СНиП 2.02.02-85 Основания гидротехнических сооружений. – Дата введения 1987-01-01. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 45 с.
  18. СНиП 2.06.04-82\* Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). – Дата введения 1984-01-01. – М.: Стройиздат, 1983. – 38 с.
  19. СНиП 2.06.06-85 Плотины бетонные и железобетонные. – Дата введения 1986-07-01. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 38 с.
  20. СНиП 2.06.07-87 Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. – Дата введения 1988-01-01. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 35 с.
  21. СНиП 2.06.08-87 Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. – Дата введения 1988-01-01. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 29 с.
  22. СНиП 2.06.09-84 Туннели гидротехнические. – Дата введения 1985-07-01. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 45 с.
  23. ДБН В.1.2-5-2007 Науково-технічний супровід будівельних об'єктів. – Чинні від 2008-01-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2007. – 16 с.
  24. ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016 Настанова щодо науково-технічного моніторингу будівель і споруд. – Чинний від 2017-04-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2017. – III, 38 с.
  25. ГДК 34.03.106-2003 Безпека гідротехнічних споруд і гідромеханічного обладнання електростанцій України. Положення про галузеву систему нагляду. – Київ: Об'єднання енергетичних підприємств. Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики, 2003. – 19 с.
  26. ГДК 34.21.342-2003 Типова технічна програма обстеження гідротехнічних споруд і гідромеханічного обладнання електростанцій. – Київ: Об'єднання енергетичних підприємств.

- Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики, 2003. – 19 с.
27. Рекомендации по определению предельно допустимых значений показателей состояния и работы гидротехнических сооружений П-836-85 / Гидропроект. – М.: изд-во ин-та Гидропроект им. С.Я. Жука, 1985. – 41 с.

## REFERENCES

1. Law of Ukraine «On objects of higher risk» of 18.01.2001, No. 2245-III (2001) [in Ukrainian].
2. Order of the Ministry of Emergency Situations of Ukraine No. 98 dated February 23, 2006, registered in the Ministry of Justice of Ukraine on March 20, 2006, № 286/12160 «Methods for potentially dangerous objects identification». (2006) [in Ukrainian].
3. Hydraulic structures. Basic principles. (2010). DBN V.2.4-3-2010 from 01<sup>st</sup> January 2011. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
4. Load and actions. Design standards. (2007). DBN V.1.2-2: 2006 from 01<sup>st</sup> January 2007. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
5. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1764 of 20.12.2006 «Technical regulations for building products, buildings and structures». (2006) [in Ukrainian].
6. Basic requirements for buildings and structures. Mechanical resistance and stability. (2008). DBN V.1.2-6-2008 from 01<sup>st</sup> October 2008. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
7. Fire safety of construction. General requirements. (2016). DBN V.1.1-7-2016 from 01<sup>st</sup> June 2017. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
8. Basic requirements for buildings and structures. Fire safety. (2008). DBN V.1.2-7-2008 from 01<sup>st</sup> October 2008. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
9. Engineering and technical measures of civil protection (civil defense). (2006). DBN V.1.2-4-2006 from 01<sup>st</sup> June 2006. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
10. Basic requirements for buildings and structures. Life and person's health safety and environmental protection. (2008). DBN V.1.2-8-2008 from 01<sup>st</sup> October 2008. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
11. Composition and content of materials for environmental impact assessment (EIA) during the design and construction of enterprises, buildings and structures. (2004). DBN A.2.2-1:2003. from 01<sup>st</sup> April 2004. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
12. Designing. Engineering and technical measures of civil protection (civil defense) as a section of the



- design documentation of objects. Basic principles. (2010). DSTU B A.2.2-7:2010. from 01<sup>st</sup> July 2010. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
13. Basic requirements for buildings and structures. Safety of operation. (2008). DBN V.1.2-9-2008 from 01<sup>st</sup> October 2008. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
  14. Basic requirements for buildings and structures. Noise protection. (2008). DBN V.1.2-10-2008 from 01<sup>st</sup> October 2008. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
  15. Basic requirements for buildings and structures. Energy saving. (2008). DBN V.1.2-11-2008 from 01<sup>st</sup> October 2008. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
  16. Construction in seismic regions of Ukraine. (2014). DBN V.1.1-12-2014 from 01<sup>st</sup> October 2014. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
  17. Hydraulic structures bases (1986). SNiP 2.02.02-85. [Effective from 01<sup>st</sup> January 1987. M.: CISD of USSR State Committee for Construction [in Russian].
  18. Loads and impacts on the hydraulic structures (from waves, ice and ships). (1983). SNiP 2.06.04-82\* from 01<sup>st</sup> January 1984. M.: Stroizdat [in Russian].
  19. Concrete and reinforced concrete dams. (1986). SNiP 2.06.06-85 from 01<sup>st</sup> July 1986. M.: CISD of USSR State Committee for Construction [in Russian].
  20. Retaining walls, shipping locks, fishways and fish screens. (1987). SNiP 2.06.07-87 from 01<sup>st</sup> January 1988. M.: CISD of USSR State Committee for Construction [in Russian].
  21. Concrete and reinforced concrete structures of the hydraulic works. (1987). SNiP 2.06.08-87 from 01<sup>st</sup> January 1988. M.: CISD of USSR State Committee for Construction [in Russian].
  22. Hydro-tunnels. (1985). SNiP 2.06.09-84 from 01<sup>st</sup> July 1985. M.: CISD of USSR State Committee for Construction [in Russian].
  23. Scientific and technical support of construction objects. (2007). DBN V.1.2-5-2007. from 01<sup>st</sup> January 2008. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
  24. Guidance on the scientific and technical monitoring of buildings and structures. (2017). DSTU-N B V.1.2-17:2016 from 01<sup>st</sup> April 2017. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
  25. The hydrotechnical structures and hydromechanical equipment safety at the power plants of Ukraine. Regulations on the sectoral supervisory system. (2003). HDK 34.03.106-2003. K.: Association of Energy Enterprises. Sectoral Reserve Investment Fund for Energy Development [in Ukrainian].
  26. The typical technical program of the power plants hydrotechnical structures and hydromechanical equipment inspection. (2003). HDK 34.21.342-2003. K.: Association of Energy Enterprises. Sectoral Reserve Investment Fund for Energy Development [in Ukrainian].
  27. Recommendations for determining the maximum allowable values of the hydraulic structures state and operation indicators P-836-85. (1985). M.: Publishing House of the S.Ya. Zhuk Institute «Hydroproekt» [in Russian].

Стаття надійшла до редакції 10.04.2019 року.



УДК 624.15:699.841



**НЕМЧИНОВ Ю.І.**

Д-р технічних наук, проф., перший заступник директора інституту з наукової роботи, ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», м. Київ, Україна, e-mail: yu.nemch@ndibk.gov.ua, тел.: +38 (050) 469-35-77, ORCID: 0000-0002-6618-125X



**МАР'ЄНКОВ М.Г.**

Д-р технічних наук, зав. від., ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», м. Київ, Україна, e-mail: n.maryenkov@ndibk.gov.ua, тел.: +38 (050) 415-36-03, ORCID: 0000-0002-7246-845X



**КАЛЮХ Ю.І.**

Д-р технічних наук, старший наук. співробітник, ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», м. Київ, Україна, e-mail: y.kalyukh@ndibk.gov.ua, тел.: +38 (050) 415-35-91, ORCID: 0000-0001-7240-4934



**БАБІК К.М.**

Канд. технічних наук, зав. лаб., ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», м. Київ, Україна, e-mail: k.babik@ndibk.gov.ua, тел.: +38 (050) 415-37-58, ORCID: 0000-0002-8763-510X



**ДИРДА В.І.**

Д-р технічних наук, проф., зав. від., Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, м. Дніпро, Україна, e-mail: vita.igtm@gmail.com, тел.: +38 (067) 560-98-73, ORCID: 0000-0002-1975-8511

## ЗАХИСТ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ ВІД СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ДИНАМІЧНИХ ВПЛИВІВ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

### АНОТАЦІЯ

В статті представлені результати експериментально-теоретичних досліджень щодо вирішення проблеми віброізоляції багатоповерхових житлових будинків у рівні пальового ростверку від потягів залізниці. Результати виконаних робіт дозволили отримати акселерограми поверхні ґрунту на будівельному майданчику; здійснити розроблення розрахункових динамічних моделей віброізолюваних 6, 10 та 13-поверхових секцій житлового будинку для проведення розрахунків та розроблення рекомендацій з конструювання вузлів влаштування віброізоляторів та системи сейсмо- та віброзахисту секцій будинку з метою зниження до допустимих за Санітарними нормами динамічних впливів від потягів залізниці.

Для захисту від динамічних впливів потягів залізниці за результатами чисельних досліджень та випробувань гумових віброізоляторів, проведених в ДП НДІБК та ІГТМ НАНУ, згідно патенту на оголовок кожної палі перед бетонуванням плити ростверку встановлюється гумовий ізолятор та влаштовується система віброзахисту будинку у рівні підшви плити ростверку та стін підвалу. За результатами розрахунків просторових моделей будинків обґрунтовані параметри гумових ізоляторів для віброзахисту 6, 10 та 13-поверхових секцій. Виконані випробування двох типів гумових віброізоляторів вітчизняного виробництва з зовнішнім діаметром 340 мм і товщиною 40 і 50 мм з доведенням максимального вертикального навантаження до 3200 кН. Середня жорсткість



гумового ізолятора діаметром 340 мм та товщиною 50 мм на стиск (при розрахункових навантаженнях на палі до 800 кН) дорівнює  $K_z = 67000$  кН/м; ізолятора товщиною 40 мм  $K_z = 105000$  кН/м (при розрахункових навантаженнях на палі до 1200 кН). Розрахункові коефіцієнти запасу проти перекидання секцій висотою 13, 10 та 6 поверхів дорівнюють від 5,4 до 16,5 при інтенсивності сейсмічних впливів 6 балів. При вітрових впливах коефіцієнти запасу дорівнюють від 101,6 до 196,6.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** житловий будинок, система сейсмо- та віброзахисту, віброприскорення ґрунту та перекриття, випробування ізоляторів, розрахунок на акселерограми, рекомендації з віброзахисту

## ЗАЩИТА ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ ОТ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК И ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

**НЕМЧИНОВ Ю.И.** Д-р технических наук, проф., первый заместитель директора института по научной работе, «ГП «Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций»,

г. Киев, Украина,  
e-mail: yu.nemch@ndibk.gov.ua,  
тел.: +38 (050) 469-35-77,  
ORCID: 0000-0002-6618-125X

**МАРЬЕНКОВ Н.Г.** Д-р технических наук, зав. отд., ГП «Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций»,

г. Киев, Украина,  
e-mail: n.maryenkov@ndibk.gov.ua,  
тел.: +38 (050) 415-36-03,  
ORCID: 0000-0002-7246-845X

**КАЛЮХ Ю.И.** Д-р технических наук, старший научный сотрудник, ГП «Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций»,

г. Киев, Украина,  
e-mail: y.kalyukh@ndibk.gov.ua,  
тел.: +38 (050) 415-35-91,  
ORCID: 0000-0001-7240-4934

**БАБИК К.М.** Канд. технических наук, зав. лаб., ГП «Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций»,

г. Киев, Украина,  
e-mail: k.babik@ndibk.gov.ua,  
тел.: +38 (050) 415-37-58,  
ORCID: 0000-0002-8763-510X

**ДЫРДА В.И.** Д-р технических наук, проф., зав. отд., Институт геотехнической механики им. М.С. Полякова НАН Украины, г. Днепр, Украина,

e-mail: vita.igtm@gmail.com,  
тел.: +38 (067) 560-98-73,  
ORCID: 0000-0002-1975-8511

## АННОТАЦИЯ

В статье приведены результаты экспериментально-теоретических исследований по решению проблемы сейсмоизоляции и виброизоляции многоэтажных зданий в уровне свайного ростверка при воздействиях железнодорожных поездов. Результаты выполненных работ позволили получить акселерограммы поверхности ґрунта на строительной площадке; выполнить разработку расчетных динамических моделей виброизолированных 6, 10 и 13-этажных секций жилого дома для проведения расчетов и разработки рекомендаций по конструированию узлов устройства виброизоляторов и системы сейсмо- и виброзащиты секций дома с целью снижения до допустимых по Санитарным нормам динамических воздействий от железнодорожных поездов.

Для защиты от динамических воздействий железнодорожных поездов по результатам многочисленных исследований и испытаний резиновых виброизоляторов, проведенных в ГП НИИСК и ИГТМ НАНУ, согласно патента на оголовок каждой сваи перед бетонированием плиты ростверка устанавливается резиновый изолятор и устраивается система виброзащиты зданий на уровне подошвы плиты ростверка и стен подвала. По результатам расчетов пространственных моделей зданий обоснованы параметры резиновых изоляторов для виброзащиты 6, 10 и 13-этажных секций. Выполнены испытания двух видов резиновых виброизоляторов отечественного производства с внешним диаметром 340 мм и толщиной 40 и 50 мм с доведением максимальной вертикальной нагрузки до 3200 кН. Средняя жесткость резинового изолятора диаметром 340 мм и толщиной 50 мм на сжатие (при расчетных нагрузках на сваи до 800 кН) равняется  $K_z = 67000$  кН/м; изолятора толщиной 40 мм  $K_z = 105000$  кН/м (при расчетных нагрузках на сваи до 1200 кН). Расчетные коэффициенты запаса против опрокидывания секций высотой 13, 10 и 6 этажей равняются от 5,4 до 16,5 при интенсивности сейсмических воздействий 6 баллов. При ветровых воздействиях коэффициенты запаса равняются от 101,6 до 196,6.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** жилой дом, система сейсмо- и виброзащиты, виброускорение ґрунта и перекрытия, испытания изоляторов, расчет на акселерограммы, рекомендации по виброзащите

## RESIDENTIAL BUILDINGS PROTECTION AGAINST SEISMIC LOADS AND RAIL TRANSPORT DYNAMIC ACTIONS

**NEMCHYNOV Yu.I.** Dr., Prof., First Deputy Director for Scientific Work, State Enterprise «The State Research Institute of Building Constructions», Kyiv, Ukraine,



e-mail: [yu.nemch@ndibk.gov.ua](mailto:yu.nemch@ndibk.gov.ua),  
тел.: +38 (050) 469-35-77,  
ORCID: 0000-0002-6618-125X

**MARIENKOV N.H.** Dr., Head of Department, State Enterprise «The State Research Institute of Building Constructions»,  
Kyiv, Ukraine,  
e-mail: [n.maryenkov@ndibk.gov.ua](mailto:n.maryenkov@ndibk.gov.ua),  
тел.: +38 (050) 415-36-03,  
ORCID: 0000-0002-7246-845X

**KALIUKH Iu.I.** Dr., Senior Researcher, State Enterprise «The State Research Institute of Building Constructions»,  
Kyiv, Ukraine,  
e-mail: [y.kalyukh@ndibk.gov.ua](mailto:y.kalyukh@ndibk.gov.ua),  
тел.: +38 (050) 415-35-91,  
ORCID: 0000-0001-7240-4934

**BABIK K.M.** PhD, Head of Laboratory, State Enterprise «The State Research Institute of Building Constructions»,  
Kyiv, Ukraine,  
e-mail: [k.babik@ndibk.gov.ua](mailto:k.babik@ndibk.gov.ua),  
тел.: +38 (050) 415-37-58

**DYRDA V.I.** Dr., Prof., Head of Department, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine,  
Dnipro, Ukraine,  
e-mail: [vita.igtm@gmail.com](mailto:vita.igtm@gmail.com),  
тел.: +38 (067) 560-98-73,  
ORCID: 0000-0002-1975-8511

## ABSTRACT

The paper presents the results of experimental and theoretical research on solving the problems of seismic and vibration isolation in the multi-storey buildings pile grillages level under the influences of rail trains and motor vehicles. The performed works allowed to receive of the construction site soil surface accelerograms and to carry out the calculation dynamic models development for the vibro-insulated residential building with 6-, 10- and 13-storey sections for the calculations and recommendations elaboration for the design of vibration insulators and seismic and vibration protection systems in building sections in order to reduce the rail trains dynamic impacts up to sanitary norms permitted under the Sanitary norms.

Based on the rubber vibroinsulators numerous surveys and tests carried out at the SE NDIBK and IGTM NASU, for a building protection against the rail trains dynamic impacts, in compliance with the applied patent, prior to the grillage slab concreting, the rubber protector is installed on each pile head and the building vibration protection system is arranged at the grillage slab bottom and

basement walls level. The parameters of rubber insulators for the vibration protection of 6-, 10- and 13-storey sections are substantiated based on the building spatial models calculations. The tests of two types of domestic rubber vibroinsulators with a 340-mm external diameter and 40-mm and 50-mm thicknesses were performed with the maximum vertical loading increase up to 3200 kN. The average compressive stiffness is Dnipro,  $K_z = 67000$  kN/m for the rubber vibroinsulator of a 340-mm diameter and 50-mm thickness (under pile design loads up to 800 kN) and Dnipro,  $K_z = 105000$  kN/m for the insulator with 40 mm thickness (under pile design loads up to 1200 kN). The design safety factors for the 13, 10 and 6 floors high sections overturning have values from 5.4 to 16.5 at the 6 points seismic intensity. The safety factors are from 101.6 to 196.6 under the wind influences.

**KEY WORDS:** residential building, seismo- and vibroprotection system, soil and floor vibroacceleration, insulators tests, accelerograms design, vibroprotection recommendations

## ВСТУП

Комфортабельний 3-х секційний (6, 10 та 13 поверхів) житловий комплекс будується по вул. Під Дубом в м. Львові з системою сейсмо- та віброзахисту від потягів залізниці. Розрахункова сейсмічність майданчику будівництва складає 6 балів за діючими нормами [1]. Будівельний майданчик розташований біля залізничних колій. Під час руху потягів і автотранспорту вібрації ґрунту передаються конструкціям будівлі. Переважаючі частоти динамічних дій від потягів залізниці і автотранспорту знаходяться в діапазоні 10-80 Гц. Частоти власних вертикальних коливань перекриттів в житлових кімнатах будинків складають від 20 до 50 Гц. Тому, динамічні впливи потягів є причиною підвищених (близьких до резонансних) коливань перекриттів будинків, які розташовані вздовж колій.

При перевищенні рівнів вібрації перекриттів в житлових приміщеннях будинків допустимих рівнів за Санітарними нормами у людей може проявлятися (під час тривалого впливу вібрації) вібраційна хвороба. Тому, для забезпечення допустимих рівнів вібрацій, у багатьох країнах використовується виброізоляція і сейсмоізоляція будівель. Система сейсмозахисту також забезпечує зниження сейсмічних навантажень на конструкції будівель і сприяє підвищенню сейсмостійкості конструкцій [1].

Застосування систем віброзахисту на основі еластомерних віброопор (віброізолятори на основі натурального каучуку) набуло широкого поширення як на промислових підприємствах, так і при зниженні техногенних впливів (вібрацій)



на людину в житлових будинках, особливо в мегаполісах України (віброзахист від підземного і наземного транспорту: потягів метрополітену, трамваю, залізничного та автомобільного транспорту).

У багатьох країнах пройшли випробування сильними землетрусами системи сейсмоізоляції будівель і споруд на основі еластомерних сейсмоопор. Системи вібро- і сейсμοзахисту на основі розроблених в Україні вітчизняних еластомерних віброопор (віброізоляторів) для захисту конструкцій будівель і споруд від сильних і руйнівних землетрусів дозволяють проектувати сейсмостійкі, комфортні і економічні будівельні конструкції [1-18].

### РОЗГЛЯД НЕВИРШЕНИХ ПРОБЛЕМ

Віброізоляція будівель від вібрацій потягів залізниці здійснюється шляхом встановлення гумових або гумово-металевих віброізоляторів між фундаментною плитою і стінами будівлі підвального поверху. Також побудовано у різних країнах багато будівель з встановленням вібро- і сейсмоопор над підземними поверхами.

Для пальового ростверку ефективність системи віброзахисту шляхом установки гумових віброізоляторів на оголовках паль потребує додаткових досліджень. Залізобетонний монолітний ростверк спирається на гумові віброопори і здійснюється як функція вібро- і сейсμοзахисту, так і підвищується стійкість будівлі проти перекидання під час вітрових і сейсмічних навантажень (за рахунок зниження центру ваги віброізоляційної верхньої будови). Крім цього, збільшується довговічність гумових віброопор, у зв'язку з експлуатацією гуми в умовах вологого середовища.

Важливим також є повне вирішення проблеми вогнезахисту гумових віброопор, які захищені зверху монолітною залізобетонною плитою, а з боків - ґрунтом зворотної засипки. До недоліків даної системи вібро- і сейсμοзахисту будівель можна віднести витрати під час заміни віброопор (у разі необхідності). Для захисту житлових будинків від вібрації горизонтального напрямку, що поширюється у ґрунті, влаштовується віброізоляція за допомогою м'якого матеріалу (наприклад, пінополістиролу), що розміщується між зовнішніми поверхнями ростверку та стін підземних поверхів та ґрунтом зворотної засипки.

### ОБ'ЄКТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Майданчик будівництва трьох секцій житлового будинку з системою сейсмічного та вібраційного захисту на вул. Під Дубом у м. Львів знаходиться в зоні щільної забудови, прилеглих автотранспортних шляхів та залізниці. Рух автотранспорту біля будівельного майданчика необмежений протягом доби. Двосторонній

рух залізничних потягів як пасажирських, так і вантажних на ділянці залізниці Київ – Львів біля будівельного майданчика також здійснюється без будь-яких обмежень. Залізнична колія розташована на відстані 20-30 м від будинку.

Житловий будинок за проектом складається з трьох секцій, які відрізняються як поверховістю, так і розмірами в плані. Секція 3 має 13 поверхів, секція 2 – 6 поверхів, секція 1 – 10 поверхів. Кожна секція будинку побудована на власному віброізоляційному пальовому фундаменті.

Конструктивна схема житлових 6, 10 та 13-поверхових будинків – безригельний монолітний залізобетонний каркас [3]. Несучими вертикальними конструкціями є колони, пілони та ядра жорсткості. Висота типового поверху – 3,0 м. Перекриття поверхів та покриття – монолітні залізобетонні плити товщиною 200 мм, які об'єднують вертикальні елементи і забезпечують просторову жорсткість будівлі. Фундаменти будинків – монолітні залізобетонні ростверки на пальовій основі [3, 4, 10-12]. Палі прийнято перерізом 350×350 мм.

Пальові ростверки 6-поверхового будинку запроєктовано товщиною 600 мм; 10 та 13-поверхових будинків – товщиною 800 мм. Для захисту від динамічних впливів потягів залізниці за результатами чисельних досліджень та випробувань гумових віброізоляторів, проведених в ДП НДІБК та ІГТМ НАНУ, рекомендовано на оголовок кожної палі перед бетонуванням плити ростверку встановити гумовий ізолятор діаметром 340 мм та влаштувати систему віброзахисту будинків у рівні підшви плити ростверку згідно патенту [18].

Слід відмітити, що запропоноване рішення системи сейсμο- та віброзахисту пройшло перевірку на житлових 10 та 27-поверхових будинках у м. Києві. У побудованих дев'яти будинках у м. Києві рівні вібрації перекиртітів не перевищують допустимі значення за Санітарними нормами під час динамічних впливів руху потягів метрополітену [15, 16].

**МЕТА РОБОТИ** – обґрунтування використання системи сейсμο- та віброзахисту трьох секцій житлового будинку (6, 10 та 13 поверхів) під час сейсмічних та динамічних впливів потягів залізниці.

**МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ** – динамічні обстеження поверхні ґрунту на будівельному майданчику; розроблення просторових динамічних моделей трьох секцій; випробування гумових ізоляторів; виконання розрахунків секцій на сейсмічні навантаження інтенсивністю 6 балів та динамічні впливи вантажних та пасажирських потягів залізниці; обґрунтування ефективності системи віброзахисту будинку за результатами розрахунків та контрольних вимірювань рівнів прискорень плит перекиртіття під час будівництва трьох секцій.



## РЕЗУЛЬТАТИ ДИНАМІЧНИХ ОБСТЕЖЕНЬ ПОВЕРХНІ ҐРУНТУ ТА ПЕРЕКРИТТЯ ПІД ЧАС ВПЛИВУ ВАНТАЖНИХ ТА ПАСАЖИРСЬКИХ ПОТЯГІВ

Нормування рівнів віброприскорень, віброшвидкості та вібропереміщень в житлових приміщеннях запроваджено з метою забезпечення безпеки та комфортного проживання у будинках [15, 16]. Для непостійної вібрації від потягів в нічний час допустимі рівні вібрації перекриттів у приміщеннях житлових будинків приведені в табл. 1. Граничне значення віброприскорення при визначенні його рівня (у дБ) прийнято рівним  $1 \times 10^{-6} \text{ м/с}^2$ .

Для виконання вимог [15, 16] необхідно передбачати відповідну відстань між житловими

будівлями та джерелами вібрації, або застосування на джерелах та будівлях засобів віброзахисту. Аналіз зареєстрованих у 2016 р. на будівельному майданчику по вул. Під Дубом сигналів та їх спектрів (рис. 1, 2) показав наступне. При динамічних впливах вантажних потягів перевищення допустимих рівнів віброприскорень перекриттів проєктованих будинків при відсутності системи віброзахисту прогнозується від 6 дБ до 12 дБ (у 2 – 4 рази) в октавах «8 Гц», «16 Гц», «31,5 Гц» та «63 Гц» (рис. 1, 2). При проїзді пасажирських потягів перевищення допустимих рівнів віброприскорень перекриттів прогнозується на 2 – 5 дБ в октавах «31,5 Гц» та «63 Гц».

З метою зниження рівнів вібрації конструкцій

Таблиця 1. Допустимі рівні вібрації (дБ) в житлових будинках

Параметри	Середньо-геометричні частоти октавних полос, Гц					
	2	4	8	16	31,5	63
Віброшвидкість	69	63	57	57	57	57
Віброприскорення	65	65	65	71	77	83
Вібропереміщення	133	121	109	108	97	91

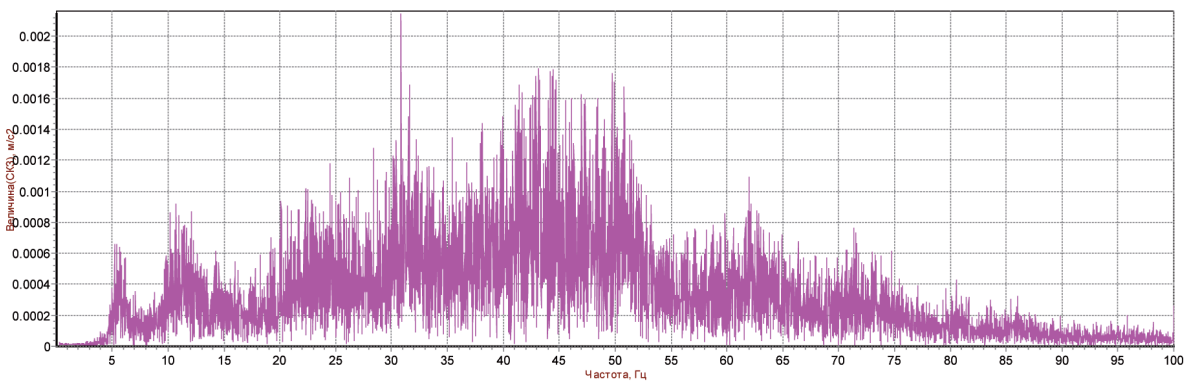


Рис. 1. Вузкосмуговий спектр вертикальних віброприскорень ґрунту (вісь Z) на відстані 22 м від колії при впливах вантажного потягу

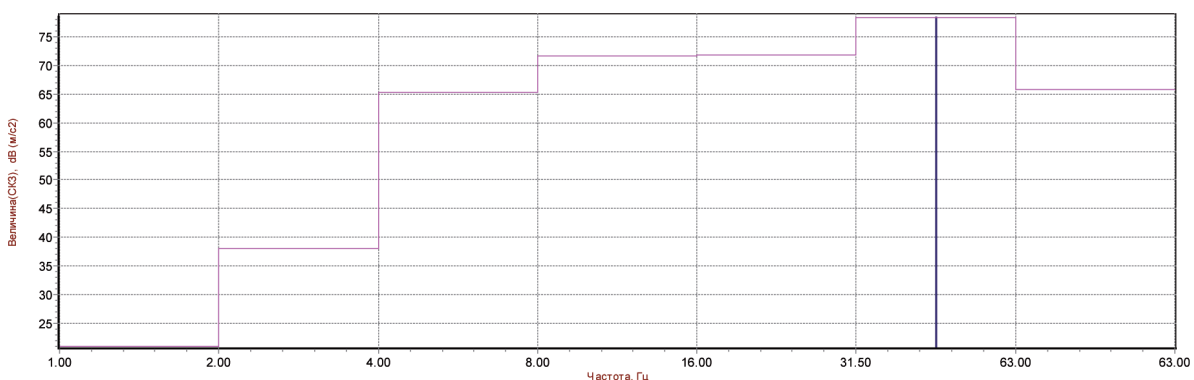


Рис. 2. Октавний спектр вертикальних віброприскорень ґрунту (вісь Z) на відстані 22 м від колії при впливах вантажного потягу



проектованих 6, 10 та 13-поверхових будинків до допустимих значень були виконані розрахунки параметрів гумових ізоляторів та проведені випробування ізоляторів діаметром 340 мм. Визначені за результатами випробувань, фактичні жорсткості ізоляторів (рис. 3, 4, 5) були використані під час розрахунків просторових моделей будинків на динамічні впливи потягів залізниці.

### РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ КОЛИВАНЬ 13-ПОВЕРХОВОГО БУДИНКУ

Розрахунки коливань просторової моделі будинку виконано на динамічні впливи вантажних та пасажирських потягів з врахуванням системи віброзахисту (гумові віброопори, на які спирається ростверк) та при її відсутності.

Розрахункова модель 13-поверхового будинку була розрахована на вплив акселерограм, зареєстрованих біля фундаменту секції під час руху потягів залізниці. Виконане порівняння частот, періодів та суми модальних мас за формами коливань будинку на віброопорах та при їх відсутності. Частота вертикальних коливань будинку на віброопорах (ізоляторах жорсткістю на стиск  $K_z = 105000$  кН/м) дорівнює 3,8 Гц.

Отримані дані дозволили зробити висновок, що сума модальних мас досягає 59,2% вже на 7-й формі коливань будинку на віброопорах. При відсутності віброопор сума модальних мас досягає 68,9 % на 108-й формі коливань. Тому при влаштуванні системи віброзахисту будинку його коливання на віброопорах будуть на частотах з меншими значеннями, у результаті чого розрахункові рівні коливань перекриттів будинку отримані значно меншими: 0,013 мм та

0,031 мм, тобто у 2,4 рази менше. Максимальне розрахункове вертикальне прискорення плити ростверку 13-поверхового будинку з системою віброзахисту дорівнює  $4,7$   $\text{cm/s}^2$ , що нижче прискорення ґрунту  $22$   $\text{cm/s}^2$  у 4,6 рази.

Порівняльний аналіз ізополей вертикальних амплітуд переміщень перекриттів 13-поверхового будинку з системою віброзахисту та при її відсутності показано на рис. 6, 7, що як при впливах вантажних потягів, так і при проїзді пасажирських потягів розрахункові (прогнозовані) рівні вібрацій конструкцій перекриттів не перевищують допустимі значення.

### РОЗРАХУНКОВІ КОЕФІЦІЄНТИ ЗАПАСУ БУДИНКІВ ПРОТИ ПЕРЕКИДАННЯ ПІД ЧАС ВІТРОВИХ ТА СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Коефіцієнт запасу будинків проти перекидання під час вітрових та сейсмічних навантажень визначається за формулою:

$$K_{opr} = M_{y0} / M_{opr},$$

де  $M_{y0}$  – мінімальний утримуючий момент від постійного навантаження відносно крайнього ряду віброізоляторів;  $M_{opr}$  – максимальний перекидний момент від вітрових або сейсмічних навантажень (при 6 балах згідно [1] при значенні коефіцієнта  $k_l = 1,0$ ).

Результати розрахунків коефіцієнтів запасу проти перекидання секції 3 будинку наведені у табл. 2. При сейсмічних впливах розрахункові коефіцієнти запасу дорівнюють від 5,4 до 16,5 для секцій висотою від 13 до 6 поверхів, при вітрових впливах – від 101,6 до 196,6.

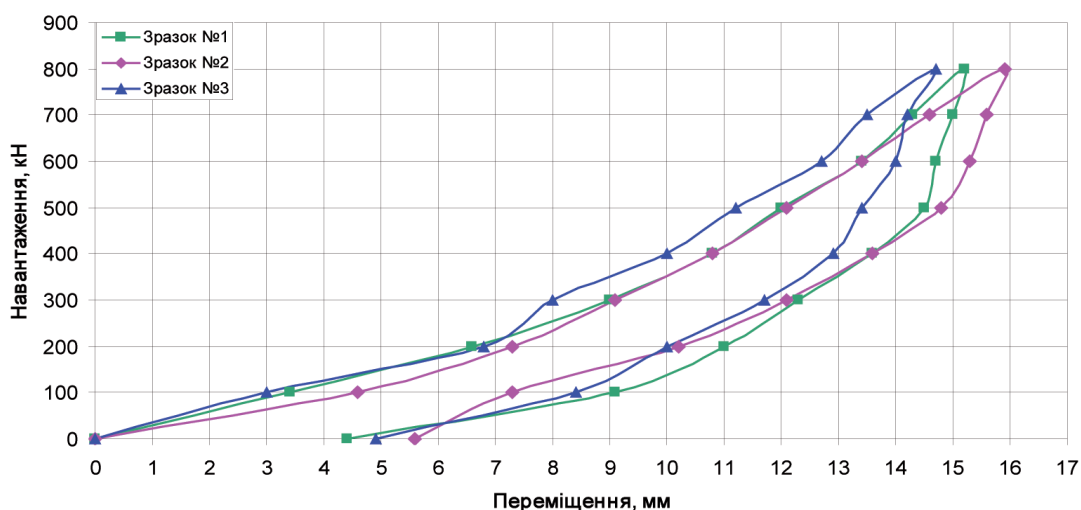
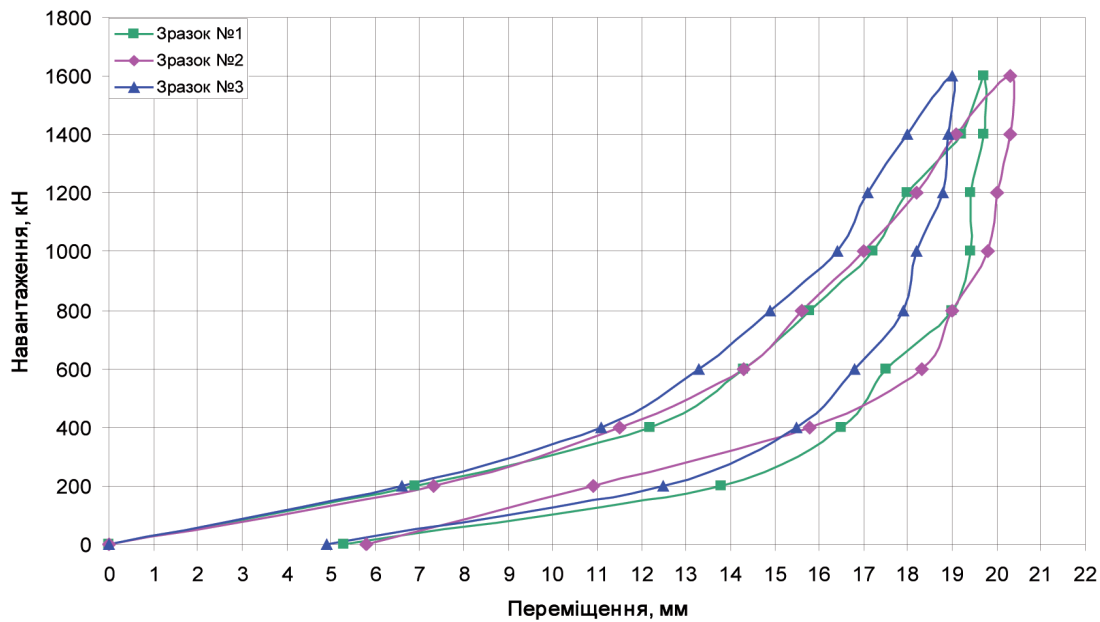
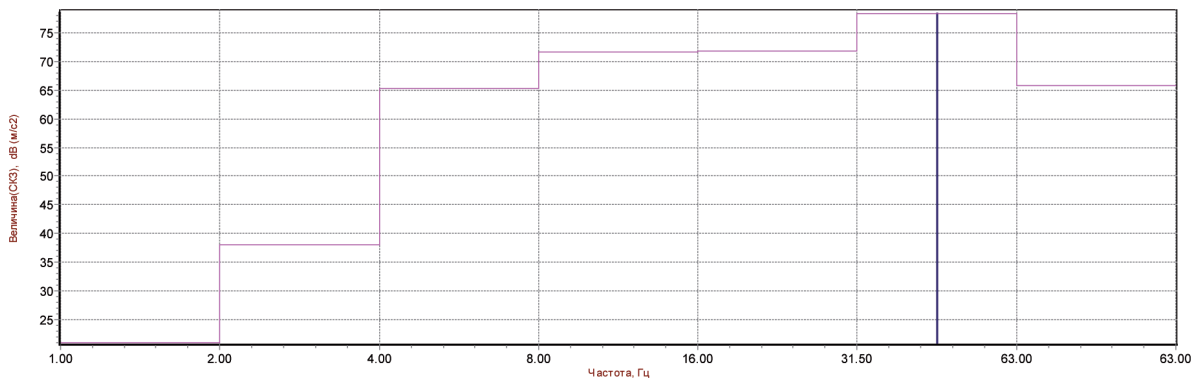


Рис. 3. Залежність вертикального переміщення від навантаження (до 800 кН) гумових ізоляторів діаметром 340 мм (система віброзахисту від потягів залізниці 6, 10 та 13 поверхових секцій житлового будинку по вул. Під Дубом у м. Львів)





**Рис. 4.** Залежність вертикального переміщення від навантаження (до 1600 кН) гумових ізоляторів діаметром 340 мм (система віброзахисту від потягів залізниці 6, 10 та 13-поверхових секцій житлового будинку по вул. Під Дубом у м. Львів)



**Рис. 5.** Октавні спектри вертикальних віброприскорень перекриття (спектр 1 – датчик вібрації № 1 встановлено на перекритті 2 поверху секції 3; спектр 2 – датчик № 2 – на перекритті 2 поверху секції 1) при проїзді вантажного потягу (час запису о 13 год 54 хвилини 16.09.2017 р.)

### РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ВІБРООПОР БУДИНКІВ ТА СИСТЕМИ ВІБРОЗАХИСТУ

За результатами багаторічних експериментально – теоретичних досліджень [14, 17, 19] було запатентовано спосіб [18] і розроблено практичні рекомендації з влаштування системи віброзахисту 6, 10 та 13-поверхових житлових будинків в рівні підшви ростверку.

Схема системи віброзахисту будинку з гумовим віброізолятором діаметром 340 мм та товщиною 50 мм, який встановлюється на оголовку палі, приведена на рис. 8. Розрахункове вертикальне навантаження на ізолятор і палю дорівнює

800 кН. Слід відмітити, що випробування гумових ізоляторів товщиною 50 мм було виконано з максимальними навантаженнями до 3200 кН.

Для захисту конструкцій ростверку та підвалу будинків від горизонтальних та вертикальних коливань ґрунту було передбачено віброзахист ростверків та усіх зовнішніх стін підвалу до зворотної засипки ґрунту. Рекомендовано влаштування віброізоляції за допомогою податливого матеріалу (пінополістиролу щільністю 25...30 кг/м<sup>3</sup> у вигляді плит товщиною 100 мм), що розміщується між усіма зовнішніми поверхнями фундаментної плити та стінами підземних поверхів і ґрунтом зворотної засипки.

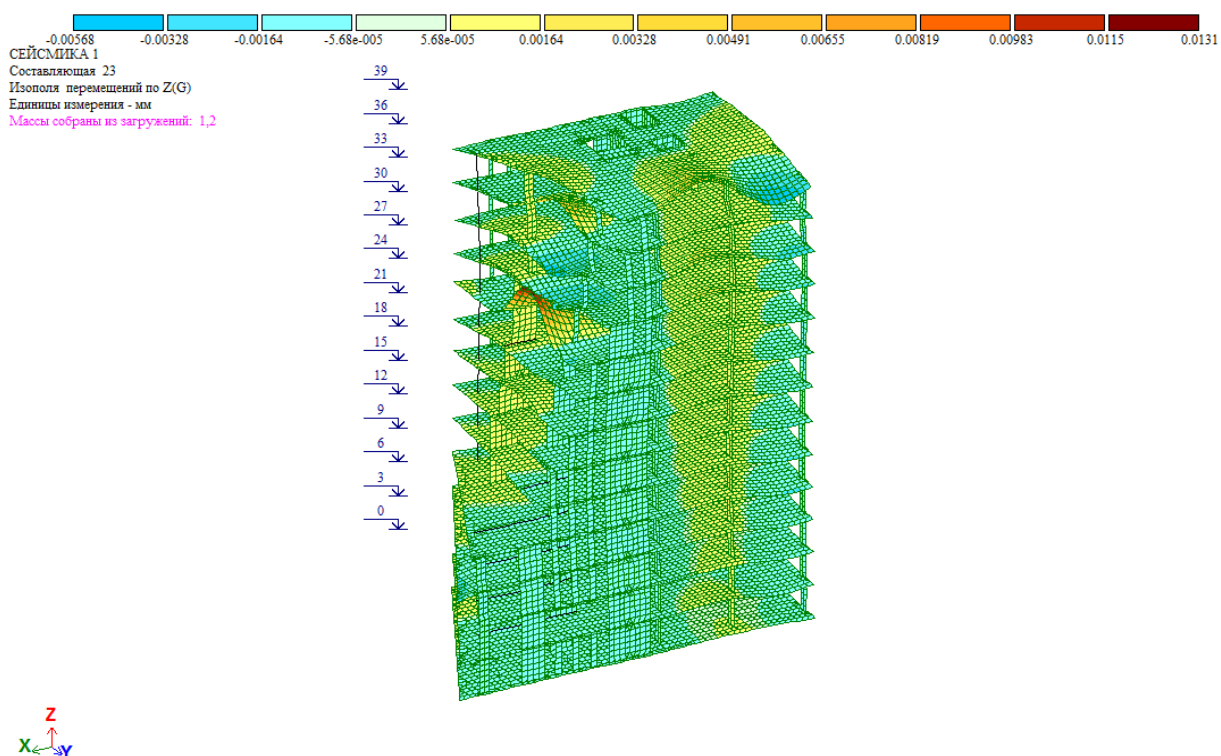


Рис. 6. Розрахункові вертикальні амплітуди переміщень перекриттів 13-поверхового будинку з системою віброзахисту при впливах вантажного потягу (23 форма коливань)

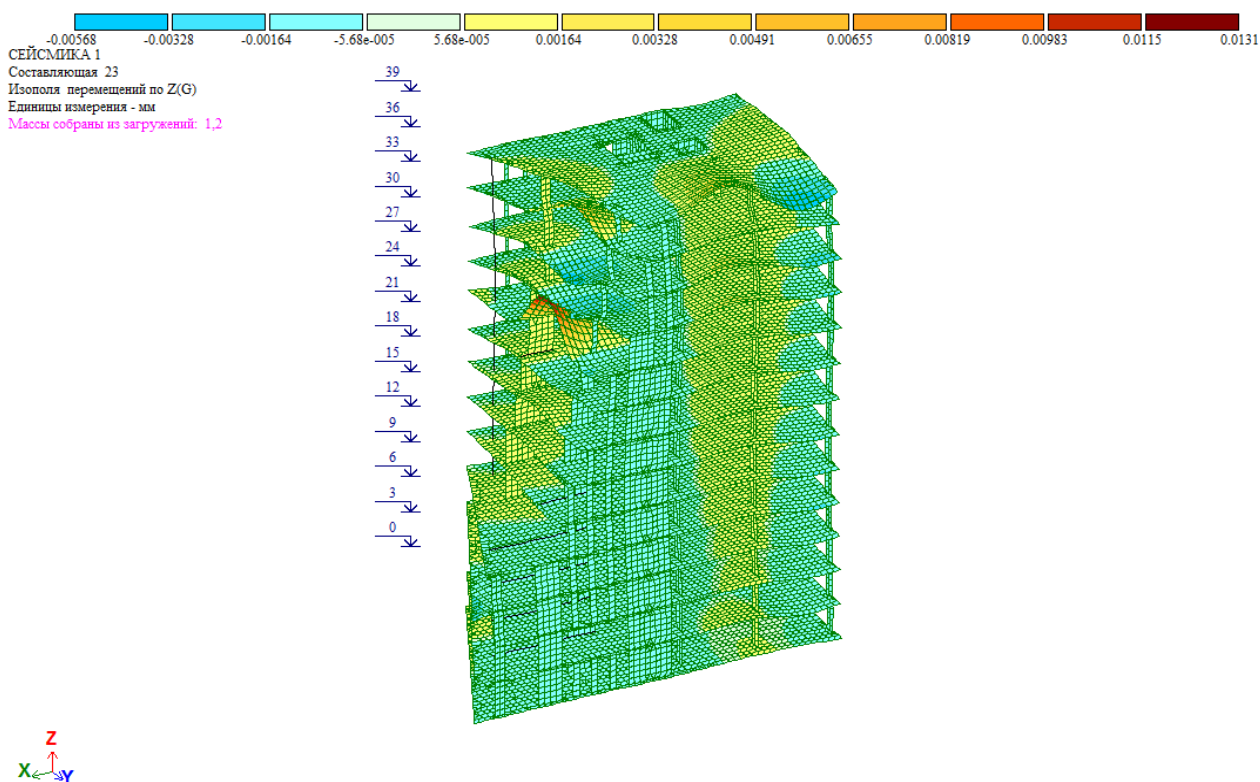


Рис. 7. Розрахункові вертикальні амплітуди переміщень перекриттів 13-поверхового будинку при відсутності віброзахисту при впливах вантажного потягу (39 форма коливань)



Таблиця 2. Результати розрахунків стійкості 13-поверхового будинку (секція 3) проти перекидання при сейсмічних навантаженнях інтенсивністю 6 балів

№ вузла	Моменти, що утримують, кНм.10 <sup>-1</sup>		Моменти, що перекидають, кНм.10 <sup>-1</sup>		Коефіцієнти стійкості	
	$M_x$	$M_y$	$M_x$	$M_y$	$K_x$	$K_y$
При сейсмічних впливах за напрямком $Y$						
1	64019	96912	921	13102	69.5	7.4
28	67762	137676	922	13188	73.5	10.4
71	71577	71126	871	13164	82.2	<b>5.4</b>
137	71577	96912	871	13102	82.2	7.4
При сейсмічних впливах за напрямком $X$						
1	64019	96912	11699	800	5.5	121.1
28	67762	137676	11697	927	5.8	148.5
71	71577	71126	11772	891	6.1	79.8

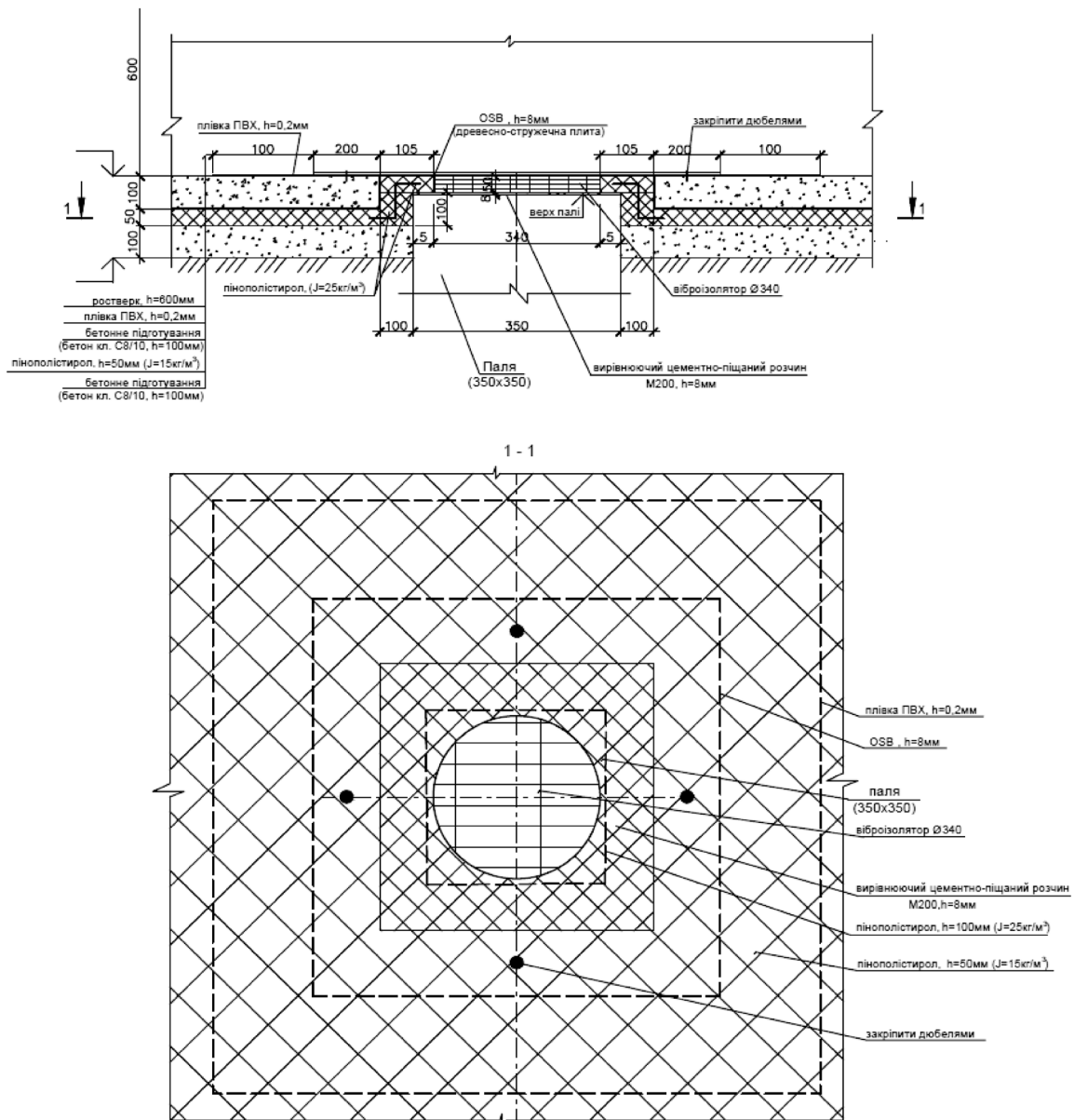


Рис. 8. Система віброзахисту житлового будинку в рівні пального ростверку з використанням гумових віброізоляторів



## ВИСНОВКИ

1. Співставлення дослідних значень рівнів віброприскорень з допустимими показав, що при впливах потягів залізниці рівні вібрації ґрунту перевищують допустимі значення для житлових будинків [15, 16] на 6...12 дБ (від двох до чотирьох разів). Це підтверджує необхідність влаштування системи віброзахисту пального ростверку та стін підвалу, що дозволить знизити рівні вібрації конструкцій і забезпечити комфортні умови проживання у будинках.
2. Виконані чисельні дослідження просторової моделі секцій будинку та розроблені рекомендації з влаштування системи віброзахисту запроектованого житлового будинку.
3. З метою забезпечення комфортних умов проживання у будинку розроблена схема застосування та порядок встановлення гумових віброізолюючих опор системи віброзахисту будинку в рівні пального фундаменту. Розрахункова частота власних вертикальних коливань будинків на віброопорах дорівнює 3,8 - 4,7 Гц, що у 3...12 разів менше частот вимушених коливань ґрунту (15 - 80 Гц) при впливах потягів залізниці. Аналіз розрахункових даних показав, що при влаштуванні віброізоляції рівні вібрації перекриттів не перевищують допустимих за Санітарними нормами для житлових будинків [15, 16]. При відсутності віброзахисту будівлі розрахункові рівні вертикальних вібрацій перекриттів перевищують допустимі значення в 1,5...4 рази (від 2,9 дБ до 13,0 дБ).
4. При сейсмічних навантаженнях (визначались при 6 балах згідно [1] при значенні коефіцієнта  $k_I = 1,0$ ) розрахункові коефіцієнти запасу проти перекидання секцій висотою 13, 10 та 6 поверхів дорівнюють від 5,4 до 16,5. При вітрових впливах коефіцієнти запасу дорівнюють від 101,6 до 196,6.
5. Обґрунтовані параметри гумових ізоляторів для віброзахисту 6, 10 та 13-поверхових секцій будинку. Виконані натурні випробування двох типів гумових віброізоляторів з зовнішнім діаметром 340 мм і товщиною 50 мм і 40 мм з доведенням максимального вертикального навантаження до 3200 кН. Середня жорсткість гумового ізолятора діаметром 340 мм та товщиною 50 мм на стиск (при розрахункових навантаженнях на палі до 800 кН) дорівнює  $K_z = 67000$  кН/м; ізолятора товщиною 40 мм  $K_z = 105000$  кН/м (при розрахункових навантаженнях на палі до 1200 кН).

6. За результатами експлуатації гумових віброізоляторів під час дії статичних та динамічних навантажень гарантійний строк експлуатації системи віброзахисту будинку не менше сімдесяти п'яти років. При цьому необхідно відмітити, що вологе середовище сприяє подовженню строку експлуатації гумових віброізоляторів.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. ДБН В.1.1-12-2014 Будівництво у сейсмічних районах України. – Чинні від 2014-10-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2014. – VI, 110 с.
2. ДБН В.1.2.-5:2007 Науково-технічний супровід будівельних об'єктів. – Чинні від 2008-01-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2007. – II, 14 с.
3. Робочий проект. Багатоквартирний житловий будинок з вбудованими автостоянкою та громадськими приміщеннями по вул. Під Дубом, 26, № 2 по генплану. Архітектурні рішення. А-15-21-АР/2. ПП «АВР Девелопмент». – Львів, 2016.
4. Технічний звіт. Інженерно-геологічні вишукування на об'єкті: Багатоквартирний житловий будинок з вбудованими автостоянкою та громадськими приміщеннями по вул. Під Дубом, 26 у м. Львові. – ФОП С. Добринецький, 2015.
5. ПК «Лира», версія 9.4. Программний комплекс для расчета и проектирования конструкций. Справочно-теоретическое пособие под ред. академика АИН Украины А. С. Городецкого. – Киев – М., 2003. – 464 с.
6. ДСТУ ГОСТ 12.1.012-2008. ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования. – Дата введения 01.07.90. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 46 с.
7. ДБН В.1.2-14-2018 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. – Чинні від 2019-01-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2018. – III, 30 с.
8. Руководство пользователя. «Сейсмомониторинг». «Диатос», НТУ «КПИ», г. Киев, 2009.
9. ДБН В.2.1-10-2018 Основи та фундаменти споруд. – Чинні від 2019-01-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2018. – IV, 36 с.
10. ДСТУ Б В.2.1-27:2010 Основи та фундаменти споруд. Палі. Визначення несучої здатності за результатами польових випробувань. – Чинні від 2011-07-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2011. – III, 11 с.



11. ДСТУ Б В.2.1-1-95 Грунти. Методи польових випробувань палями. – Чинні від 1996-01-01. – Київ: Укрархбудінформ, 1997. – IV, 58 с.
12. СНиП 2.02.05-87. Фундаменты машин с динамическими нагрузками. – М., 1988.
13. ДБН В.2.6-98:2009 Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – Чинні від 2011-06-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2018. – II, 71 с.
14. Проектирование зданий с заданным уровнем обеспечения сейсмостойкости / [Ю.И. Немчинов, Н.Г. Марьенков, А.К. Хавкин, К.Н. Бабик. Под ред. Немчинова Ю.И.]. – Киев, 2012. – 384 с.
15. СН 1304-75 Санитарные нормы допустимых вибраций в жилых домах. – М.: Минздрав СССР, 1975.
16. ДБН Б.2.2-12:2018 Планування і забудова територій. – Чинні від 2018-09-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2018. – IV, 179 с.
17. Булат А.Ф. Вибросейсмозащита тяжелых машин, зданий и сооружений с помощью резинометаллических блоков / А.Ф. Булат, В.И. Дырда, Н.И. Лисица [и др.]// Автоматизация производных процессов у машиностроения та приладобудування: Український міжвідомчий науково-технічний збірник. – Львів: Львівська політехніка, 2011. – Вип. 45. – С. 460-464.
18. Пат. 117896 Україна. МПК: E04B 1/62 (2006.01), E04B 1/98 (2006.01), E04H 9/02 (2006.01). Спосіб шумо- і віброзахисту будівель і споруд від підземного та наземного залізничного і автомобільного транспорту / Дирда В.І., Бабік К.М., Калганков Є.В., Лисиця М.І., Мар`єнков М.Г., Немчинов Ю.І.; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.
19. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Lysytsya, M.I. & Grebenyuk, S.M. Numerical Simulation of the Stress-Strain State of Thin-Layer Rubber-Metal Vibration Absorber Elements Under Nonlinear Deformation. Strength of Materials. – 2018. – N. 3 (50). – P. 387-395.

## REFERENCES

1. Construction in seismic regions of Ukraine. (2014). DBN V.1.1-12-2014 from 01<sup>st</sup> October 2014. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
2. Scientific and technical support of construction projects. (2007). DBN V.1.2.-5:2007 from 01<sup>st</sup> January 2008. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].

3. Apartment residential building with built-in parking area and public premises at 26 Pid Dubom St, № 2 in compliance with the development plan. Architectural solutions. A-15-21-AP/2. Working Design. (2016). Lviv: PE «AVR Development» [in Ukrainian].
4. Engineering and geological surveys at the site: Apartment residential building with built-in parking area and public premises at 26 Pid Dubom St, Lviv. Technical report. (2015). – Individual entrepreneur S.Dobrynetskyi [in Ukrainian].
5. Horodetskyi A.S. (Ed.) Theoretical reference book: SW «LIRA», version 9.4. Software package for structures calculation and design. (2003). K. – M. [in Russian].
6. Vibrationsafety.Generalrequirements.(1990). DSTU GOST 12.1.012-2008. OSSS from 01<sup>st</sup> July 1990. – M.: Standards Publishers [in Russian].
7. General principles for reliability and constructive safety ensuring of buildings and civil engineering works. (2018). DBN V.1.2-14-2018 from 01<sup>st</sup> January 2019. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
8. «Seismonitoring»: User's manual. (2009). «Diatos», NTU «KPI», K. [in Russian].
9. Bases and foundations of buildings and structures. (2018). DBN V.2.1-10-2018 from 01<sup>st</sup> January 2019. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
10. Ground and foundations structures. Pile. Calculation of bearing capacity on results of field tests. (2011). DSTU BV.2.1-27:2010 from 01<sup>st</sup> July 2011. – K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
11. Soils. Methods of field tests by piles. (1997). DSTU B V.2.1-1-95 from 01<sup>st</sup> January 1996. – K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
12. Foundations of machines with live load. (1988). SNiP 2.02.05-87. M. [in Russian].
13. Concrete and reinforced concrete structures. Basic principles. (2018.) DBN V.2.6-98:2009 from 01<sup>st</sup> June 2011. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
14. Nemchynov, Iu.I., Marienkov, N.H., Khavkin, A.K. & Babik, K.N. (2012). Designing buildings with a given level of seismic resistance. Iu.I. Nemchynov (Ed.). K. [in Russian].
15. Sanitary norms of permissible vibrations in residential buildings. (1975). SN 1304-75. M.: Minzdrav SSSR [in Russian].
16. Planning and development of territories. (2018). DBN V.2.2-12:2018 from 01<sup>st</sup> September 2018. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
17. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Lysytsya, M.I. et al. (2011). Vibroseismic protection of



- heavy machines, buildings and structures using rubber-metal blocks. Automation of production processes in machine and instrument engineering industries: Ukrainian Interdepartmental Col. of Scientific and Technical Papers, Iss. 45, 460-464. Lviv: Lviv polytechnic [in Ukrainian].
18. Dyrda, V.I., Babik, K.M., Kalhankov, Ye.V., Lysytsya, M.I., Marienkov, M.H. & Nemchynov Iu.I. (2017). The method of the buildings and structures noise and vibration protection against underground and surface rail and road transport. Pat. 117896 of Ukraine. IPC: E04B 1/62 (2006.01), E04B 1/98 (2006.01), E04H 9/02 (2006.01), publ. 10.07.2017. Official Bul., № 13 [in Ukrainian].
  19. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Lysytsya, M.I. & Grebenyuk, S.M. (2018). Numerical Simulation of the Stress-Strain State of Thin-Layer Rubber-Metal Vibration Absorber Elements Under Nonlinear Deformation. Strength of Materials, 3 (50), 387-395.

Стаття надійшла до редакції 12.05.2018 р.



УДК 691.3



**ТАРАСЮК В.Г.**

Канд. технічних наук, заступник директора з наукової та нормативно-методичної роботи, ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», м. Київ, Україна, e-mail: v.tarasyuk@ndibk.gov.ua, тел.: + 38 (050) 387-97-12, ORCID: 0000-0002-3844-1376



**ЖАРКО Л.О.**

Канд. технічних наук, доц., зав. відділу, ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», м. Київ, Україна, e-mail: zharko@ndibk.gov.ua, тел.: + 38 (066) 722-70-57, ORCID: 0000-0002-5966-1060



**ОВЧАР В.П.**

Канд. технічних наук, провідний науковий співробітник, ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», м. Київ, Україна, e-mail: vovchar@i.ua, тел.: + 38 (067) 784-52-95, ORCID: 0000-0002-3896-2729



**БОРЕЦЬКА Н.С.**

Науковий співробітник, ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», м. Київ, Україна, e-mail: n.petrenko@ndibk.gov.ua, тел.: + 38 (098) 311-23-32, ORCID: 0000-0002-4497-7599

## ДО ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ І КЛАСУ БЕТОНУ

### АНОТАЦІЯ

В статті узагальнено досвід роботи відділу досліджень конструкцій будівель і споруд щодо спірних питань визначення класу і міцності бетону на стиск. Головним показником якості бетону в бетонних і залізобетонних збірних та монолітних конструкціях є клас бетону на стиск, що відповідає величині його характеристичної міцності. Відомі аналітичне і графічне представлення цього показника. Його не однозначне трактування в існуючій нормативній базі на стадіях підбору складу бетону, виготовлення продукції, експлуатації будівель і споруд призводить до конфлікту економічних інтересів між сторонами: виробник бетону, будівельник, інвестор. Вирішення проблем однозначного трактування результатів руйнівних та неруйнівних методів випробувань міцності бетону можливе лише за умови перегляду і узгодження чинних нормативів. Представлено аналіз та приклади використання нормативної бази визначення міцності і класу бетону, що діє для виробників і споживачів бетону, та визначення міцності і класу бетону безпосередньо в конструкціях. Наведено приклади необґрунтованого оцінювання міцності при використанні неруйнівних механічних і ультразвукових методів та за контрольними зраз-

ками через ігнорування нормативних умов. Для експлуатації конструкцій суттєво забезпечення фактичного класу міцності бетону, що встановлено проектом. Для його достовірного визначення застосовують випробування зразків з вибурених із конструкції бетонних кернів та тарованих ними неруйнівних методів. Проаналізовано на прикладі різні методи оцінки результатів випробування міцності кернів. Однозначності потребує метод визначення результатів випробування – за окремими результатами чи за їх партіями.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** нормативна база, міцність і клас бетону на стиск, неруйнівні випробування, визначення міцності і класу бетону безпосередньо в конструкціях, розподілення кубкової міцності на стиск, характеристична міцність, середня міцність, мінімальна міцність, вирішення спірних питань з оцінки міцності

### THE DETERMINATION OF CONCRETE STRENGTH AND GRADE

**TARASIUK V.H.** PhD, Dep. Dir. for Scientific and Normative and Methodological Work, State Enterprise «The State Research Institute of Building Constructions»,



Kyiv, Ukraine,  
e-mail: v.tarasyuk@ndibk.gov.ua,  
tel.: + 38 (050) 387-97-12,  
ORCID: 0000-0002-3844-1376

**ZHARKO L.O.** PhD, Ass. Prof., Head of Department, State Enterprise «The State Research Institute of Building Constructions»,  
Kyiv, Ukraine, e-mail: zharko@ndibk.gov.ua,  
tel.: + 38 (066) 722-70-57,  
ORCID: 0000-0002-5966-1060

**OVCHAR V.P.** PhD, Leading Researcher, State Enterprise «The State Research Institute of Building Constructions»,  
Kyiv, Ukraine,  
e-mail: vovchar@i.ua,  
tel.: + 38 (067) 784-52-95,  
ORCID: 0000-0002-3896-2729

**BORETSKAIA N.S.** Senior Scientist, State Enterprise «The State Research Institute of Building Constructions»,  
Kyiv, Ukraine,  
e-mail: n.petrenko@ndibk.gov.ua,  
tel.: + 38 (098) 311-23-32,  
ORCID: 0000-0002-4497-7599

## ABSTRACT

In the paper the experience of the Buildings and Structures Design Research Department study of the controversial issues of concrete grade and compressive resistance is summarized. The main indicator of concrete quality in the concrete and reinforced concrete prefabricated and cast-in-situ structures is the compressive strength of concrete, which corresponds to its specified characteristic strength. The analytical and graphical representations of this indicator are well known. In the existing normative base its ambiguous interpretation at the stages of concrete composition selection, product manufacture and buildings and structures operation causes the conflict of economic interests between such involved parties as concrete manufacturer, builder and investor. The problem of the definitive interpretation of the results of concrete strength destructive and nondestructive tests can be solved only under the condition of the current standards revision and harmonization. The analysis and examples of the use of normative base, which is effective for concrete producers and consumers, for the concrete strength and grade determination, and of the concrete strength and grade determination directly in structures are presented. Some instances of unsubstantiated strength assessment are given, when the non-destructive mechanical and ultrasonic methods, as well as the control samples are used in disregard for regulatory requirements. For the structures operation it is essential to ensure the actual concrete strength grade specified by the project. For its reliable determination, the drilled concrete core samples and calibrated non-destructive methods have been used. The various methods of the cores strength

tests results assessment have been exemplified. The method for the tests interpretation by individual results or by their groups requires an unambiguous determination.

**KEY WORDS:** normative base, concrete compressive strength and grade, non-destructive tests, determination of concrete strength and grade directly in structures, distribution of cube compressive strength, specific characteristic strength, target mean strength, minimum strength, resolution of strength assessment controversial issues

У сучасному будівництві масово використовуються бетонні і залізобетонні конструкції: збірні та монолітні. Головним показником якості таких конструкцій є клас бетону на стиск, що передається характеристичною міцністю на стиск бетону за стандартним випробуванням циліндрів та стандартним випробуванням кубів, проведеним на 28 день.

При проектуванні надійних безпечних конструкцій застосовують показники характеристичної міцності (specified characteristic strength) на стиск бетону гарантованою з 95% імовірністю відповідного класу та середнє значення міцності (target mean strength), що приймають з урахуванням однорідності показників міцності при нормативному коефіцієнті їх варіації 13,5% ( $V_c = 0,135$ ). При іншій однорідності міцності:  $f_{cm, cube} = f_{ck, cube} / (1 - 1,64 V_c)$ , або  $f_{ck, cube} = f_{cm, cube} - 1,64 \cdot s$  (позначки дивись у табл. 1).

Характеристична міцність – це міцність, нижче якої може знаходитися 5% результатів. Окремі результати нижче  $f_{ck}$  – мінімальна міцність (minimum strength) можуть мати місце, але вони не можуть бути меншими, ніж 4 МПа. Тобто, якщо було випробувано кожену партію виготовленого бетону, то 5% результатів опиняться у нижньому «хвості (tail)» нормального розподілу, який починається із «запасом (margin)» в  $1,64 \cdot s$  нижче реальної середньої міцності  $f_{cm}$ . Приклад нормального розподілення кубової міцності (cube strength) на стиск бетону класу С 25/30 в залежності від частоти (frequency) отримання відповідних результатів випробування наведено на рис. 1 [1].

Існуюча нормативна база не однозначно трактує визначення міцності та класу бетону при підборі складу бетонної суміші для бетону потрібної міцності, при постачанні бетонної суміші на будівельний майданчик для монолітних робіт та на виробництво збірних конструкцій. Це викликає конфлікт економічних інтересів між виробником бетону і будівельником чи інвестором. Аналіз невідповідностей, що стосуються визначення міцності бетону за контрольними зразками, навіть при виконанні усіх приписів діючих нормативів, наведено в роботі [2]. Вирішення таких проблем можливе лише за умови перегляду і узгодження цих нормативів.



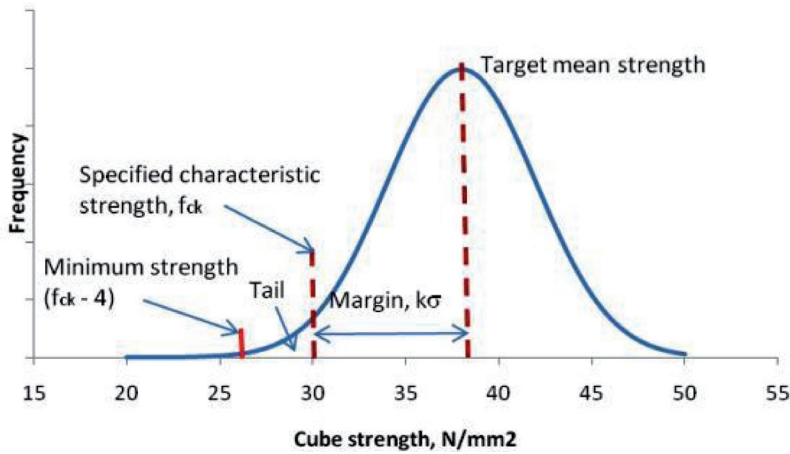


Рис. 1 Розподілення кубкової міцності на стиск бетону класу С 25/30 [1]

Слід звернути увагу на застосування непрямих методів визначення міцності бетону у залізобетонних виробках і конструкціях. Хоча ДСТУ Б В.2.7-220:2009 [10] поширюється на механічні прилади, а ДСТУ Б В.2.7-226:2009 [13] – на ультразвукові, разом з правилами контролю міцності ДСТУ Б В.2.7-224:2009 [12] надають виважені методики неруйнівних випробувань, але здебільшого ці методики не виконуються: некоректна побудова тарувальної залежності, невідповідність умов тарування і застосування приладів, ігнорування поправочних коефіцієнтів та ін.

Таблиця 1. Аналіз результатів визначення міцності кернів, Н/мм<sup>2</sup> (МПа)

Показник	Окремі керни	Партії кернів
$n$ – кількість результатів випробувань / партій	48	12
$f_{m(n), is}$ – середнє значення міцності на стиск з $n$ результатів випробувань безпосередньо в конструкціях	34,75	36,17
$f_{is, lowest}$ – найменший результат випробувань міцності на стиск	25,32	27,83
$s$ – стандартне відхилення результатів випробувань	6,29	5,59
$f_{ck}$ – характеристична міцність на стиск стандартних зразків класу С 25/30	30	
$f_{ck, is}$ – характеристична міцність на стиск в конструкціях бетону класу С 25/30; $f_{ck, is, cube}$ – характеристична міцність на стиск в конструкціях при зазначенні еквівалентної міцності куба зі стороною 150 мм	26	
Метод А для окремих кернів		
$f_{ck, is} = f_{m(n), is} - k_2 \times s, (1)$	$34,75 - 1,48 \times 6,29 = 25,44$	
$f_{ck, is} = f_{is, lowest} + 4 (2)$	$25,32 + 4 = 29,32$	
$f_{ck, is, cube}$	25,44	
Метод В для партій кернів		
$f_{ck, is} = f_{m(n), is} - k (3)$		$36,17 - 5 = 31,17$
$f_{ck, is} = f_{is, lowest} + 4 (4)$		$27,83 + 4 = 31,83$
$f_{ck, is, cube}$		31,17
Подолання сумніву щодо окремих кернів		
$f_{m(n), is} \geq 0,85 (f_{ck, is} + 1,48 \times s) (7)$	$34,75 > 0,85 (25,44 + 48 \times 6,29) = 29,54$	
$f_{is, lowest} \geq 0,85 (f_{ck} - 4) (8)$	$25,32 > 0,85 (30 - 4) = 18,22$	



Так, при використанні на одному з об'єктів будівництва неруйнівних методів з механічними і ультразвуковими приладами необгрунтовано оцінювалася міцність конструкцій: були невідомі градувальні криві і умови їх побудови; при визначенні необхідної міцності бетону на стиск приймалося табличне значення середньої міцності для відповідного класу бетону (38 МПа для С 25/30) [6], а не за п.п. 7.1 і 7.2 ДСТУ Б В.2.7-224:2009 [12] з урахуванням коефіцієнта варіації міцності бетону  $V_{cm} = 8 \%$  за паспортом якості бетонної суміші виробника та коефіцієнта 0,95; тоді значення коефіцієнта необхідної міцності для бетонів становить  $k_t = 1,09$  і необхідна міцність бетону на стиск при використанні неруйнівних методів контролю міцності бетону в конструкціях з бетоном класу С 25/30 буде становити:  $f_{ct} = 1,09 \times 0,95 \times 30 = 31,1$  МПа. Відсутня програма робіт не дозволила порівняти результати чисельних випробувань конструкцій різного віку, розташованих в різних місцях об'єкту.

В іншому випадку занижена оцінка міцності бетону була наслідком використання коефіцієнта варіації за довідковими даними табл. 6 ДБН В.2.3-22:2009 [5] або за статистичною обробкою власних випробувань, а не за даними виробника бетонної суміші, що суперечить п. 6.7 ДСТУ Б В.2.7-224:2009 [12].

Конфліктні ситуації виникають також при оцінці міцності бетону в існуючих конструкціях, але вони вирішуються шляхом відбору зразків безпосередньо з конструкцій за ДСТУ Б В.2.7-223:2009 [11] та оцінкою міцності бетону на стиск в конструкціях і збірних бетонних елементах згідно ДСТУ Б EN 13791:2013 (EN 13791:2007, IDT) [14] за еталонними зразками-кернами.

Зразки бетону вибурюють в місцях, в яких відсутня арматура, що визначають за проектом та за допомогою магнітного методу визначення розташування арматури [1]. Необхідність збереження армування конструкції і отримання вільного від неї зразка накладає вимоги щодо небажаного зменшення діаметру керна.

Подальший контроль міцності і однорідності бетону можливо проводити непрямыми методами, тарування яких коригується на місці за результатами випробувань еталонних зразків-кернів [14].

Нормативи, що прив'язано до потреб виробників бетонної суміші і бетону, міцність і її однорідність визначають на достатній кількості контрольних зразків (не менше 30 партій) за відповідний минулий проміжок виробництва (місяці). Конфліктним є поняття необхідної міцності, що розраховується і підбирається на початку виробництва для однорідності вираженої нормативним коефіцієнтом варіації 13,5 %, а потім з удосконаленням виробництва - набагато мен-

шим, що дозволяє виробнику економити цемент, зменшуючи фактичну міцність бетону.

На відміну, при визначенні міцності бетону на стиск безпосередньо в конструкціях історія бетону (лабораторні підбори, журнали випробувань, паспорти, сертифікати і т.п.) може мати не більше, ніж довідковий статус. Головними стають показники випробувань еталонних зразків-кернів з можливістю подальшого охоплення контролем всього об'єкту за допомогою непрямих методів випробувань (механічних, ультразвукових та ін.).

Наведемо приклад застосування ДСТУ Б EN 13791:2013 [14] на одному з об'єктів каркасно-монолітного будівництва.

Вибурювання виконувалося в конструкціях пілонів і круглих колон в місцях, вільних від арматури, що визначалися за допомогою електронного шукача металу за ДСТУ Б В.2.6-4-95 (ГОСТ 22904-93) [7] та забезпеченням відповідного діаметру бура – 64 мм.

Для проведення випробувань з визначення міцності бетону на стиск з отриманих циліндрів було виготовлено 12 партій зразків-кернів по 4 зразка у кожній – всього 48 зразків.

Міцність на стиск партій еталонних зразків-кернів, приведена до базового розміру кубів зі стороною 150 мм, знаходилася в межах 27,83-48,41 МПа, хоча окремі зразки відрізнялися більше (рис. 2). Але слід пам'ятати, що за правилами контролю міцності ДСТУ Б В.2.7-224:2009 [12] з чотирьох результатів враховують лише три найбільші.

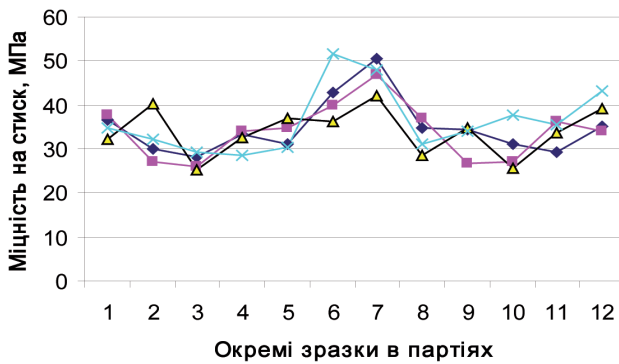
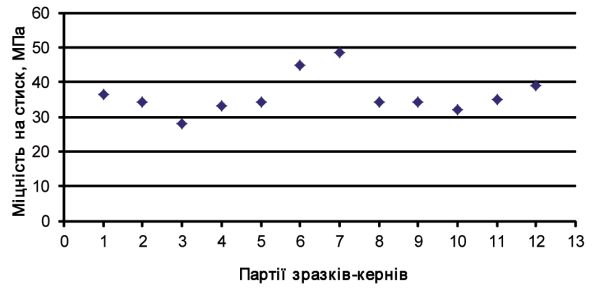
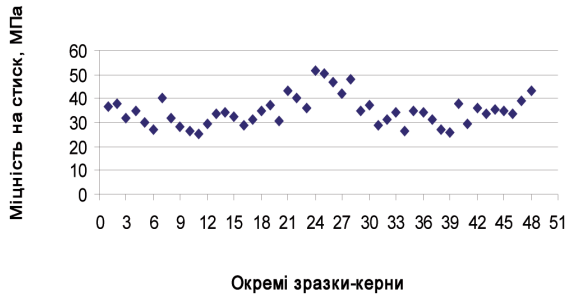
Враховувалися такі положення стандарту ДСТУ Б EN 13791:2013 (EN 13791:2007, IDT) [14]:

- співвідношення міцності на стиск безпосередньо в конструкції до характеристичної міцності стандартних зразків становить 0,85 (що є частиною  $\gamma_c$  відповідно до ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 [15]); так, для класу С 25/30 характеристична міцність на стиск стандартних зразків становить 30 МПа, а мінімальна характеристична міцність на стиск безпосередньо в конструкціях (при зазначенні еквівалентної міцності куба зі стороною 150 мм) – 26 МПа;
- безпосередньо в конструкції характеристична міцність бетону на стиск оцінювалася з використанням або методу А (для окремих 48 зразків) або методу В (для 12 партій) з використанням показників середнього значення міцності на стиск, найменшого результату випробувань, стандартного відхилення результатів випробувань та коефіцієнтів, що залежать від кількості випробувань.

Метод А розглядає мінімум 15 результатів; а метод В - від 3 до 14.

За методом А оцінена характеристична міцність для області випробувань визначається як найменше з двох наступних значень:

$$f_{ck, is} = f_{m(n), is} - k_2 \times s, \quad (1)$$



**Рис. 2** Розподілення кубкової міцності на стиск бетону безпосередньо в конструкціях за результатами випробувань еталонних зразків-кернів

або

$$f_{ck, is} = f_{is, lowest} + 4, \quad (2)$$

де  $k_2$  - коефіцієнт, який залежить від вимог, що діють на місці застосування; якщо вимог немає, то коефіцієнт має значення 1,48.

За методом В подібно:

$$f_{ck, is} = f_{m(n), is} - k, \quad (3)$$

або

$$f_{ck, is} = f_{is, lowest} + 4, \quad (4)$$

де для  $n = 10 - 15$  коефіцієнт  $k = 5$  - (розкид значень, характерний для невеликої кількості результатів випробувань).

Результати статистичного аналізу свідчили,

що характеристична міцність бетону на стиск безпосередньо в конструкціях, оцінена за методом А, для усіх 48 зразків кернів становила 25,44 МПа, а за методом В для 12 партій – 31,17 МПа. Тобто, оцінка зразків згідно партій показала відповідність бетону класу міцності на стиск С 25/30 (31,17 МПа > 26 МПа), тоді як для окремих зразків середня міцність складала 97,85 % від потрібної.

Для подолання сумніву щодо відповідності міцності бетону на основі стандартних випробувань окремих кернів, використано нерівності (7) і (8) щодо середнього і найменшого значення міцності бетону за результатами випробувань, виконання яких показало, що область випробувань слід вважати такою, що складається з бетону, який відповідає міцності і класу С 25/30.

Аналіз результатів визначення міцності кернів, Н/мм<sup>2</sup> (МПа) представлено в табл. 1.



## ВИСНОВКИ

1. Стан нормативних документів щодо вирішення питань міцності і класу бетону на стиск потребує перегляду і узгодження цих нормативів.

2. При виконанні неруйнівних випробувань слід прискіпливо виконувати вказівки відповідних стандартів. Порухення цієї вимоги призводить до невідповідної оцінки міцності і класу бетону у виробках.

3. Для вирішення спірних питань з оцінки міцності бетону в конструкціях і збірних бетонних елементах рекомендується користуватися відповідними ДСТУ Б В.2.7-223:2009 і ДСТУ Б EN 13791:2013 (EN 13791:2007, IDT), та, у разі необхідності збільшення обсягів контролю, коригувати неруйнівні випробування за результатами випробувань еталонних зразківквернів.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Gibb, Ian & Harrison, Tom. Use of control charts in the production of concrete. – MPA/BRMCA – ERMCO. 2010 – 43 p.
2. Рунова Р.Ф., Руденко И.И., Троян В.В. К вопросу о корректировке нормативов по определению прочности бетона // Будівельні конструкції: зб. наукових праць. – Київ: ДП НДІБК, 2013. – С. 371-378.
3. ДБН В.1.2-2:2006 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. – Чинні від 2007-01-01. – Київ: Український науково-дослідний та проектний інститут сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського, 2006. – I, 75 с.
4. ДБН В.1.2-14:2018 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. – Чинні від 2019-01-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2018. – III, 30 с.
5. ДБН В.2.3-22:2009 Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування. – Чинні від 2010-03-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2009. – 73 с.
6. ДБН В.2.6-98:2009 Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – Чинні від 2011-06-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2011. – I, 71 с.
7. ДСТУ Б В.2.6-4-95 (ГОСТ 22904-93) Конструкції залізобетонні. Магнітний метод визначення товщини захисного шару бетону і розташування арматури. – Чинний від 1995-01-01. – Київ: Укрархбудінформ, 1996. – III, 16 с.

8. ДСТУ Б В.2.7-43-96 Будівельні матеріали. Бетони важкі. Технічні умови. – Чинний від 1997-01-01. – Київ: Укрархбудінформ, 1997. – III, 22 с.
9. ДСТУ Б В.2.7-214:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. – Чинний від 2010-09-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2010. –IV, 36 с.
10. ДСТУ Б В.2.7-220:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю. – Чинний від 2010-09-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2010. – IV, 20 с.
11. ДСТУ Б В.2.7-223:2009 Бетони. Методи визначення міцності за зразками, відібраними з конструкцій. – Чинний від 2010-09-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2010. – IV, 12 с.
12. ДСТУ Б В.2.7-224:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Правила контролю міцності. – Чинний від 2010-09-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2010, IV, 14 с.
13. ДСТУ Б В.2.7-226:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Ультразвуковий метод визначення міцності. – Чинний від 2010-09-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2010. – IV, 22 с.
14. ДСТУ Б EN 13791:2013 Оцінка міцності бетону на стиск в конструкціях і збірних бетонних елементах (EN 13791:2007, IDT). – Чинний від 2014-01-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2013. – VI, 34 с.
15. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1992-1-2:2004, IDT). – Чинний від 2014-07-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2013. – VI, 134 с.

## REFERENCES

1. Gibb, I. & Harrison, T. (2010). Use of control charts in the production of concrete. MPA/BRMCA – ERMCO [in English].
2. Runova, R.F., Rudenko, I.I. & Troian, V.V. (2013). On the issue of revising the standards for the concrete strength determination. Building Constructions: Coll. of Research Papers, 371-378. K.: SE NIISK [in Ukrainian].
3. System of reliability and safety of building projects. Loads and impacts. Design standards. (2006). DBN V.1.2-2:2006 from 1<sup>st</sup> January 2007. K.: OJSC «V.Shimanovsky Ukrainian Research and Design Inst. of Steel Construction» [in Ukrainian].



4. General principles for reliability and constructive safety ensuring of buildings and civil engineering works. (2018). DBN V.1.2-14:2018 from 1<sup>st</sup> January 2019. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
5. Transport facilities. Bridges and pipes. Basic design requirements. (2009). DBN V.2.3-22:2009 from 01<sup>st</sup> March 2010. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
6. Buildings and facilities structures. Concrete and reinforced concrete structures. Main provisions. (2011). DBN V.2.6-98:2009 from 01<sup>st</sup> June 2011. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
7. Reinforced concrete structures. Magnetic method for determining the concrete protective layer thickness and reinforcement location. (1996). DSTU B V.2.6-4-95 (GOST 22904-93) from 1<sup>st</sup> January 1995. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
8. Building materials. Heavy weight concretes. Specifications. (1997). DSTU B V.2.7-43-96 from 1<sup>st</sup> January 1997. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
9. Building materials. Concretes. Methods for strength determination using reference specimens. (2010). DSTU B V.2.7-214:2009 from 1<sup>st</sup> September 2010. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
10. Building materials. Concretes. Determination of strength by mechanical methods of nondestructive testing. (2010). DSTU B V.2.7-220:2009 from 1<sup>st</sup> September 2010. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
11. Building materials. Concretes. Methods of strength evaluation on cores drilled from structures. (2010). DSTU B V.2.7-223:2009 from 1<sup>st</sup> September 2010. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
12. Building materials. Concretes. Rules for the strength control. (2010). DSTU B V.2.7-224:2009 from 1<sup>st</sup> September 2010. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
13. Building materials. Concretes. Ultrasonic method of strength determination. (2010). DSTU B V.2.7-226:2009 from 1<sup>st</sup> September 2010. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
14. Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components. (2013). DSTU B EN 13791:2013 (EN 13791:2007, IDT) from 1<sup>st</sup> January 2014. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
15. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire

design. (2013). DSTU-N B EN 1992-1-2:2012 (EN 1992-1-2:2004, IDT) from 1<sup>st</sup> July 2014. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].

Стаття надійшла до редакції 21.04.2018 року.



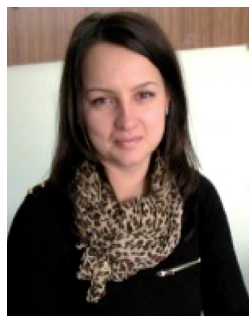
УДК 691.553



**ДВОРКІН Л.Й.**  
Др технічних наук, проф., зав. каф.,  
Національний університет  
водного господарства та при-  
родокористування,  
м. Рівне, Україна  
e-mail: dvorkin.leonid@gmail.com,  
тел.: +38 (068) 353-33-38,  
ORCID: 0000-0001-8759-6318



**БОРДЮЖЕНКО О.М.**  
Канд. технічних наук, доц.,  
Національний університет водно-  
го господарства та природокори-  
стування,  
м. Рівне, Україна  
e-mail: bord@nuwn.edu.ua,  
тел.: +38 (067) 528-73-31,  
ORCID: 0000-0003-3686-5121



**КОВАЛИК І.В.**  
Канд. технічних наук,  
ст. викладач, Національний  
університет водного господар-  
ства та природокористування,  
м. Рівне, Україна  
e-mail: i.v.kovalyk@nuwm.edu.ua,  
тел.: +38 (097) 791-27-45,  
ORCID: 0000-0002-2130-5319



**МАРЧУК В.В.**  
Канд. технічних наук,  
ст. викладач, Національний  
університет водного gospodar-  
ства та природокористування,  
м. Рівне, Україна  
e-mail: v.v.marchuk@nuwm.edu.ua,  
тел.: +38 (097) 874-11-44,  
ORCID: 0000-0003-0999-0402

## РОЗРАХУНОК СКЛАДУ СУХОЇ БУДІВЕЛЬНОЇ СУМІШІ ЗА КРИТЕРІЄМ МІНІМАЛЬНОЇ ВАРТОСТІ

### АНОТАЦІЯ

У статті наведено результати експериментальних досліджень гіпсо-перлітових штукатурних розчинів на основі сухих будівельних сумішей. Приведено і проаналізовано експериментально-статистичні моделі технологічних та фізико-механічних властивостей розчинових сумішей та розчинів, показано шляхи їх покращення. Розглядається приклад вирішення задачі оптимізації складів гіпсо-перлітової сухої суміші. На основі отриманих даних запропонований розрахунок складу сухої будівельної суміші за критерієм мінімальної вартості.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** сухі будівельні суміші, розрахунок складу, спучений перлітовий пісок, будівельний розчин, міцність, ефір целюлози.

### CALCULATION OF THE CONTENT OF DRY BUILDING MIXTURE DUE TO MINIMUM-COST CRITERION

**DVORKIN L.Y.** Dr, Prof., Head of a chair, National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine,  
e-mail: dvorkin.leonid@gmail.com,

tel.: +38 (068) 353-33-38,  
ORCID: 0000-0001-8759-6318

**BORDUZHENKO O.M.** PhD, Ass. Prof., National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine,

e-mail: bord@nuwn.edu.ua,  
tel.: +38 (067) 528-73-31,  
ORCID: 0000-0003-3686-5121

**KOVALYK I.V.** PhD, Sen. Teacher, National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine,

e-mail: i.v.kovalyk@nuwm.edu.ua,  
tel.: +38 (097) 791-27-45,  
ORCID: 0000-0002-2130-5319

**MARCHUK V.V.** PhD, Sen. Teacher, National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine,

e-mail: v.v.marchuk@nuwm.edu.ua,  
tel.: +38 (097) 874-11-44,  
ORCID: 0000-0003-0999-0402

### ABSTRACT

Existing design approaches for building mixture composition do not consider the interaction between



the mixture components most often. It decreases the design efficiency and accuracy. The paper deals with the methodology for design of optimal building mixture composition based on minimal cost criterion. Such a methodology can be used for various construction mixtures, including for dry mixtures. The current investigation enables to find the influence of the main factors (water demand, content of the main binder and various fillers and additives) on compressive and flexural strengths of the gypsum-perlite mixture mortar. The study has also enabled to obtain corresponding mathematical models of mortar properties. Based on the models, a methodology for design of mixture composition is developed and it uses methods of mathematical programming. The proposed methodology allows obtaining optimal building mixture composition taking into account the required properties of mortar and its minimal cost.

Based on the obtained mathematical models, a design method for building mixture composition was proposed. This method allows to take into account the special properties of the investigated materials and to provide an easy optimization of mixture composition according to the given minimum-cost criterion. An additional advantage of the proposed method is a possibility to add a certain number of limitations. It allows to satisfy many quality indexes simultaneously according to the given value.

In the authors' opinion, application of the proposed method in the production of building mixtures enables more efficient use of raw materials and ensure high-quality mortars.

**KEY WORDS:** dry mixture, mortar, optimization, mixture design, minimal cost.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Розвиток виробництва сухих будівельних сумішей (СБС) диктує необхідність виробництва ефективних місцевих сухих сумішей з високими будівельно-технічними характеристиками за доступними для широкого споживача цінами. Цього можна досягти за рахунок раціонального використання сировинної бази, залучення у виробництво відходів промисловості, оптимізації складів і властивостей продукції [1, 2]. У зв'язку з цим необхідний комплексний підхід до проектування СБС, який охоплював би планомірну розробку складів залежно від вибору сировинних компонентів та підтвердженні необхідних якісних показників розчинових сумішей та розчинів. В цьому аспекті перспективними є будівельні матеріали та вироби на основі гіпсових в'язучих. Гіпсові в'язучі речовини і матеріали на їх основі мають ряд переваг у порівнянні з матеріалами на основі портландцементу. В першу чергу, це відсутність усадочних деформацій, швидкий набір міцності, хороші тепло- і звукоізоляційні властивості, достат-

ня вогнестійкість, низька питома витрата палива і енергії (приблизно в 4-5 разів менше в порівнянні з виробництвом цементу) [3]. Крім того, використання гіпсових матеріалів для внутрішнього оздоблення забезпечує сприятливий клімат всередині приміщень за рахунок здатності матеріалу «дихати», легко поглинати і віддавати вологу.

Однак, відсутність ефективної методики проектування складів СБС різного призначення призводить до того, що їх виробництво супроводжується перевитратою вартісних сировинних компонентів або не забезпечує необхідні якісні показники.

## АНАЛІЗ ОСТАННІХ ПУБЛІКАЦІЙ

На сьогоднішній день аналіз, розробка та удосконалення рецептур є питаннями, що цікавлять більшість виробників СБС. Найбільш важливим фактором для оптимізації складів є зменшення витрат вартісних компонентів і зниження собівартості кінцевої продукції. Дуже часто виробники намагаються поліпшити якість суміші за рахунок підвищеної кількості в'язучого або введенням хімічних добавок. Однак, кожна добавка має свій механізм взаємодії з в'язучим, і, як правило, проявляє як позитивні, так і негативні ефекти [4]. При використанні великої кількості добавок відбувається суттєве збільшення собівартості сухої суміші при незначному покращенні її робочих характеристик. Тому важливим питанням є розробка складів СБС на основі гіпсу з максимальним використанням доступних місцевих дешевих сировинних ресурсів і оптимальним вмістом вартісних компонентів різного функціонального призначення.

Для кожного з видів СБС нормується комплекс певних властивостей, який обумовлений особливостями їх експлуатації. Якість СБС в першу чергу визначається їх складом [5, 6].

Підбір складів зазвичай зводиться до мінімізації витрат в'язучого та вартісних добавок за умови забезпечення необхідних фізико-механічних властивостей як розчинових сумішей, так і затверділих розчинів.

Перші приклади розв'язування задач проектування оптимальних складів розчинів на основі СБС наведені в роботах [7-10].

На даний час не розроблена загальна методологія проектування складів СБС. Розробка такої методології ускладнюється відсутністю загальних розрахункових залежностей, які зв'язують властивості суміші з їх речовинним складом. Отримання таких залежностей можливе при використанні методів математичного планування експерименту. Такі методи дозволяють отримати експериментально-статистичні моделі властивостей сумішей і розчинів на їх основі і дозволяють при відповідному аналізі запропонувати найбільш раціональний склад суміші, що забезпечує комплекс нормованих властивостей. Для одержання поліноміальних моделей властивостей застосовують різні типові плани, що дозволя-



ють варіювати досліджувані фактори на двох, трьох і більше рівнях, оптимізуючи число дослідів та інші статистичні параметри [11].

Враховуючи, що до складу СБС входить значна кількість компонентів, вартість яких може бути співставна з вартістю цементу, в якості критерію оптимізації складів СБС може виступати їх загальна вартість за умови забезпечення нормованих властивостей та ряду встановлених обмежень.

**МЕТА РОБОТИ** полягає у розробці методики розрахунку складу СБС за критерієм мінімальної вартості за умови забезпечення необхідних якісних показників.

### МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В якості вихідних компонентів були використані: гіпсове в'язуче Г-5 Н ІІ ПАТ «Івано-Франківськцемент», спучений перлітовий пісок М100, фракції 0,16...1,25 мм, вапнякове борошно ПрАТ «Гіпсовик» м. Кам'янець-Подільський, вапно гідратне Calmit CL90S, ефір целюлози Joincef МК70М та ефір крохмалю АМІТРОЛІТ 8850. Витрата води визначалась експериментально для забезпечення рухомості суміші 8 см. Виготовлення та випробування зразків проводили згідно ДСТУ Б.В.2.7-126-2011.

Постановку задачі знаходження оптимального складу СБС із заданими показниками якості можна сформулювати наступним чином: знайти значення факторів складу СБС  $x_1... x_n$ , що дозволяють мінімізувати його вартість:

$$V_p = V_1K_1 + V_2K_2 + V_3K_3 + \dots + V_n \cdot K_n \rightarrow \min \quad (1)$$

за умови забезпечення необхідних показників якості розчину

$$\begin{aligned} P_1 &\geq f(x_1, x_2, \dots, x_n); \\ P_2 &\geq f(x_1, x_2, \dots, x_n); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} P_m &\geq f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{при } x_1 \dots x_n &\in [a \dots b], \end{aligned} \quad (3)$$

де  $V_1, V_2, V_3 \dots V_n$  – відповідно вартість компонентів СБС, у.о./кг;  $K_1, K_2, K_3 \dots K_n$  – відповідно витрата компонентів СБС, кг/м<sup>3</sup>;  $P_1 \dots P_m$  – задані показники якості розчину;  $x_1 \dots x_n$  – фактори складу;  $a, b$  – обмеження на можливі значення факторів.

Розв'язування такої задачі можливе за допомогою методів математичного програмування. Програмне середовище Microsoft Excel, зокрема його додаток «Пошук рішення», дозволяє вирішувати задачі даного типу, застосовуючи вказані методи. Даний додаток призначений для пошуку рішення рівнянь та задач оптимізації.

Для отримання поліноміальних моделей властивостей розчинових сумішей та розчинів були виконані алгоритмізовані експерименти відповідно до трирівневого п'ятифакторного плану НаБ [11].

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Відповідно до умов планування (табл. 1), проведено комплекс необхідних експериментальних досліджень, результати яких наведено у табл. 2-3.

Після проведення обробки і статистичного аналізу експериментальних даних, отримано математичні моделі міцності розчину на стиск та розтяг при згині стандартних зразків балочок 40×40×160 мм у віці 7 діб, середньої густини розчину та водопотреби суміші. Адекватність отриманих моделей підтверджена відповідними критеріями Фішера.

Моделі міцності розчину на стиск та розтяг при згині у віці 7 діб (МПа), його густини (кг/м<sup>3</sup>) та витрати води (% від маси суміші) представлено в кодованому вигляді, відповідно:

$$\begin{aligned} f_m^7 = & 2,456 - 0,050X_1 + 0,044X_2 + 0,006X_3 - 0,106X_4 + \\ & 0,183X_5 + 0,161X_1^2 + 0,211X_2^2 + 0,561X_3^2 - 0,339X_4^2 - \\ & 0,439X_5^2 - 0,144X_1X_2 - 0,069X_1X_3 - 0,156X_1X_5 - \\ & 0,069X_2X_3 - 0,156X_2X_5 + 0,044X_3X_4 + 0,269X_3X_5; \end{aligned} \quad (4)$$

Таблиця 1. Умови планування експерименту

Фактори впливу		Рівні варіювання			Інтервал
Натуральні	Кодовані	-1	0	1	
Відношення перліту до гіпсу, П/Г	X <sub>1</sub>	0,02	0,04	0,06	0,02
Відношення вапнякового борошна до гіпсу, Вб/Г	X <sub>2</sub>	0,4	0,6	0,8	0,2
Відношення вапна пушонки до гіпсу, Вп/Г	X <sub>3</sub>	0,17	0,37	0,57	0,2
Вміст ефіру целюлози ЕЦ, % від маси суміші	X <sub>4</sub>	0,23	0,25	0,27	0,02
Вміст ефіру крохмалю ЕКр, % від маси суміші	X <sub>5</sub>	0,03	0,05	0,07	0,02





Таблиця 2. Матриця планування та склади гіпсо-перлітової суміші

№ т. плану	Натуральні значення факторів					Витрати компонентів					
	П/Г	В6/Г	Вп/Г	ЕЦ, %	ЕКр, %	Гіпс, кг/т	Спучений перліт (П), кг/т	Вапнякове борошно (В6), кг/т	Вапно пушонка (Вп), кг	Ефір целюлози (ЕЦ), %	Ефір крохмалю ЕКр, %
1	0,06	0,8	0,057	0,27	0,07	520	31,2	416	29,6	2,7	0,7
2	0,02	0,4	0,057	0,27	0,07	675	13,5	269	38,5	2,7	0,7
3	0,02	0,8	0,017	0,23	0,03	543	10,9	434	9,2	2,3	0,3
4	0,06	0,4	0,017	0,23	0,03	675	40,5	270	11,5	2,3	0,3
5	0,02	0,8	0,017	0,27	0,07	543	10,9	434	9,2	2,7	0,7
6	0,06	0,4	0,017	0,27	0,07	675	40,5	269	11,5	2,7	0,7
7	0,06	0,8	0,057	0,23	0,03	520	31,2	416	29,7	2,3	0,3
8	0,02	0,4	0,057	0,23	0,03	675	13,5	270	38,5	2,3	0,3
9	0,02	0,8	0,057	0,27	0,03	531	10,6	424	30,3	2,7	0,3
10	0,06	0,4	0,057	0,27	0,03	657,	39,4	262	37,5	2,7	0,3
11	0,06	0,8	0,017	0,23	0,07	531	31,9	424	9,0	2,3	0,7
12	0,02	0,4	0,017	0,23	0,07	693	13,9	277	11,8	2,3	0,7
13	0,02	0,8	0,057	0,23	0,07	531	10,6	424	30,3	2,3	0,7
14	0,06	0,4	0,057	0,23	0,07	657	39,4	262	37,5	2,3	0,7
15	0,06	0,8	0,017	0,27	0,03	531	31,9	424	9,0	2,7	0,3
16	0,02	0,4	0,017	0,27	0,03	693	13,9	277	11,8	2,7	0,3
17	0,06	0,6	0,037	0,25	0,05	587	35,3	352	21,7	2,5	0,5
18	0,02	0,6	0,037	0,25	0,05	601	12,0	361	22,3	2,5	0,5
19	0,04	0,8	0,037	0,25	0,05	531	21,2	424	19,7	2,5	0,5
20	0,04	0,4	0,037	0,25	0,05	675	27,0	270,0	25,0	2,5	0,5
21	0,04	0,6	0,057	0,25	0,05	587	23,5	352	33,5	2,5	0,5
22	0,04	0,6	0,017	0,25	0,05	601	24,1	361	10,2	2,5	0,5
23	0,04	0,6	0,037	0,27	0,05	594	23,8	356	22,0	2,7	0,5
24	0,04	0,6	0,037	0,23	0,05	594	23,8	356	22,0	2,3	0,5
25	0,04	0,6	0,037	0,25	0,07	594	23,8	356	22,0	2,5	0,7
26	0,04	0,6	0,037	0,25	0,03	594	23,8	356	22,0	2,5	0,3
27	0,04	0,6	0,037	0,25	0,05	594	23,8	356	22,0	2,5	0,5

$$f_{ff}^2 = 1,863 - 0,022X_1 + 0,022X_2 - 0,039X_3 - 0,011X_4 + 0,017X_5 + 0,132X_1^2 + 0,132X_2^2 - 0,018X_3^2 - 0,068X_4^2 + 0,082X_5^2 + 0,013X_1X_2 + 0,025X_1X_4 - 0,088X_1X_5 + 0,013X_2X_3 - 0,038X_2X_4 + 0,075X_3X_4 + 0,013X_4X_5; \quad (5)$$

$$\rho_o = 998,92 - 67,99X_1 + 9,45X_2 + 3,55X_3 - 3,39X_4 - 4,49X_5 + 37,19X_1^2 + 0,69X_2^2 - 0,30X_3^2 + 0,19X_4^2 + 0,19X_5^2 + 4,81X_1X_2 + 5,18X_1X_3 + 6,18X_2X_3 + 6,81X_2X_4 + 2,56X_2X_5 - 6,56X_3X_4 - 2,06X_3X_5 - 5,43X_4X_5; \quad (6)$$

$$B = 53,31 + 2,057X_1 - 1,223X_2 + 0,448X_3 + 0,333X_4 - 0,194X_5 + 0,79X_1^2 + 0,79X_2^2 + 0,29X_3^2 + 0,29X_4^2 + 0,04X_5^2 - 0,218X_1X_2 - 0,531X_1X_3 - 0,281X_1X_4 + 0,406X_2X_4 - 0,281X_2X_5 - 0,343X_3X_5 - 0,281X_4X_5. \quad (7)$$

Аналіз наведених моделей дозволяє проранжувати вплив дослідних факторів на основні властивості гіпсо-перлітового розчину (табл. 4).

Для даного випадку визначальними параметрами якості розчину приймаємо його міцність на стиск у віці 7 діб та середню густину. Тоді задача знаходження оптимального складу виглядатиме наступним чином: знайти значення факторів складу розчину  $x_1 \dots x_5$ , що дозволяють мінімізувати його вартість:

$$BP = B_e \cdot \Gamma + B_{II} \cdot \Pi + B_{B6} \cdot B_6 + B_{Bn} \cdot B_n + B_{Ц} \cdot Ц + B_{Кр} \cdot K_p \rightarrow \min \quad (8)$$



Таблиця 3. Експериментальні значення властивостей штукатурного розчину

№ т. плану	Міцність розчину на стиск, МПа		Міцність розчину на розтяг при згині, МПа		Середня густина $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	Водопотреба В, %
	3 доби	7 діб	3 доби	7 діб		
	$f_m^3$ , МПа	$f_m^7$ , МПа	$f_{lf}^3$ , МПа	$f_{lf}^7$ , МПа		
1	1,82	2	1,9	1,5		
2	2,63	3,1	2	2	1031	54
3	2,52	3	1,9	2,2	1064	49
4	1,85	1,95	1,7	1,6	929	57
5	2,43	2,9	1,6	2,05	1080	50
6	1,73	1,75	1,8	1,46	910	58
7	1,39	1,9	1,7	1,7	976	54
8	2,30	2,6	1,7	2,1	1087	54
9	2,50	2,3	1,9	2,2	1093	55
10	1,78	1,95	1,7	1,6	931	57
11	1,90	1,8	1,9	1,53	936	54
12	2,30	2,9	1,8	2	1084	53
13	2,50	3,3	1,6	1,95	1093	50
14	1,87	1,8	1,8	1,55	942	58
15	1,91	2,3	1,7	1,46	960	54
16	2,44	3	2,1	2,1	1085	52
17	1,76	1,9	1,6	1,8	938	56
18	2,23	2,9	1,8	1,8	1088	49
19	2,50	2,4	1,9	1,92	980	53
20	2,30	2,3	1,5	1,82	973	52
21	2,50	2,3	1,6	1,82	975	53
22	1,80	2,1	1,5	1,92	976	52
23	1,60	2,3	1,4	1,87	976	53
24	1,70	2,4	1,7	1,88	976	52
25	1,60	2,3	1,5	1,87	974	52
26	1,80	2	1,6	1,88	975	52
27	2,00	2,5	1,8	1,86	977	52

Таблиця 4. Вплив факторів на властивості розчину

Властивість	Вплив факторів
Міцність розчину на стиск у віці 7 діб, МПа	$X_5 > X_4 > X_1 > X_2 > X_3$
Міцність розчину на розтяг при згині у віці 7 діб, МПа	$X_3 > X_1 > X_2 > X_5 > X_4$
Середня густина, кг/м <sup>3</sup>	$X_1 > X_2 > X_3 > X_5 > X_4$
Витрати води, % від маси суміші	$X_1 > X_2 > X_3 > X_4 > X_5$



за умови забезпечення необхідних показників якості

$$f_m^7 \geq f(x_1, x_2, \dots, x_5); \quad (9)$$

$$\rho_o \leq f(x_1, x_2, \dots, x_5);$$

$$\text{при } x_1, \dots, x_5 \in [-1 \dots +1], \quad (10)$$

де  $B_{\vartheta}$ ,  $B_{\Gamma}$ ,  $B_{B\vartheta}$ ,  $B_{B\Gamma}$ ,  $B_{\Gamma}$ ,  $B_{Kp}$  – відповідно вартість гіпсового в'язучого, перліту, вапнякового борошна, гідратного вапна, добавки ефіру целюлози та ефіру крохмалю, у.о./кг;  $\Gamma$ ,  $\Pi$ ,  $B\delta$ ,  $Bn$ ,  $EЦ$ ,  $EКp$  – відповідно витрата гіпсового в'язучого, перліту, вапнякового борошна, гідратного вапна, добавки ефіру целюлози та ефіру крохмалю, кг/м<sup>3</sup> суміші.

Переведення значень параметрів складу гіпсоперлітової штукатурної суміші в кодований вигляд виконується за наступними залежностями:

$$x_1 = \frac{\Pi/\Gamma - 0,04}{0,02}; \quad x_2 = \frac{B\delta/\Gamma - 0,6}{0,2}; \quad x_3 = \frac{Bn/\Gamma - 0,37}{0,2};$$

$$x_4 = \frac{EЦ - 0,25}{0,02}; \quad x_5 = \frac{EКp - 0,05}{0,02}. \quad (11)$$

З урахуванням отриманих моделей (4-7) були побудовані графічні залежності вихідних параметрів від двох факторів впливу (рис. 1 – 4). При цьому фактори, не представлені на кожному з графіків, були зафіксовані на нульовому рівні.

Аналізуючи отриману експериментально-статистичну модель міцності на стиск (4), можна відзначити, що найбільш суттєвим фактором, який на неї впливає, є вміст перліту по відношенню до гіпсового в'язучого ( $X_1$ ), збільшення якого від -1 до +1 (від  $\Pi/\Gamma=0,02$  до  $\Pi/\Gamma=0,06$ ) призводить до зменшення міцності на 35%.

Характер залежностей міцності на розтяг при згині, що побудовані на основі моделі (5) суттєво не відрізняються (рис. 2). Фактором, що найбільше

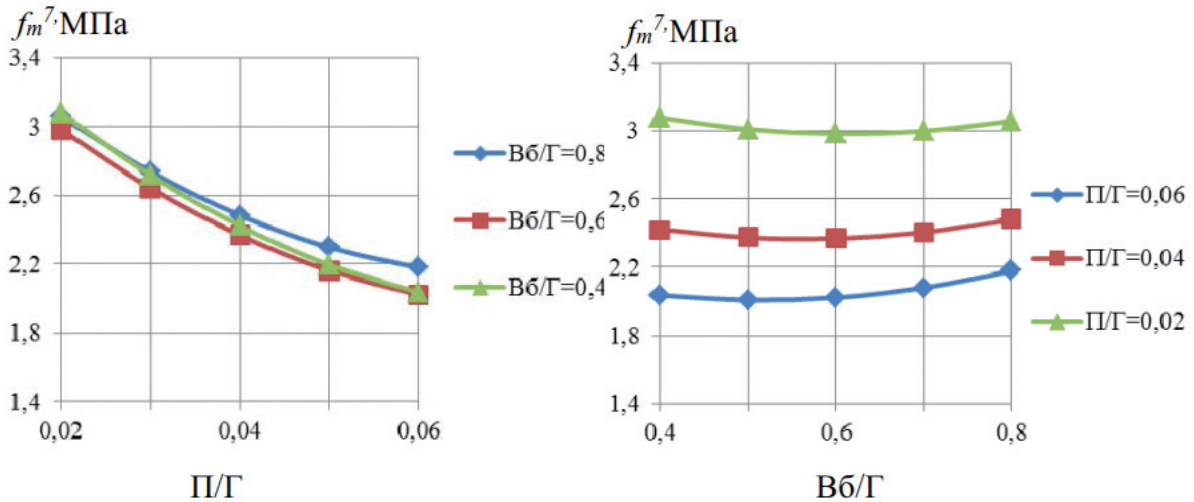


Рис. 1. Залежність міцності на стиск штукатурного розчину у віці 7 діб від вмісту перліту ( $\Pi/\Gamma$ ) та вапнякового борошна ( $B\delta/\Gamma$ )

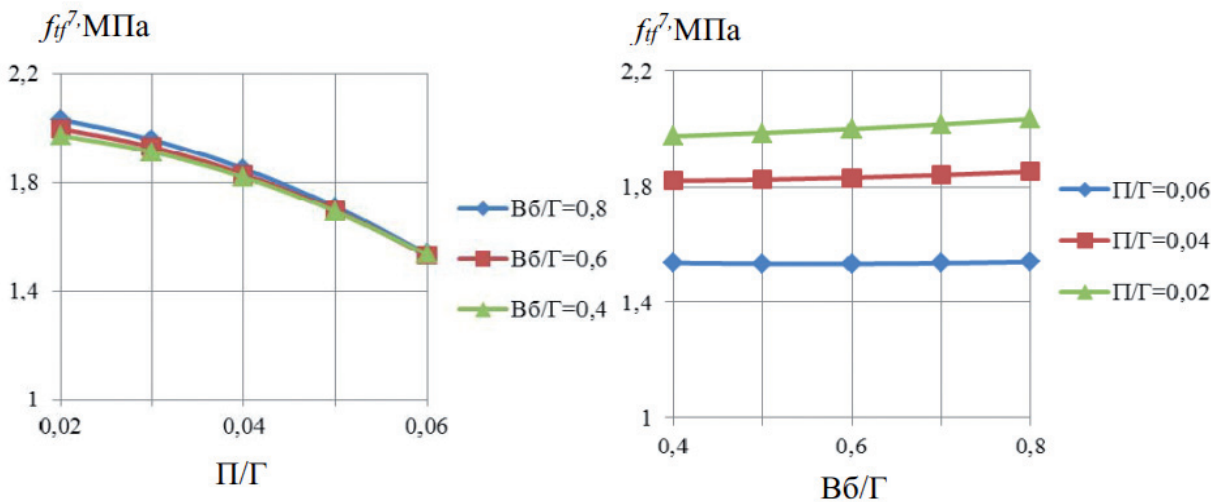


Рис. 2. Залежність міцності на згин штукатурного розчину у віці 7 діб від вмісту перліту ( $\Pi/\Gamma$ ) та вапнякового борошна ( $B\delta/\Gamma$ )

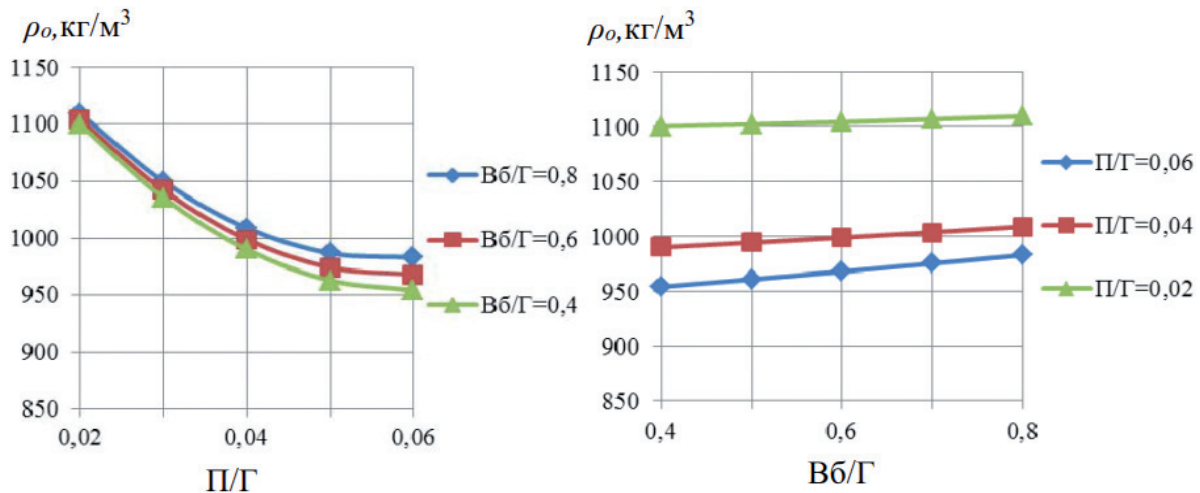


Рис. 3. Залежність густини штукатурного розчину від вмісту перліту ( $\Pi/\Gamma$ ) та вапнякового борошна ( $Vb/\Gamma$ )

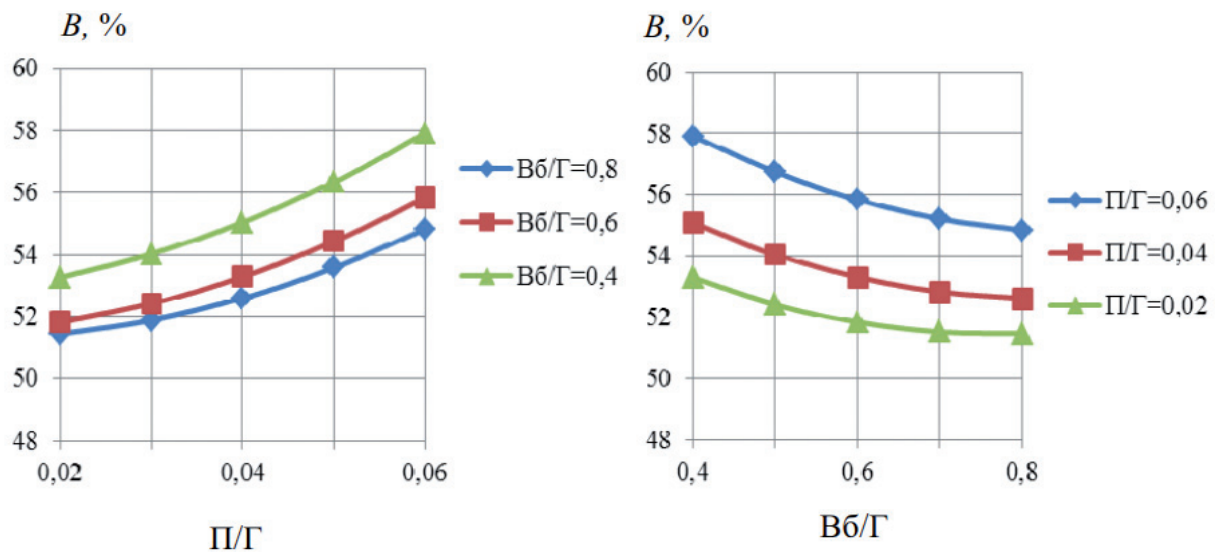


Рис. 4. Залежність витрати води від вмісту перліту ( $\Pi/\Gamma$ ) та вапнякового борошна ( $Vb/\Gamma$ )

впливає на міцність на згин, є також відношення вмісту перліту до гіпсового в'язучого ( $X_1$ ). Збільшення вмісту вапнякового борошна ( $X_2$ ) та інших факторів у варійованих межах суттєво не впливають на міцність досліджуваних штукатурних розчинів.

Аналіз моделі густини розчину та відповідних графічних залежностей (рис. 3) дає можливість встановити, що найбільш впливовим фактором, який зменшує густину розчину, є вміст перліту  $\Pi/\Gamma$  ( $X_1$ ). Значення його лінійного коефіцієнта у рівнянні регресії (6) суттєво перевищує значення коефіцієнтів для чотирьох інших факторів.

Аналізуючи отриману експериментально-статистичну модель з визначення витрати води (7) та графічні залежності (рис. 4), слід відмітити, що очікувана із збільшенням вмісту перліту ( $\Pi/\Gamma$ ) від 0,02 до 0,06 витрата води збільшується в середньому на 10%. Вплив інших досліджуваних факторів можна вважати несуттєвим.

Для того, щоб розрахувати оптимальний склад гіпсо-перлітової штукатурної суміші, необхідно

розв'язати задачу математичного програмування з наступною постановкою: знайти такий склад суміші, який би дозволяв забезпечити необхідні показники якості розчину за мінімальної сумарної вартості в межах допустимих значень факторів.

В нашому випадку показниками якості виступають міцність на стиск у віці 7 діб та густина розчину. Причому, міцність повинна бути не меншою певного значення, а густина розчину – не більшою певного значення.

#### ПОСЛІДОВНІСТЬ РОЗРАХУНКУ НАСТУПНА

Підставляємо у моделі (4) і (6) значення міцності та густини, що повинні забезпечуватись, а у вираз (8) – значення вартості компонентів гіпсо-перлітової суміші. У виразі (10) встановлюємо обмеження значень факторів (в кодованих значеннях від -1 до 1). Далі програма перебирає різні комбінації факторів, забезпечуючи не менше заданого значення міцності та не більше заданого значення густини за виразами (4) та (6), мінімізуючи при цьому функцію (8).



Результатом таких ітерацій є визначення оптимальних значень факторів складу:  $\Pi/\Gamma$ ,  $B\delta/\Gamma$ ,  $Vn/\Gamma$ ,  $EЦ$ ,  $EКр$ . Витрату води визначаємо за рівнянням (7).

Значення витрати гіпсового в'язучого знаходимо за виразом:

$$\Gamma = \frac{1000 - (EЦ + EКр)}{\Pi/\Gamma + B\delta/\Gamma + Vn/\Gamma + 1}, \quad (12)$$

### ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

Необхідно визначити склад гіпсо-перлітового штукатурного розчину з міцністю у віці 7 діб на стиск 2,3 МПа з середньою густиною 950 кг/м<sup>3</sup> із рухомістю суміші 8 см, використовуючи експериментально-статистичні моделі (4-6). Приймаємо вартості основних компонентів гіпсо-перлітової суміші наступними, у.о./кг:  $\Gamma=2$ ;  $\Pi=10$ ;  $B\delta=1$ ;  $Vn=4$ ;  $EЦ=190$ ;  $EКр=104$ .

Матеріали: гіпсове в'язуче Г-5, спучений перлітовий пісок марки М100, фракції 0,16...1,25 мм; вапнякове борошно фракції 0...0,63 мм; вапно гідратне, ефір целюлози та ефір крохмалю.

1. Підставляючи значення міцності на стиск у віці 7 діб ( $f_m^7 \geq 2,3$ ) та густини ( $\rho_o \leq 950$ ) у вирази (4) та (6), отримуємо функції обмежень (9) задачі.

2. У вираз (8) підставляємо значення вартості компонентів суміші, а також задаємо обмеження значень факторів: від -1 до 1 (в кодованому вигляді).

3. За допомогою програмного додатку «Пошук рішення» знаходимо значення факторів, що задовольняють обмеження задачі і мінімізують загальну вартість суміші:

$$x_1 = 0,89; x_2 = -0,44; x_3 = -1; x_4 = 0,6; x_5 = 1.$$

За таких значеннях факторів за виразами (4, 6)  $f_m^7 = 2,4$  МПа, а  $\rho_o = 950$  кг/м<sup>3</sup>, що забезпечує необхідні значення міцності та густини розчину.

4. Значення факторів в натуральному вигляді визначаємо за виразами (11):

$$\Pi/\Gamma = 0,02 \cdot x_1 + 0,04 = 0,02 \cdot 0,89 + 0,04 = 0,057;$$

$$B\delta/\Gamma = 0,2 \cdot x_2 + 0,6 = 0,2 \cdot (-0,44) + 0,6 = 0,512;$$

$$Vn/\Gamma = 0,2 \cdot x_3 + 0,37 = 0,2 \cdot (-1) + 0,37 = 0,17;$$

$$EЦ = 0,02 \cdot x_4 + 0,25 = 0,02 \cdot 0,6 + 0,25 = 0,26 \text{ кг/м}^3;$$

$$EКр = 0,02 \cdot x_5 + 0,05 = 0,02 \cdot 1 + 0,05 = 0,07 \text{ кг/м}^3.$$

5. Витрата води, що забезпечить рухомість суміші 8 см, визначиться за рівнянням (7):

- у % від маси суміші:

$$B = 57\%$$

- за масою:

$$B = B \cdot 1000 / 100 = 57 \cdot 1000 / 100 = 570 \text{ л.}$$

6. Витрата гіпсового в'язучого визначалась за виразом (12):

$$\Gamma = \frac{1000 - (EЦ + EКр)}{\Pi/\Gamma + B\delta/\Gamma + Vn/\Gamma + 1} = \frac{1000 - (0,26 + 0,07)}{0,057 + 0,512 + 0,17 + 1} = 572,7 \text{ кг.}$$

7. Значення мінімально можливої вартості 1000 кг гіпсо-перлітової суміші (знаходиться

під час ітерацій в програмному додатку «Пошук рішення», вираз (8)):

$$B_{гпс} = 10 \cdot 33,1 + 1 \cdot 293 + 4 \cdot 97,4 + 190 \cdot 2,63 + 104 \cdot 0,7 + 2 \cdot 573 = 2731,5 \text{ у.о.}$$

Остаточний склад гіпсо-перлітової суміші, кг:

$$\Gamma = 573; \Pi = 33; B\delta = 293; Vn = 97; EЦ = 2,6; EКр = 0,7.$$

На етапі формулювання задачі визначення складу суміші необхідно коректно задаватись бажаними значеннями міцності на стиск та густини. Очевидно, що ці значення повинні знаходитись в межах мінімально та максимально можливого значення вихідного параметру, оскільки саме в цих межах поліноміальна модель адекватно описує досліджувану властивість. Такі значення можна досить легко знайти, використовуючи вже згаданий програмний додаток «Пошук рішення». Так, для розглядуваного прикладу 1, граничні значення міцності та густини в межах області варіювання факторів будуть наступними:

$$f_m^7 = 1,5-3,4 \text{ МПа}; \rho_o = 926-1120 \text{ кг/м}^3.$$

Можливим є також деякий вихід за граничні межі вихідних параметрів. В цьому випадку, поряд із задачею оптимізації вирішується також екстраполяційна задача, що дозволяє приймати значення факторів поза межами області варіювання (наприклад,  $x_1 \dots x_3 = 1,1; 1,2; 1,3$ ). Однак необхідно мати на увазі, що екстраполяція може бути пов'язана з певними помилками і ці помилки стають більш відчутними, чим далі вихід за межі області варіювання. Екстраполяція можлива, якщо за результатами досліджень не виникає сумнівів, що за межами області варіювання факторів характер функції залишається без змін.

Запропонований метод розрахунку складу СБС дозволяє враховувати конкретні особливості досліджуваних матеріалів і оптимізувати склад за заданим критерієм, наприклад критерієм мінімальної вартості.

### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Використання техногенних продуктів у будівництві / [Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Пушкарьова К.К., Кочевих М.О., Мохорт М.А.]. – Рівне: НУВГП, 2009. – 340 с.
2. Dvorkin, L., Dvorkin, O. & Ribakov, Y. (2016). Construction materials Based on Industrial Waste Products, Nova science publishers, pp. 242.
3. L. Dvorkin, O. Dvorkin & S. Nwoubani. (2010). Construction Materials, Nova Science Publishers, Inc. New York, p. 409.



4. H. Sebaalya, S. Varmab & W. James. (2018). Optimizing asphalt mix design process using artificial neural network and genetic algorithm, *Construction and Building Materials*. 168 (20), April, 660-670.
5. A. Vimmrová, M. Keppert, O. Michalko & R. Černý. (2014). Calcined gypsum-lime-metakaolin binders: Design of Optimal Composition Cement and Concrete Composites, 52, September, 91-96.
6. S. Nunes, A. Mafalda Matos, T. Duarte, H. Figueiras & J. Sousa-Coutinho. (2013). Mixture design of self-compacting glass mortar, *Cement and Concrete Composites*. 43, October, 1-11.
7. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Гоц В.І. Випробування бетонів і розчинів. Проектування їх складів. – Київ: Основа, 2014. – 304 с.
8. Design and control of concrete mixtures / by Steven H. Kosmatka ... EB001, 14<sup>th</sup> edition, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2002, pp. 358.
9. Sivaldo L. Correia, Tânia Partala, Felipe C. Loch, A. M. (2010). Segadães Factorial design used to model the compressive strength of mortars containing recycled rubber, *Composite Structures*, 92, Iss. 9, August, 2047-2051.
10. V. Ferrándiz-Mas, L.A. Sarabia, M.C. Ortiz, C.R. Cheeseman, E. García-Alcocel. (2016). Design of bespoke lightweight cement mortars containing waste expanded polystyrene by experimental statistical methods, *Materials & Design*. 89, 901-912.
11. M. Nepomuceno, L. Oliveira, S.M. R. Lopes. (2012). Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders, *Constr. and Building Materials*, 26, Iss. 1, 317-326.
12. L. Dvorkin, O. Dvorkin & Y. Ribakov. (2012). *Mathematical experiments planning in Concrete Technology*. Nova Science Publishers, New York, 173 p.
13. ISO 679:2009. Cement-test methods-determination of strength, international organization for standardization; 01 May, 2009, p. 29.
14. Lazić Živorad, R. (2004). *Design of experiments in chemical engineering: a practical guide*. KCaA Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 610 p.
2. Dvorkin, L., Dvorkin, O. & Ribakov, Y. (2016). *Construction Materials Based on Industrial Waste Products*, Nova scitnce publishers.
3. L. Dvorkin, O. Dvorkin & S. Nwobani. (2010). *Construction Materials*, Nova Science Publishers, Inc. New York.
4. H. Sebaalya, S. Varmab & W. James. (2018). Optimizing asphalt mix design process using artificial neural network and genetic algorithm, *Construction and Building Materials*. 168 (20), April, 660-670.
5. A. Vimmrová, M. Keppert, O. Michalko & R. Černý. (2014). Calcined gypsum-lime-metakaolin binders: Design of Optimal Composition Cement and Concrete Composites, 52, p.91-96.
6. S. Nunes, A. Mafalda Matos, T. Duarte, H. Figueiras & J. Sousa-Coutinho. (2013). Mixture design of self-compacting glass mortar, *Cement and Concrete Composites*. 43, p.1-11.
7. Dvorkin L. (2014) Y. Vyprobuvannia betoniv i rozchyniv. Proektuvannia yikh skladiv / Dvorkin L.I., Dvorkin, O.L., Hots V.I. – K.: Osnova.
8. Design and control of concrete mixtures (2002) / by Steven H. Kosmatka ... EB001, 14<sup>th</sup> edition, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA.
9. Sivaldo L. Correia, Tânia Partala, Felipe C. Loch, A. M. (2010). Segadães Factorial design used to model the compressive strength of mortars containing recycled rubber, *Composite Structures*, 92, Iss. 9.
10. V. Ferrándiz-Mas, L.A. Sarabia, M.C. Ortiz, C.R. Cheeseman, E. García-Alcocel. (2016). Design of bespoke lightweight cement mortars containing waste expanded polystyrene by experimental statistical methods, *Materials & Design*. 89.
11. M. Nepomuceno, L. Oliveira, S.M. R. Lopes. (2012). Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders, *Constr. and Building Materials*, 26, Iss. 1.
12. L. Dvorkin, O. Dvorkin & Y. Ribakov. (2012). *Mathematical experiments planning in Concrete Technology*. Nova Science Publishers, New York.
13. ISO 679:2009. Cement-test methods-determination of strength, international organization for standardization.
14. Lazić Živorad, R. (2004). *Design of experiments in chemical engineering: a practical guide*. KCaA Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.

## REFERENCES

1. *Vykorystannia tekhnohennykh produktiv u budivnytstvi* (2009) / [Dvorkin L.I., Dvorkin O.L., Pushkarova K.K., Kochevykh M.O., Mokhort M.A.]. NUVHP, Rivne.

Стаття надійшла до редакції 27.02.2019 р.

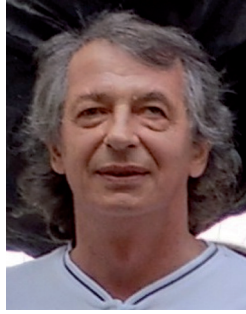


УДК 624.15:534.1



**ТРОФИМЧУК О.М.**

Член-кореспондент НАН України, д-р технічних наук, проф., директор, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна, e-mail: itelua@kv.ukrtel.net, тел.: +38 (044) 245-87-97, ORCID: 0000-0003-3782-4209



**ГОМІЛКО О.М.**

Д-р фізико-математичних наук, проф., пров. науковий співробітник, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна, e-mail: alex@gomilko.com, тел.: +38 (044) 453-26-54, ORCID: 0000-0002-4915-1120



**САВИЦЬКИЙ О.А.**

Д-р технічних наук, ст. науковий співробітник, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна, e-mail: osavitsky@ukr.net, тел.: +38 (044) 453-26-54, ORCID: 0000-0002-9212-1744

## ВЕРТИКАЛЬНИЙ ІМПЕДАНС ФУНДАМЕНТУ НА ШАРІ ВОДОНАСИЧЕНОГО ҐРУНТУ

### АНОТАЦІЯ

Один з методів динамічного аналізу відповідальних споруд – застосування імпедансних чи передаточних функцій частоти, які можуть бути включені до динамічних розрахункових схем будівель, що проектуються. На основі аналізу традиційних та сучасних методів визначення характеристик динамічної взаємодії фундаментів споруд з ґрунтовою основою пропонується для оцінки залежності реакції по підшві фундаменту від частоти у випадках водонасичення пористо-незв'язного ґрунту в основі та горизонтально-шаруватої його неоднорідності використовувати хвильові рівняння руху ґрунтової пористопружної насиченої стисливою і в'язкою рідиною основи (модель Біо двофазного середовища). Методом інтегральних перетворень визначаються символічні вирази точного розв'язку для переміщень фаз на границі основи (під підшвою фундаменту) від розподілених вертикальних гармонічних навантажень на фази. При вертикальних коливаннях малозаглибленого фундаменту (смуги) розглядаються складові реакції з боку твердої пористої та рідинної порової фаз. Функції імпедансу для жорсткої полоси з непроникною для порової

рідини підшвою на шаруватій пористопружній насиченій рідиною (ППНР) основі знаходяться з розв'язку динамічної контактної задачі методом ортогональних поліномів (при поліноміальних розкладаннях реакцій фаз з урахуванням особливостей на контакті) і оригінального програмного забезпечення по заданих геометричним і фізико-механічним параметрам фундаментів та моделі основи. На числових прикладах показано, як реакція (імпеданс) ППНР основи відрізняється від реакції пружного півпростору, а взаємодія між фундаментом з недренованою підшвою і водонасиченим ґрунтом неоднорідна внаслідок змінного (до знаку) тиску порової рідини у пружній пористій матриці під підшвою. Визначаються резонансні частоти для моделі одношарової основи з затисненою тильною гранню в залежності від висоти шару, ширини фундаменту і властивостей матеріалу двофазної основи.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** динамічна взаємодія фундаменту з ґрунтовою основою, водонасичений ґрунт, модель Біо, шарувата основа, функція імпедансу, динамічна контактна задача, метод ортогональних поліномів.



## ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ИМПЕДАНС ФУНДАМЕНТА НА СЛОЕ ВОДОНАСЫЩЕННОГО ГРУНТА

**ТРОФИМЧУК А.Н.** Член-корреспондент НАН Украины, д-р технических наук, проф., директор, Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины, г. Киев, Украина, e-mail: itelua@kv.ukrtel.net, тел.: +38 (044) 245-87-97, ORCID: 0000-0003-3782-4209

**ГОМИЛКО А.М.** Д-р физико-математических наук, проф., вед. научный сотрудник, Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины, г. Киев, Украина, e-mail: alex@gomilko.com, тел.: +38 (044) 453-26-54, ORCID: 0000-0002-4915-1120

**САВИЦКИЙ О.А.** Д-р технических наук, ст. научный сотрудник, Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины, г. Киев, Украина, e-mail: osavitsky@ukr.net, тел.: +38 (044) 453-26-54, ORCID: 0000-0002-9212-1744

### АННОТАЦИЯ

Одним из методов анализа колебаний ответственных сооружений является использование импедансных или передаточных функций частоты, которые могут быть включены в динамические расчетные схемы проектируемых строительных объектов. На основе анализа традиционных и современных методов определения характеристик динамического взаимодействия фундаментов сооружений с грунтовым основанием предлагается для определения зависимости реакции по подошве фундамента от частоты в случаях водонасыщения пористого несвязного грунта в основании и горизонтально-слоистой его неоднородности использовать волновые уравнения движения грунтового пористоупругого насыщенного сжимаемой вязкой жидкостью основания (модель Био двухфазной среды). Методом интегральных преобразований определяются символические выражения точного решения для перемещений фаз на границе основания (под подошвой фундамента) от распределенных вертикальных гармонических нагрузок на фазы. При вертикальных колебаниях малозаглубленного фундамента (полосы) рассматриваются составляющие реакции со стороны твердой пористой и жидкой поровой фаз. Функции импеданса для штампа с непроницаемой для поровой жидкости подошвой на слоистом пористоупругом насыщенном жидкостью (ПУНЖ) двухфазном основании определяются из решения динамической контактной зада-

чи методом ортогональных полиномов (при полиномиальных разложениях реакций фаз с учетом особенностей на контакте) и оригинального программного обеспечения по заданным геометрическим и физико-механическим параметрам фундаментов и модели основания. На численных примерах показано, как реакция (импеданс) ПУНЖ основания отличается от реакции упругого полупространства, а взаимодействие между фундаментом с недренированной подошвой и водонасыщенным грунтом неодностороннее вследствие переменной (до знака) давления поровой жидкости в упругой пористой матрице под подошвой. Определяются резонансные частоты для модели однослойного основания с защемленной тыльной гранью в зависимости от высоты слоя, ширины фундамента и свойств материала двухфазного основания.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** динамическое взаимодействие фундамента с грунтовым основанием, водонасыщенный грунт, модель Био, слоистое основание, функция импеданса, динамическая контактная задача, метод ортогональных полиномов

## THE VERTICAL IMPEDANCE OF THE FOUNDATION ON A WATER-SATURATED SOIL LAYER

**TROFYMCHUK O.M.** Dr., Prof., Director, Institute of Telecommunications and Global Information Space of the NASU, Kyiv, Ukraine, e-mail: itelua@kv.ukrtel.net, тел.: +38 (044) 245-87-97, ORCID: 0000-0003-3782-4209

**HOMILKO O.M.** Dr., Prof., Leading Researcher, Institute of Telecommunications and Global Information Space of the NASU, Kyiv, Ukraine, e-mail: alex@gomilko.com, тел.: +38 (044) 453-26-54, ORCID: 0000-0002-4915-1120

**SAVYTSKYI O.A.** Dr., Prof., Senior Researcher, Institute of Telecommunications and Global Information Space of the NASU, Kyiv, Ukraine, e-mail: osavitsky@ukr.net, тел.: +38 (044) 453-26-54, ORCID: 0000-0002-9212-1744

### ABSTRACT

The impedance or transfer frequency functions are used in the analysis of responsible constructions oscillations in the dynamic computational schemes of designed construction projects. Traditional and modern methods of the characteristics definition for the buildings bases dynamic interaction with the soil basis (kinematic soil-structure interaction) are analyzed. The task of finding the foundation base





response dependence on the frequency in the cases of porous liquid-saturated non-cohesive soils (when using the Biot's soil model of the two-phase media) with horizontally layered inhomogeneity is set. The corresponding wave equations of the movement of the ground base as the porous flexible liquid-saturated (with viscous compressible liquid) media are considered. The symbolic expressions for the exact solution for phases movements at the base border (under the foundation base) caused by the distributed vertical harmonious loads on the each phase are defined by the integral transformations method. The reaction components of the solid and liquid porous phases are considered at vertical oscillations of the shallow base (a rigid strip in two-dimensions).

The impedance functions are determined from the dynamic contact problem solution. The contact reactions distributions (taking into account the theoretical features) are defined by support functions with the orthogonal polynomials method use. Original software is created for the impedance functions calculation by means of the set of the geometrical and physical-mechanical parameters of the foundations and base model. It is shown by numerical examples that the liquid-saturated basis reaction (impedance) differs from the elastic half-space reaction, and the interaction between the foundation with an undrained base and water-saturated soil is not unilateral because of the variable (to a sign) pressure of porous liquid in an elastic porous matrix under a base. The resonant frequencies for the single-layer base model with the jammed back side are determined depending on layer height, foundation width and two-phase base material properties.

**KEY WORDS:** dynamic soil-base interaction, water-saturated soil, Biot's model, layered base, impedance function, dynamic contact problem, orthogonal polynomials method.

Взаємодія малозаглиблених фундаментів, бетонних гребель, плит укосів водо- та інших сховищ, полотна цементобетонних автодоріг та ін. з ґрунтовою основою активно відбувається при динамічних впливах. При сейсмічних та техногенних динамічних діях на системи плита-ґрунт, споруда-ґрунт необхідно виконувати співставлення розрахункових домінуючих частот основи, споруди та динамічного навантаження, передбачати трансформацію сейсмічних дій, оцінювати амплітудно-частотні залежності для зміщень і реакцій, діапазони зміни контактних тисків та реактивних зусиль на підшві, врахувати можливі додаткові осідання для оцінки міцності та стійкості системи фундамент – основа. Для забезпечення сейсмостійкості споруд згідно [4] основними методами врахування сейсмічних впливів залишається коефіцієнт динамічності, а для детального аналізу – спек-

тральний метод та прямий динамічний розрахунок з урахуванням комплексів аналогових акселерограм.

Значна увага динамічному аналізу приділяється при проектуванні та експлуатації споруд підвищеної відповідальності [6], а також виконання рекомендацій Eurocode 8 [7, 22]. Рекомендовано робити порівняльний аналіз результатів, отриманих кількома методами. Для врахування взаємодії споруд з ґрунтовою основою при проектуванні відповідальних об'єктів прийнято застосовувати засоби розрахунку на основі методу скінченних елементів (SCAD, VESNA, PLAXIS, CLASSI, SASSI, ABAQUS, OpenSees та інших) з численими динамічними моделями ґрунтової основи.

Динамічна система «фундамент – ґрунтова основа» може розглядатись як окремий елемент в складі розрахункової схеми споруди. Питання інтеграції в розрахункові схеми тут не розглядаються.

Основними фізичними явищами при цьому, згідно нормативних документів [11], за умови збереження механічної стійкості основи та площі контакту фундаменту з основою є жорсткість основи (пружна реакція) та загасання коливань через внутрішнє тертя в ґрунтовому середовищі (матеріальне) та випромінювання енергії при розповсюдженні хвиль (геометричне). У сейсмічному діапазоні частот (що за різними оцінками не перевищує 5-40 Гц) їх за нормативними документами допускається розглядати незалежними від частоти. Зв'язок динамічних переміщень та реакцій без врахування інерційної взаємодії представляється у вигляді комплексних модулів (передаточні функції [12, 13], або обернені до них функції імпедансу [23, 27]) для заданих розмірів та фізико-механічних властивостей елементів системи. Для будівельних споруд в режимі нормальної експлуатації такі модулі фактично визначаються згідно нормативної методики для динамічної моделі лінійно деформованого ґрунтового середовища без врахування частоти впливу для основних мод коливань.

Але складні динамічні властивості системи споруда - ґрунт (форма підшви, розподіл навантажень, контактні умови, структура ґрунтової основи) примушують звертати увагу на залежність імпедансних функцій від частоти. Врахування залежності від частоти може досягатись розвитком методу розподілених параметрів для складних систем пружин, демпферів, мас та інших додаткових елементів. Практично зрозумілим, але витратним є спосіб використання передаточних чи обернених їм імпедансних (сил, що викликають одиничні переміщення невагомго штампa в певному напрямку на певній частоті) функцій, що знаходяться експериментальним методом



на місці. Кількість таких досліджень обмежена. Визначення функцій методом математичного моделювання отримало розвиток, але потребує додаткової верифікації на основі експериментальних досліджень (наприклад, внаслідок ефекту підвищеного загасання в модельному пружному середовищі). Знаходження таких функцій, їх обґрунтування та використання в динаміці споруд розглядається в роботах [3, 5, 8, 9, 12, 13, 16, 20, 21, 23-27] та багатьох інших.

Значний обсяг досліджень в цьому напрямку присвячено дослідженням сейсмостійкості споруд атомних електростанцій. Наприклад, в статті [16] пояснюються результати розрахунків імпедансних функцій шаруватого середовища за допомогою програмних комплексів SASSI та CLASSI (USA).

Імпеданси фундаменту на ґрунтовій основі визначались у статті [31] з метою досліджень залежності жорсткості та демпфірування від частоти вимушених коливань в діапазоні частот 5-15 Гц для натурної моделі споруди з залізобетонним фундаментом та надбудовою (сталева рама з регульованою жорсткістю). Імпедансні функції представлено для горизонтальної та обертальної форм коливань при змінній жорсткості рами. Експериментальні результати добре узгоджуються з теоретичними результатами для імпедансу штампа на пружному півпросторі, якщо при розрахунках (SASSI) використовувати дещо збільшене значення модуля зсуву ґрунтового середовища та спеціально призначати розрахункову швидкість поперечної хвилі.

Вертикальні коливання фундаменту на водонасиченій ґрунтовій основі можуть суттєво змінюватись в сейсмічному діапазоні частот внаслідок зміни порового тиску на підшви та взаємодії твердої та рідинної фаз у ґрунтовому матеріалі, що підтверджують відомі дослідження [1, 28]. Оцінка динамічної поведінки такої системи при гармонічних коливаннях штампів з проникною та непроникною для порової рідини підшвию на пористопружній насиченій рідиною (ППНР) основі виконувалась на основі розв'язку динамічних контактних задач для штампа в публікаціях [5, 8-10, 15, 24-26, 29, 32] та ін. методами скінчених елементів, граничних елементів, ортогональних поліномів. У вказаних дослідженнях застосовано досить обґрунтовану динамічну модель ППНР середовища М. Біо, що була представлена в статтях [17, 18], ряду її застосувань присвячено числені публікації, наприклад, [19], а також матеріали ряду конференцій, наприклад, [32]. Параметри моделі М. Біо враховують щільність матеріалів фаз та їх інерційну взаємодію, пружні характеристики фаз та середовища,

в'язкість порової рідини, осереднену пористість твердого скелету та форму пор, фільтраційні характеристики середовища, уточнення для високих частот. Особливими фізичними явищами є розповсюдження двох поздовжніх хвиль, загасання коливань від різниці швидкостей руху пористої пружної твердої та в'язкої стисливої рідинної фаз, а також інерційної взаємодії фаз. Застосування рівнянь М. Біо для аналізу хвильових процесів у ґрунтовому середовищі з помірною інтенсивністю фільтрації в'язкої рідини в системі взаємопов'язаних пор пружного пористого скелету представлено в огляді літератури роботи [3].

Внаслідок ускладнення картини хвильових процесів у ґрунтовій основі шаруватой структури виникають резонансні явища. Авторами досліджень [2, 14, 16] та ін. теоретично проаналізовано особливості імпедансних функцій для прямокутних та інших штампів на горизонтально-шаруватій пружній основі з обґрунтуванням теоретичних моделей та особливостей в частотних інтервалах з існуванням, зародженням чи відсутністю різних хвиль в шаруватій основі. Тут розглядаємо крайній випадок – шар ППНР середовища із затисненою тильною гранню, що дозволяє на результатах розрахунків показати резонансні особливості такої основи.

Для моделі плити чи фундаменту прийнято жорсткі смугу чи прямокутний штамп. Контактна умова також вибрана як для крайнього випадку – непроникна для порової рідини (недренована). Деформівні фундаменти також можуть бути розглянуті на основі відповідних моделей [10].

Для смуги з непроникною підшвию, що спирається без тертя на поверхню ППНР шару із затисненою нижньою гранню (розрахункову схему показано на рис. 1) методом інтегральних

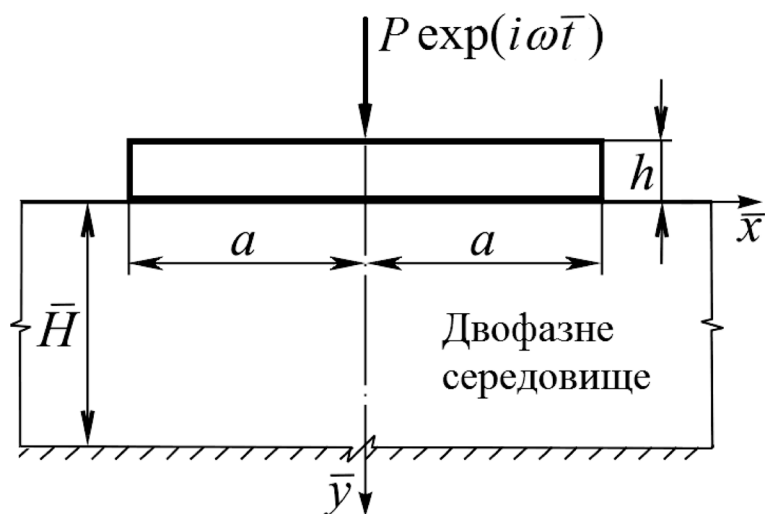


Рис. 1. Жорстка смуга на ППНР шарі



перетворень з диференційних рівнянь моделі М. Біо та відповідних граничних умов отримано розв'язок задачі Лемба, а з контактних умов отримано інтегральні рівняння, для розв'язку яких використовується метод ортогональних поліномів [3]. Попередньо було розглянуто закономірності розподілу контактних тисків як від твердого скелету, так і від порової рідини на основі розділення вкладів фаз в аналітичному розв'язку. Теоретичний аналіз ядер інтегральних рівнянь показав, що розподіл ефективних напружень в твердій фазі (логарифмічне ядро) відповідає розподілу з кореневою особливістю по краях, а поровий тиск під підошвою особливостей не має. Представлення невідомих ефективних напружень та порового тиску при вертикальних коливаннях штампів у вигляді нескінченних рядів підібрано у інтегрально-диференційній формі на основі спектральних співвідношень для ортогональних поліномів Чебишова для непроникних для порової рідини жорсткої смуги і прямокутного штампів (на ППНР півпросторі) [3]. Отримано нескінченні системи лінійних алгебраїчних рівнянь (коефіцієнти систем – компоненти переміщень контактної поверхні у вигляді інтегралів від складних функцій) для визначення методом

редукції коефіцієнтів рядів для визначення контактних тисків, реакцій фаз та переміщень штампів. Складний вигляд приймають коефіцієнти для шару ППНР в двовимірній постановці [3, § 7.3] та тривимірній (будуть опубліковані пізніше). В аналітичному розв'язку задачі Лемба, що знаходиться за допомогою комп'ютерних символьних перетворень, враховується повна хвильова картина та визначаються відповідні асимптотики.

На основі числових розрахунків імпедансу проводиться аналіз впливу основних характеристик моделі основи, розміру підошви.

Основним геометричним параметром задачі є безрозмірна висота шару  $H = \bar{H} / a$ , де  $a$  - півширина смуги (рис. 1), безрозмірна частота визначається як  $\zeta = a\omega / c_2$ , де  $\omega$  - кругова частота вимушених коливань,  $c_2$  - референтна швидкість поперечної хвилі [17, 18].

Ключовим параметром ППНР середовища вважається

безрозмірний параметр [30]

$$B = b \frac{a}{c_2 \rho_{11}}$$

де  $b = \frac{g^2 \theta_0}{K_{pr}}$  коефіцієнт дисипації двофазного

середовища (що враховує внутрішнє тертя при взаємному зміщенні твердої матриці та порової рідини),  $\theta$  – пористість,  $K_{pr}$  проникність (або коефіцієнт фільтрації  $k_f = K_{pr} \rho_f g / \theta_0$ ),  $\theta_0$  - динамічна в'язкість порової рідини,  $\rho_{11}$  - щільність твердої фази,  $\rho_f$  - щільність порової рідини,  $g$  - прискорення вільного падіння. Використовуємо тут позначки згідно [3].

Результати для прямокутного штампів на ППНР півпросторі [3, гл. 7] свідчать про значну (до зміни знаку) залежність від частоти дійсної частини імпедансу (жорсткості) в певному діапазоні частот сейсмічного діапазону внаслідок врахування порового тиску, а для шаруватої основи демонструють складну залежність жорсткості та загасання від частоти коливань.

На рис. 2 показано функції імпедансу для жорсткої смуги (рис. 1) при  $H=2$  та  $H=8$ . Згідно [2] функція приймає нульові значення при частотах

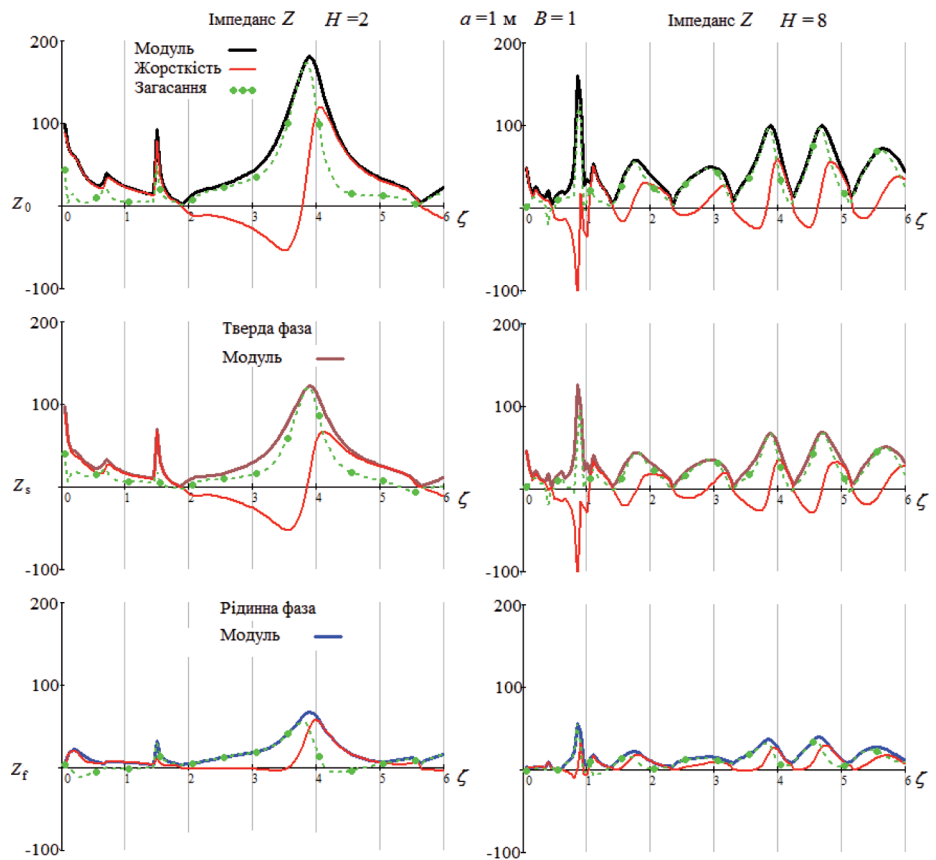


Рис. 2. Імпеданс для жорсткої смуги при  $H=2$  та  $H=8$ ;  $a=1$  м;  $B=1$ ;  $\zeta=0 \div 6$



$$\zeta_K = \pi(K + 1/2) / (H \beta_1), \quad K = 0, 1, 2, \dots$$

де  $\beta_1 = c_2 / c_1(\zeta)$ ,  $c_1(\zeta)$  швидкість першої поздовжньої хвилі в двофазному середовищі, на яких в шарі (як і в пружному) зароджуються хвилі нормальних мод, а переміщення теоретично необмежені. В інтервалах між цими частотами жорсткість основи змінюється досить закономірно, змінюючи від'ємні значення на додатні, як і для моделі півпростору. Екстремальні значення також залежать від частоти.

При частотах нижче виникнення першої нормальної хвилі  $\zeta < \zeta_1$  основа реагує як пружний шар [2], практично без загасання коливань.

На рис. 3 продемонстровано результати розрахунку для шару  $H=4$  при  $B=0.1$  та  $B=10.0$ . У другому випадку взаємодія фаз призводить до значно більшої величини імпедансу, вочевидь за рахунок збільшення внеску рідинної фази. Деякі локальні екстремуми пояснюються відомим з теорії [2] ефектом виникнення обернених хвиль в шарі на частотах, попередніх до виникнення нормаль-

них мод. Не виключаються похибки розрахунків, що коригуються збільшенням числа членів рядів функцій по ортогональним поліномам та точності оцінки інтегралів в коефіцієнтах системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

Представлена модель ілюструє крайній випадок шару із затисненою тильною гранню. Модель основи як пружного шару на півплощині (чи на півпросторі), в якій резонансні частоти подібні, а випромінювання пружних хвиль в півобмежене середовище збільшує загасання, рекомендується використовувати для оцінки динаміки відповідальних споруд [16].

### ВИСНОВКИ

Один з методів динамічного аналізу відповідальних споруд – застосування імпедансних чи передаточних функцій частоти, що можуть бути включені до динамічних розрахункових схем. Функції імпедансу для штамп з непроникною для порової рідини підшовою на пористопружній шаруватій насиченій рідиною (ППНР) двофазній

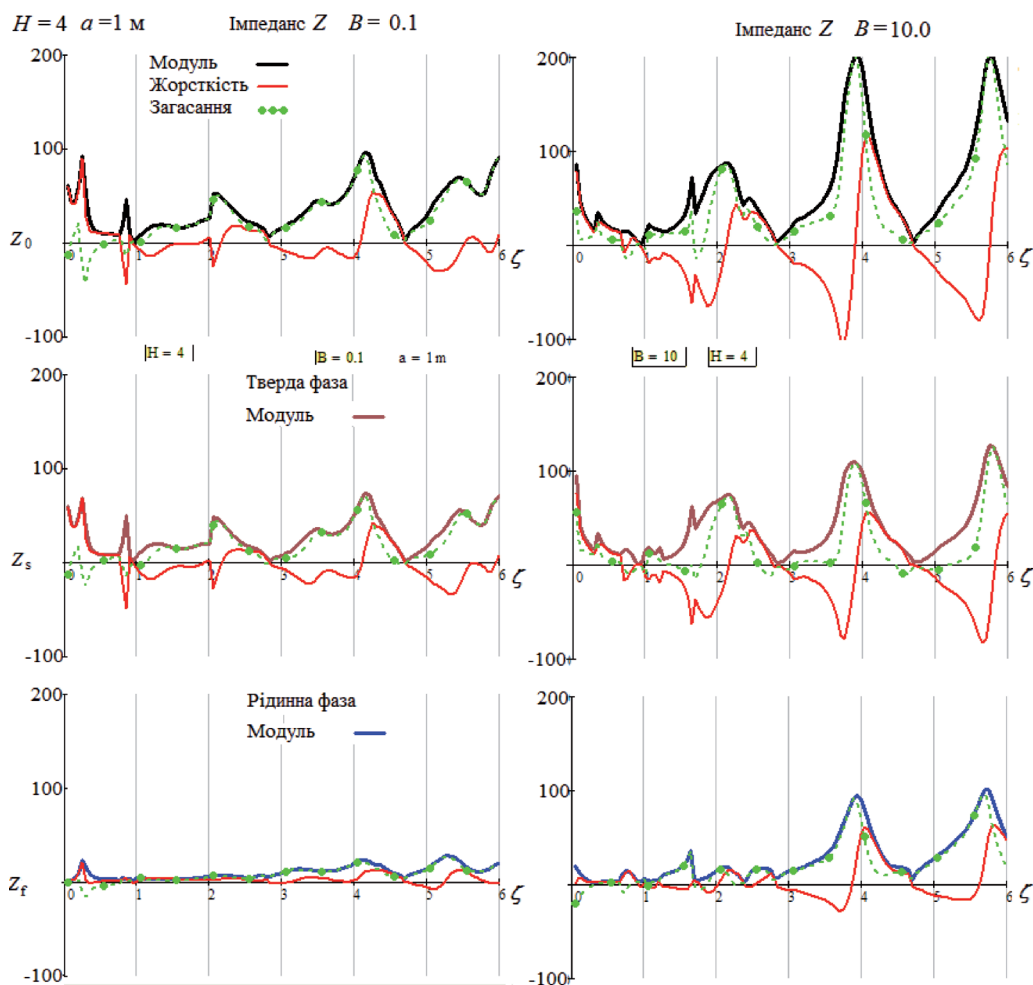


Рис. 3. Імпеданс при  $B=0.1$  та  $B=10.0$ ;  $H=4$ ;  $a=1$  м;  $\zeta=0 \div 6$



основі визначаються з розв'язку динамічної контактної задачі методом ортогональних поліномів, точного розв'язку для переміщень поверхні одношарової основи та програмного забезпечення за геометричними та фізико-механічними параметрами фундаментів та моделі основи.

На числових прикладах показано, що реакція (імпеданс) ППНР основи відрізняється від реакції пружної моделі. Взаємодія між фундаментом з недренованою підшовою та водонасиченим ґрунтом неодностороння внаслідок змінного тиску стисливої та в'язкої порової рідини в пружній пористій матриці.

Визначено прояви резонансних ефектів одношарової основи в залежності від геометричних параметрів системи фундаментоснова та властивостей матеріалу двофазної основи.

### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Абелев М. Ю. Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах / Абелев М. Ю. – М. : Стройиздат, 1983. – 248 с.
2. Бабешко В. А. Динамика неоднородных линейно-упругих сред / В. А. Бабешко, Е. В. Глушков, Ж. Ф. Зинченко. – М. : Наука, 1989. – 343 с.
3. Гомилко А. М. Методы суперпозиции, собственных функций и ортогональных многочленов в граничных задачах теории упругости и акустики / Гомилко А. М., Савицкий О. А., Трофимчук А. Н. – Киев: Наук. думка, 2016. – 436 с. <http://itgip.org/wp-content/uploads/2013/11/GST-2016+a5-19-01-2017end-titul.pdf>.
4. ДБН В.1.1-12-2014 Будівництво у сейсмічних районах України. – Чинні від 2014-10-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ». – VI, 110 с.
5. Мишель А. Г. Колебания штампа на двухфазном основании / А. Г. Мишель, С. Г. Шульман // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1983. – С. 39–41.
6. Особливості визначення навантажень і впливів на об'єкти підвищеного класу відповідальності / Дорофеев В. С., Єгупов К. В., Єгупов В. К., Кеңдзера О. В., Немчинов Ю. І., Семенова Ю. В., Сорока М. М. // Наука та будівництво. – 2017. – № 4 (14). – С. 11-19.
7. Проектування сейсмостійких конструкцій відповідно до Єврокоду 8: практич. посіб. Ч. 1; під ред. проф. Ю.І. Немчинова. – Київ: ТОВ «Український центр реклами та поліграфії», 2015. – 142 с.
8. Савицький О. А. Динаміка фундаменту на шарі водонасиченого ґрунту / О. А. Савицький // Основи та фундаменти : Міжвідомчий

- науково-технічний зб.; за заг. ред. І. П. Бойка. – Вип. 37. – Київ: КНУБА, 2015. – С. 128–137.
9. Савицький О. А. Реакція пористо-пружної водонасиченої основи на вимушені коливання невагомого фундаменту / Савицький О. А., Трофимчук О. М. // Буд. конструкції : міжвід. наук.-техн. зб. наукових пр. (буд-во). – Вип. 83 : в 2-х кн. : Кн. 1. – Київ: ДП НДІБК, 2016. – С. 305–311.
  10. Сеймов В. М. Колебания и волны в слоистых средах / Сеймов В. М., Трофимчук А. Н., Савицкий О. А. – Київ: Наук. думка, 1990. – 224 с.
  11. СНиП 2.02.05-87 Фундаменты машин с динамическими нагрузками. – М. : Государственный строительный комитет СССР, 1988.
  12. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / Под общей ред. Ильичева В. А. и Мангушева Р. А. – М. : АСВ, 2016. – 1040 с.
  13. Таранов В. Г. Розрахунково-експериментальні методи визначення рівня коливань й оцінка вібростійкості основ фундаментів машин : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : 05.23.02 «Підвалини та фундаменти». – Дніпропетровськ, 1999. – 33 с.
  14. Трофимчук А. Н. Численное моделирование динамического поведения пористоупругой насыщенной жидкостью среды // Доповіди НАН України, 1998. – № 11. – С. 44–48.
  15. Трофимчук А. Н. Динамика пористоупругих насыщенных жидкостью сред / Трофимчук А. Н., Гомилко А. М., Савицкий О. А. – Київ: Наук. думка, 2003. – 230 с.
  16. Тяпин А. Г. Горизонтально-слоистое полупространство в качестве модели основания: сравнение различных подходов / Тяпин А. Г. // Сейсмостойкое стр-во. Безопасность сооружений. – 2011. – № 1. – С. 20–26.
  17. Biot, M. A. Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid. I. Lower-frequency range. J. Acoust. Soc. Amer. 1956. Vol. 28, no. 2. P. 168–178.
  18. Biot, M. A. Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range. J. Acoust. Soc. Amer. 1956. Vol. 28, no. 2. P. 179–191.
  19. Cai, Y. & Sun, H. Solutions for Biot's poroelastic theory in key engineering fields: Theory and applications. Elsevier, 2017. 178 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-812649-3.00001-0.
  20. Cottreau, R., Clouteau, D. & Soize, C. Probabilistic impedance of foundation : impact of the seismic design on uncertain soils. Earthquake Engng Struct. Dyn. 2008. 37. – P. 899–918.



21. Dunn, P. W., Hiltunen, D. R. & Woods R. D. In situ determination of dynamic impedance functions of shallow foundations / Proc. 17<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mech. and Geotech. Eng. M. Hamza et al. (Eds.). 2009. IOS Press. P. 2084-2087. DOI: 10.3233/978-1-60750-031-5-2084.
22. Fardis, M. N., Carvalho, E. C., Fajfar, P. & Pecker, A. (2015). Seismic design of concrete buildings to Eurocode 8. CRC Press. - 419 p.
23. Gazetas, G. (1991). Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations. J. Geotech. Engng ASCE, vol. 117, no. 9, pp. 1363–1381. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:9(1363).
24. Halpern, M. R. & Christiano, P. (1986). Steady-state harmonic response of a rigid plate bearing on a liquid-saturated poroelastic half-space Earthquake Eng. and Struct. Dyn., vol. 14, no. 3, pp. 439–454. DOI: 10.1002/eqe.4290140310.
25. He, R. (2017). Dynamic vertical impedance of a submarine strip foundation in ocean engineering : Water wave pressure effect. Ocean Eng., 139, pp. 116–126. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.04.028.
26. He, R., Wang, L.-Z. – Yu H.Y. (2012). Time harmonic point load and dynamic contact problem of contacting fluid and poroelastic half-spaces. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 36, pp. 20–31. DOI: 10.1016/j.soildyn.2011.12.004.
27. Luco, J. E. & Wong, H. L. Identification of Soil Properties from Foundation Impedance Functions J. of Geotech. Eng. 1992. 118, 5. P. 780–796. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1992)118:5(780).
28. Poplin, J. K. Effects of saturation on dynamic response of footings in sand. Technical report S-70-3. U. S. Army Engineer Experiment Station. Vickburg, Mississippi. 1970. 19 p.
29. Senjuntichai, T., Mania, S. & Rajapakse, R. K. N. D. (2006). Vertical vibration of an embedded rigid foundation in a poroelastic soil. Soil Dyn. Earthquake Engng, Vol. 26, no. 6–7, P. 626–636. DOI: 10.1016/j.soildyn.2006.01.013.
30. Stoll, R. D. & Bryan, G. M. (1970). Wave attenuation in saturated sediments. J. Acoust. Soc. Amer. 47 (5), Part 2. P. 1440–1447.
31. Tileylioglu, S., Stewart, J. P. & Nigbor R. L. Dynamic stiffness and damping of a shallow foundation from forced vibration of a field test structure. J. Geotech. Geoenviron. Eng. – 2011. – 137. – P. 344–353.
32. Trofymchuk, O. M., Gomilko, O. M. & Savitsky O. A. Dynamic contact problems for poroelastic liquid-saturated half-space. Proc. of the second Biot conf. on poromechanics, Grenoble, France, 26-28 aug., 2002.

Poromechanics II, Auriault et al (eds). P. 833–838.

## REFERENCES

1. Abelev, M. Iu. (1983). Construction of industrial and civil structures on weak water-saturated soil. M. : Stroizdat [in Russian].
2. Babeshko, V. A. Hlushkov, E. V. & Zinchenko, Zh. F. (1989). Dynamics of non-uniform linearly elastic media. M.: Nauka [in Russian].
3. Gomilko, A., Savytskyi, O. & Trofymchuk, O. (2016). Superposition, Eigenfunctions and Orthogonal Polynomials Methods in Elasticity and Acoustic Boundary Value Problems. K.: Naukova dumka. Retrieved from <http://itgip.org/wp-content/uploads/2013/11/GST-2016+a5-19-01-2017end-titul.pdf> [in Russian].
4. Construction in seismic regions of Ukraine. (2014). DBN B.1.1-12-2014 from 01<sup>st</sup> October 2014. K.: SE «Ukrarkhbudinform» [in Ukrainian].
5. Mishel A. G. & Shulman, S. G. (1983). Oscillations of a stamp on the two-phase base. Proc. of the VNIIG, 166, 39–41 [in Russian].
6. Dorofeiev, V. S., Yehupov, K. V., Yehupov, V. K., Kendzera, O. V., Nemchynov Yu. I., Semenova Yu. V. et al. (2017). Features of definition of loadings and impacts on the high responsibility class objects. Science and Construction; 4 (14), 11-19 [in Ukrainian].
7. Nemchynov, Iu. (Ed.). (2015). Design of seismic structures according to Eurocode 8. Practical guidance. Part 1. K.: TOV «Ukrainian Publishing and Advertising Centre» [in Ukrainian].
8. Savytskyi, O. A. (2015). Dynamics of the foundation on a water-saturated soil layer. Bases and foundations: Inter-agency collection of scientific and technical papers. I. P. Boyko (Ed.). Iss. 37, 128–137. K.: KNUCA [in Ukrainian].
9. Savytskyi, O. A. & Trofymchuk, O. M. (2016). The poroelastic liquid-saturated base response to the weightless foundation forced vibrations. Building constructions: Inter-agency collection of research papers (construction). Iss. 83 : Book 1, 305–311. K.: SE «NDIBK» [in Ukrainian].
10. Seimov, V. M., Trofimchuk, A. N. & Savitskii O. A. (1990). Vibrations and waves in layered media. K.: Naukova dumka [in Russian].
11. The bases of machines with dynamic loadings (1988). SNIIP 2.02.05-87. M.: Gosudarstvennyi stroitelnyi komitet SSSR [in Russian].
12. Geotechnics reference book. Bases, foundations and underground constructions. (2016). V. A. Ilichev, R. A. Mangushev (Eds.). M.: ASV [in Russian].



13. Taranov, V. H. (1999). Computational-experimental methods for the vibrations level determination and vibration strength evaluation for machinery foundations. Extended abstract of the Doctor's thesis (Engineering). Dnipropetrovsk [in Ukrainian].
14. Trofimchuk, A. N. (1998). Numerical modeling of the poroelastic liquid-saturated medium dynamic behaviour. Reports of the NAS of Ukraine, 11, 44–48 [in Russian].
15. Trofimchuk, A. N., Gomilko, A. M. & Savitskii, O. A. (2003). Dynamics of the poroelastic liquid-saturated media. K.: Naukova dumka [in Russian].
16. Tiapin, A. G. (2011). The horizontally layered half-space as a foundation model: various approaches comparison. Earthquake engineering. Constructions safety, 1, 20-26 [in Russian].
17. Biot, M. A. (1956). Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid. I. Lower-frequency range. J. Acoust. Soc. Amer. Vol. 28, no. 2, 168–178 [in English].
18. Biot, M. A. (1956). Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range. J. Acoust. Soc. Amer. Vol. 28, no. 2, 179–191 [in English].
19. Cai, Y. & Sun, H. (2017). Solutions for Biot's poroelastic theory in key engineering fields: Theory and applications. Elsevier, 178 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-812649-3.00001-0.
20. Cottureau, R., Clouteau, D. & Soize, C. (2008). Probabilistic impedance of foundation : impact of the seismic design on uncertain soils. Earthquake Engng Struct. Dyn. 37, 899–918 [in English].
21. Dunn, P. W., Hiltunen, D. R. & Woods R. D. (2009). In situ determination of dynamic impedance functions of shallow foundations. Proc. 17<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mech. and Geotech. Eng. M. Hamza et al. (Eds.). IOS Press. P. 2084-2087. DOI: 10.3233/978-1-60750-031-5-2084 [in English].
22. Fardis, M. N., Carvalho, E. C., Fajfar, P. & Pecker, A. (2015). Seismic design of concrete build-ings to Eurocode 8. CRC Press [in English].
23. Gazetas, G. (1991). Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations. J. Geotech. Engng ASCE, vol. 117, no. 9, 1363–1381. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:9(1363) [in English].
24. Halpern, M. R. & Christiano, P. (1986). Steady-state harmonic response of a rigid plate bearing on a liquid-saturated poroelastic half-space. Earthquake Eng. and Struct. Dyn., vol. 14, no. 3, 439–454. DOI: 10.1002/eqe.4290140310 [in English].
25. He, R. (2017). Dynamic vertical impedance of a submarine strip foundation in ocean engineering: Water wave pressure effect. Ocean Eng., 139, 116–126. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.04.028 [in English].
26. He, R., Wang, L.-Z. & Yu H.Y. (2012). Time harmonic point load and dynamic contact problem of contacting fluid and poroelastic half-spaces. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 36, 20–31. DOI: 10.1016/j.soildyn.2011.12.004 [in English].
27. Luco, J. E. & Wong, H. L. (1992) Identification of Soil Properties from Foundation Impedance Functions. J. of Geotech. Eng. 118, 5, 780–796. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1992)118:5(780) [in English].
28. Poplin, J. K. (1970). Effects of saturation on dynamic response of footings in sand. Technical re-port S-70-3. U. S. Army Engineer Experiment Station. Vickburg, Mississippi [in English].
29. Senjuntichai, T., Mania, S. & Rajapakse, R. K. N. D. (2006). Vertical vibration of an embedded rigid foundation in a poroelastic soil. Soil Dyn. Earthquake Engng, Vol. 26, no. 6–7, 626–636. DOI: 10.1016/j.soildyn.2006.01.013 [in English].
30. Stoll, R. D. & Bryan, G. M. (1970). Wave attenuation in saturated sediments. J. Acoust. Soc. Amer. 47 (5), Part 2, 1440–1447 [in English].
31. Tileylioglu, S., Stewart, J. P. & Nigbor R. L. (2011). Dynamic stiffness and damping of a shallow foundation from forced vibration of a field test structure. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 137, 344–353 [in English].
32. Trofymchuk, O. M., Gomilko, O. M. & Savitsky O. A. (2002). Dynamic contact problems for poroelastic liquid-saturated half-space. Proc. of the second Biot conf. on poromechanics, Grenoble, France, 26-28 aug., Poromechanics II, Auriault et al (eds). P. 833–838 [in English].

Стаття надійшла до редакції 05.09.2018 р.



**МАХІНЬКО Н.О.**  
Канд. технічних наук, доц.,  
Національний авіаційний  
університет,  
м. Київ, Україна,  
e-mail: pasargada1985@gmail.com,  
тел.: + 38 (050) 304-50-72,  
ORCID: 0000-0001-8120-6374

## ІМОВІРНІСНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА КРИТИЧНОГО ФАКТОРУ В ЗАДАЧАХ НАДІЙНОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

### АНОТАЦІЯ

Стаття порушує актуальну проблему практичного розрахунку надійності для такого класу будівельних споруд, як сталеві ємності зберігання. Зокрема дослідження орієнтоване на визначення такого узагальненого коефіцієнта критичного фактору, як відношення узагальнених величин зусиль та міцності, представлених випадковими процесами. З огляду на використання методів теорії імовірності та математичної статистики, значення критичного фактору виражається через його статистичні характеристики, диференціальну та інтегральну функції розподілу. Визначення середньоквадратичного відхилення та коефіцієнту варіації проводилося шляхом лінеаризації нелінійної функції випадкових величин в околі її математичного очікування. При цьому була врахована поправка на нелінійність при обчисленні дисперсії. Щільність розподілу коефіцієнта критичного фактору визначалася при використанні нормального закону розподілу для випадкових величин узагальненої міцності. Стохастичний процес узагальненого зусилля схематизувався двома законами розподілу – нормальним, що використовують для опису тиску сипучого матеріалу на стінки корпусу ємності зберігання, та подвійним експоненціальним розподілом Гумбеля, що використовується для опису максимумів снігового та вітрового навантаження. Таким чином, на базі класичного підходу, було отримане кінцеве аналітичне рішення в двох варіантах. Інженерний розрахунок, відповідно до даного алгоритму, ускладнений і потребує застосування спеціальних математичних пакетів для обчислення інтегральних виразів. Для уникнення цієї процедури була обґрунтована можливість використання процедури імітаційного моделювання для вирішення

задачі пошуку функції розподілу імовірностей в зоні значень аргументу при ординатах, близьких до одиниці. Запропоновано імовірнісні властивості коефіцієнта критичного фактору виражати властивостями іншої випадкової величини, на основі полігону та функції розподілу котрої підбираються апроксимуючі вирази для заданого діапазону зміни імовірностей. Отримані таким чином значення для критичного фактору дозволяють вирішити задачу імовірнісного розрахунку аналітично без застосування складних обчислювальних процедур.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** надійність ємностей зберігання, міцність, зусилля, випадкові величини, функції розподілу.

### ВЕРОЯТНОСТНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА КРИТИЧЕСКОГО ФАКТОРА В ЗАДАЧАХ НАДЕЖНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**МАХІНЬКО Н.А.** Канд. технических наук, доц.,  
Национальный авиационный университет,  
г. Киев, Украина,  
e-mail: pasargada1985@gmail.com,  
тел.: +38 (050) 304 50 72,  
ORCID: 0000-0001-8120-6374

### АННОТАЦИЯ

Статья касается актуальной проблемы практического расчета надежности такого класса сооружений, как стальные емкости хранения. В частности, исследование ориентировано на определение такого обобщенного коэффициента критического фактора, как соотношения обобщенных величин усилий и прочности, представленных случайными процессами. С учетом использования методов теории вероятности и математической статис-





тики, значение критического фактора выражается через его статистические характеристики, а также дифференциальную и интегральную функции распределения. Определение среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации проводилось путем линеаризации нелинейной функции случайных величин в окрестности её математического ожидания. При этом учитывалась поправка на нелинейность при вычислении дисперсии. Плотность распределения коэффициента критического фактора определялась при использовании нормального закона распределения для случайных величин обобщённой прочности. Стохастический процесс обобщённого усилия схематизировался двумя законами распределения – нормальным, который применяют для описания давления сыпучего материала на стенки корпуса емкости хранения, и двойным экспоненциальным распределением Гумбеля, который применяется для описания максимумов снеговой и ветровой нагрузок. Таким образом, на базе классического подхода было получено конечное аналитическое решение в двух вариантах. Инженерный расчет, соответствующий данному алгоритму, очень усложнен и требует использования специальных математических пакетов для вычисления интегральных выражений. Чтобы избежать этого, была обоснована возможность использования процедуры имитационного моделирования для решения задачи поиска функции распределения вероятностей в области значений аргумента при ординатах, близких к единице. Было предложено вероятностные свойства коэффициента критического фактора выражать свойствами другой случайной величины, на основании полигона и функции распределения которой подбираются аппроксимирующие выражения для заданного диапазона изменения вероятностей. Полученные таким образом значения для критического фактора позволят решить задачу вероятностного расчета аналитическим путем, без использования сложных вычислительных процедур.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** надежность емкостей хранения, прочность, усилие, случайные величины, функция распределения.

## PROBABILISTIC REPRESENTATION OF THE CRITICAL FACTOR COEFFICIENT IN THE RELIABILITY PROBLEMS OF STRUCTURES

**МАХНІНКО Н.О.** PhD, Ass. Prof., National Aviation University,  
Kyiv, Ukraine,  
e-mail: pasargada1985@gmail.com,  
tel.: +38 (050) 304-50-72,  
ORCID: 0000-0001-8120-6374

### ABSTRACT

This paper deals with the actual problems of the practical calculation of the steel storage capacities. The

research defines generalized coefficient of the critical factor. It is the ratio of the generalized values of the internal forces and reliability, which are represented by random processes. The methods of the probability theory and of the mathematical statistics were used for the solution. The value of the critical factor was expressed through its statistic characteristics, and also through the differential and integral distribution functions. The linearization of the non-linear function of the random values in the area of the expected values was made to determine the standard deviation and the coefficient of variation. At the same time correlation at the non-linearity was considered when calculating the dispersion. The density distribution of the critical factor coefficient was determined when using the normal law of the distribution for the random value of the generalized reliability. The probabilistic process of the generalized force was schematized by two laws of distribution. The normal law was used to describe the pressure of the bulk material on the body walls of the storage capacities. Double exponential distribution of Gumbel is used to describe maximums of the snow and wind loads. At the same time classical calculation was made. Thus, the finite analytical decision in two variants was obtained. Accordingly to the given algorithm, engineering calculations is very complicated. It requires using special mathematical packages to calculate integral expressions. To avoid this, a simulation procedure was used. This allowed to solve the problem of finding the probability distribution function in the range of the argument values, when the ordinates are close to one. It was proposed to express the probabilistic features of coefficient of the critical factor by the features of another random value. On the basis of polygon and distribution function of this value, the approximating expressions for a given range of probability variations are chosen.

The obtained values for the critical factor allow us to solve the problem of probabilistic calculation analytically, what does not require using of complicated calculating procedures.

**KEY WORDS:** reliability of the storage capacities, strength, effort, random values, distribution function.

### ВСТУП

В рамках діючих нормативних документів надійність або більш точноше безпечна експлуатація ємностей зберігання забезпечується розрахунком на міцність та стійкість, що визначає кількісну міру співвідношення між зовнішніми впливами, геометричними розмірами конструкцій і характеристиками міцності сталі, з якої вони виготовлені. Ця кількісна міра може бути виражена через узагальнену міцність  $\tilde{R}$  та узагальнене зусилля  $\tilde{S}$  в трьох можливих варіантах нерівності: резерву несучої здатності  $\tilde{Y} = \tilde{R} - \tilde{S} \geq 0$ ; узагальненого коефіцієнту запасу  $\tilde{\xi}_R = \tilde{R} / \tilde{S} \geq 1,0$  і узагальненого критичного фактору  $\tilde{K}_R = \tilde{S} / \tilde{R} \leq 1,0$ .



## АНАЛІЗ ОСТАННІХ ПУБЛІКАЦІЙ

Вивчення питань імовірнісного розрахунку загалом та по відношенню до будівельних конструкцій, під дією випадкових навантажень присвячена велика кількість робіт [1 – 5]. В той же час дослідження структурної надійності сталевих ємностей зберігання в наукових публікаціях зустрічається значно рідше [6, 7]. Також варто відмітити величезну кількість досліджень в області статистичного моделювання та чисельних методів розрахунку, що можуть бути застосовані для вирішення поставлених задач [8 – 10].

## ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Використання певного типу нерівності при розрахунках здебільшого обирається на власний розсуд дослідника і переважним чином обумовлюється простотою математичних перетворень. В даній статті, з цією метою, був здійснений пошук коефіцієнту критичного фактору, у зв'язку з тим, що він часто фігурує в багатьох комп'ютерних пакетах міцнісного аналізу, має більш вузьку область можливих значень та дозволяє отримувати результати у зручній безрозмірній формі. Якщо узагальнені величини міцності та зусилля являються детермінованими, то розрахунок на міцність та стійкість проводиться в рамках методу граничних станів з розрахунковими значеннями зовнішніх навантажень та міцності. Якщо ж хоча б одна зі складових граничної нерівності має стохастичну природу, в цьому разі повинен виконуватися розрахунок з використанням теорії імовірностей та математичної статистики. Дані методи є дещо складнішими, проте отримані на цьому підґрунті результати однозначно більш виправдані як з економічної точки зору, так і відповідно вимог до надійності і безпеки споруд.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Будемо вважати, що узагальнене зусилля  $\tilde{S}$  та узагальнена міцність  $\tilde{R}$  є випадковими величинами із заданими законами розподілу  $f_S, r_R$  і статистичними характеристиками: математичними очікуваннями  $\sigma_S, \sigma_R$  та середньоквадратичними відхиленнями  $m_S, m_R, \sigma_S, \sigma_R$ .

Розглянемо також ряд безрозмірних характеристик, виражених через  $m_S, m_R$ , та  $\sigma_S, \sigma_R$ :

$$\begin{aligned} V_S &= \sigma_S / m_S, \\ V_R &= \sigma_R / m_R, \\ P_S &= \sigma_S / \sigma_R, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $V_S$  і  $V_R$  – коефіцієнти варіації та відношення  $\rho_S$  середньоквадратичних відхилень відповідних величин.

Вирішення задачі буде полягати у пошуку виразів для статистичних характеристик  $m_K, \sigma_K, V_K$ , коефіцієнту критичного фактору  $K_R$ , а також його диференціальної  $f_K$  та інтегральної  $F_K$  функцій розподілу.

Коефіцієнт критичного фактору  $\tilde{K}_R$  є безрозмірною величиною, що як в теоретичному представленні, так і в процедурах імітаційного моделювання доцільно виражати через нормовані випадкові величини (величини з нульовим математичним очікуванням та одиничним середньоквадратичним відхиленням) узагальненої міцності  $\tilde{Y}_R$  та узагальненого зусилля  $\tilde{Y}_S$  :

$$\begin{aligned} \tilde{K}_R(\tilde{Y}_S, \tilde{Y}_R) &= \frac{\tilde{S}}{\tilde{R}} = \frac{m_S \cdot (1 + \tilde{Y}_S V_S)}{m_R \cdot (1 + \tilde{Y}_R V_R)} = \\ &= \frac{V_R}{V_S} p_S \frac{1 + \tilde{Y}_S V_S}{1 + \tilde{Y}_R V_R}. \end{aligned} \quad (2)$$

Оскільки математичні очікування  $\tilde{Y}_R$  і  $\tilde{Y}_S$  рівні нулю, можна отримати математичне очікування критичного фактору:

$$m_K = \frac{V_R p_S}{V_S}. \quad (3)$$

Визначення середньоквадратичного відхилення  $\sigma_K$  більш складне. Для його пошуку використаємо лінеаризацію нелінійної функції випадкових величин в околі її математичного очікування:

$$\begin{aligned} \sigma_K &\approx p_S \frac{V_R}{V_S} \sqrt{V_S^2 + V_R^2}, \\ V_K &\approx \sqrt{V_S^2 + V_R^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Величина похибки, що виникає при цьому, є набагато менше квадрату середньоквадратичного відхилення

$$\Delta \sigma_K^2 \approx 2 p_S^2 \frac{V_R^6}{V_S^2}. \quad (5)$$

Для пошуку щільності розподілу коефіцієнту критичного фактору необхідно задати закон розподілу випадкових величин узагальненої міцності  $\tilde{R}$  та узагальненого зусилля  $\tilde{S}$ . Закон розподілу величини  $\tilde{R}$  будемо завжди вважати нормальним, а для величини  $\tilde{S}$  розглянемо два варіанти: нормальний розподіл та подвійний експоненціальний розподіл Гумбеля. Перший розподіл використовується для опису тиску сипучого матеріалу на стінки корпусу ємності зберігання, а другий – для опису максимумів снігового та вітрового навантаження.

У загальному випадку щільність розподілу двох випадкових процесів визначається за наступною формулою [2]:

$$\begin{aligned} f(K_R) &= \int_0^{\infty} f_R(R) f_S(K_R R) \times \\ &\times R dR - \int_{-\infty}^0 f_R(R) f_S(K_R R) R dR. \end{aligned} \quad (6)$$



Коли обидві величини  $\tilde{R}$  і  $\tilde{S}$  підпорядковуються нормальному розподілу, формулу (6) можна представити у вигляді:

$$f_K(K_R) = \frac{1}{2\pi p_S V_R} \int_{-1/V_R}^{\infty} [(1 + K_R V_R) \times \exp[-A_K(K_R)x^2 - 2B_K(K_R)x - C_K(K_R)]] dx, \quad (7)$$

де  $A_K$ ,  $B_K$  і  $C_K$  – безрозмірні функції.

Для випадку, коли узагальнене зусилля  $\tilde{S}$  підпорядковане подвійному експоненціальному розподілу Гумбеля, щільність розподілу критичного фактору, обчислена відповідно до загальної формули (6), має вигляд:

$$f_K(K_R) = \frac{1}{K_R \sqrt{2\pi}} \int_{Z_0}^1 [D_K(K_R, Z) \times \exp\left\{-0.5 \left[D_K(K_R, Z) - \frac{1}{V_R}\right]^2\right\}] dZ, \quad (8)$$

де функція  $D_K$  і нижня границя інтегрування  $Z_0$  визначені, як:

$$D_K(K_R, Z) = \frac{p_S}{K_R} \left[ \frac{1}{V_S} - 0,45 - 0,78 \ln(-\ln Z) \right],$$

$$Z_0 = \exp\left[ -\exp\left( \frac{1,282}{V_S} - 0,577 \right) \right].$$

Оцінюючи процедуру виконання даних перетворень, можливо побачити складність та непрактичність отримання кінцевого аналітичного виразу відповідно до класичного підходу. Навряд чи, при сучасному розвитку комп'ютерної техніки, інженер буде користуватися спеціальними математичними пакетами для обчислення інтегральних виразів. Окрім цього, точність обчислення також залишається під сумнівом, так як підінтегральні функції при застосуванні чисельних методів часто дають некоректний результат або взагалі не можуть бути знайдені. У зв'язку з цим виникає питання можливості та доцільності безпосереднього використання процедури імітаційного моделювання в інженерних розрахунках. Оскільки, якщо вирішення певної задачі потребує використання чисельних методів розрахунку, то не має різниці, на якому етапі вони будуть використані: на початку – пряме моделювання або на кінець – обчислення інтегралу.

Розрахунок основних статистичних характеристик критичного фактору може бути виконаний за формулами (3) і (4), тому невідомою залишається функція розподілу імовірностей. Проте для розрахунків не потрібно знаходити вигляд всієї функції, а достатньо розглянути її лише в області значень аргументу при

ординатах, близьких до 1,0.

Для вирішення поставленої задачі сформуємо дві незалежні вибірки об'ємом  $N$  випадкових величин  $\gamma_{R,i}$  і  $\gamma_{S,i}$  де  $i=1,2,\dots,N$ , підпорядкованих своїм законам розподілу. В цьому разі вибірка значень критичного фактору об'ємом  $N$  буде обчислюватися за формулою:

$$K_{R,i} = \frac{m_S}{m_R} \cdot \frac{1 + \gamma_{S,i} V_S}{1 + \gamma_{R,i} V_R} = m_K \cdot \gamma_{K,i},$$

$$\gamma_{K,i} = \frac{1 + \gamma_{S,i} V_S}{1 + \gamma_{R,i} V_R}. \quad (9)$$

Імовірнісні властивості випадкової величини  $\tilde{K}_R$  будуть визначатися виключно властивостями випадкової величини  $\tilde{\gamma}_K$ , а математичне очікування  $m_K$  критичного фактору буде відігравати роль коефіцієнту пропорційності, не впливаючи на закон розподілу  $\tilde{K}_R$ .

Для дослідження емпіричної функції розподілу  $F_\gamma$  в області великих значень аргументу зручно користуватися координатною системою, де по осі ординат відкладається випадкова величина  $\tilde{\gamma}_K$ , а по осі абсцис  $y = -\ln[-\ln(F_\gamma)]$  – аргумент подвійного експоненціального розподілу Гумбеля. Подібне представлення використовував Е. Гумбель [11] під терміном «extreme probability rarer» для експозиції різних розподілів та С.Ф. Пічугін [12, 13] під назвою «загальна форма представлення навантажень», поширивши його на задачі, що враховують фактор часу. В даному дослідженні застосуємо термін «критична імовірнісна шкала» з огляду на обраний простір надійності.

Отримана за допомогою процедури імітаційного моделювання функція розподілу на даній координатній площині апроксимується в межах діапазону імовірностей  $0 \leq y \leq 12$ . Для аналітичного виразу була обрана квадратна парабола. В такому разі для критичного фактору можна буде застосувати вираз наступного вигляду:

$$K_R = m_K \cdot (A_K y^2 + B_K y + C_K), \quad (10)$$

де коефіцієнти  $A_K$ ,  $B_K$  і  $C_K$  для обраних законів розподілу випадкових величин  $\tilde{\gamma}_R$ ,  $\tilde{\gamma}_S$  наведені в табл. 1.

Аналіз даних цієї таблиці показує, що коефіцієнти  $A_K$ ,  $B_K$  і  $C_K$  мало змінюються при зміні коефіцієнту варіації  $V_R$  несучої здатності (в діапазоні  $V_R \in 0,05 \div 0,1$ ). Залежність цих величин від коефіцієнту варіації  $V_S$  навантаження (внутрішнього зусилля чи напруження) майже лінійна і добре описується формулами виду:

$$A_K = \alpha_A V_S, \quad B_K = \alpha_B V_S, \quad C_K = 1 - \alpha_C V_S, \quad (11)$$

де  $\alpha_A$ ,  $\alpha_B$  і  $\alpha_C$  – безрозмірні коефіцієнти, що враховують вплив коефіцієнту варіації несучої здатності.



Таблиця 1. Коефіцієнти функції критичного фактору при нормальному законі розподілу несучої здатності

При нормальному законі розподілу навантаження							
$A_\gamma, B_\gamma, C_\gamma$	$V_S$	$V_R$					
		0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
$A_\gamma$	0,10	-0,00243	-0,00245	-0,00228	-0,00224	-0,00205	-0,00168
$B_\gamma$		0,07475	0,07926	0,0831	0,08904	0,09472	0,09988
$C_\gamma$		0,980	0,977	0,977	0,974	0,971	0,970
...							
$A_\gamma$	1,0	-0,02309	-0,02223	-0,02237	-0,02143	-0,02032	-0,01968
$B_\gamma$		0,64873	0,64528	0,65328	0,65093	0,65054	0,656
$C_\gamma$		0,824	0,833	0,820	0,828	0,826	0,815
При навантаженні відповідно до розподілу Гумбеля							
$A_\gamma$	0,10	-0,00069	-0,00075	-0,00076	-0,0006	-0,00031	-0,00005
$B_\gamma$		0,08928	0,09212	0,09526	0,0977	0,09994	0,10342
$C_\gamma$		0,947	0,948	0,949	0,951	0,955	0,957
...							
$A_\gamma$	1,0	-0,00351	-0,00372	-0,00389	-0,00398	-0,0033	-0,00161
$B_\gamma$		0,82568	0,83281	0,83946	0,84743	0,850	0,84344
$C_\gamma$		0,445	0,434	0,427	0,414	0,409	0,420

На рис. 1 і 2 наведені щільності розподілу випадкової величини критичного фактору на двох координатних площинах – класичній та критичній імовірнісній шкалах.

Звернемо увагу не те, що запропонований підхід

може бути застосований до елементів конструкцій, що знаходяться в умовах простого розтягу чи згину в одній площині. Якщо елемент сприймає центральний стиск або завантажений осьюою силою з моментом, то необхідно виконати ряд коригувань.

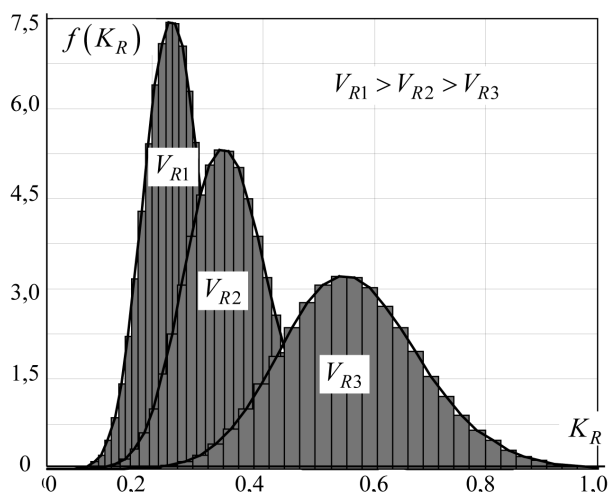


Рис. 1. Щільність розподілу критичного фактору центрально-розтягнутого елемента при різних площі поперечного перерізу

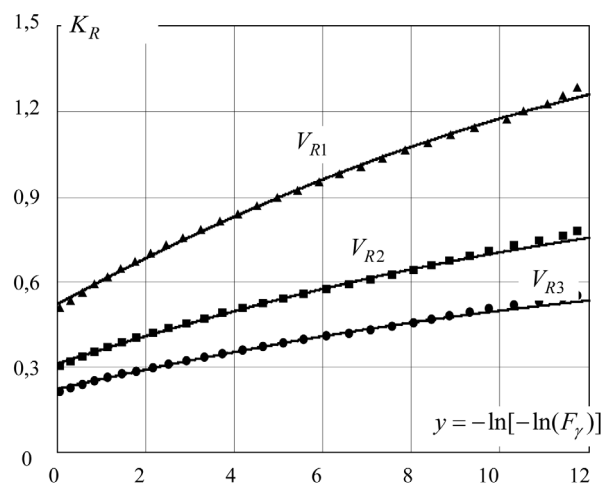


Рис. 2. Функції розподілу критичного фактору для центрально-розтягнутого елемента на критичній імовірнісній шкалі



## ВИСНОВКИ

1. Обґрунтована задача необхідності використання коефіцієнта критичного фактору при виконанні імовірнісних розрахунків надійності сталевих ємностей зберігання.

2. На базі класичного підходу отримані аналітичні вирази для статистичних характеристик та щільності розподілу критичного фактору.

3. Сформульована процедура отримання щільності розподілу критичного фактору із залученням чисельних методів розрахунку, що базується на першочерговому виконанні апроксимації даних в діапазоні малих імовірностей за визначеним законом розподілу та коефіцієнтом варіації випадкової величини. Виконане графічне представлення.

4. Складені таблиці числових значень ряду безрозмірних коефіцієнтів, що фігурують в імовірнісних розрахунках для різних законів розподілу.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Chen, W. & Richard Liew, J. The Handbook Civil Engineering. – United States : CRC Press, 2003. – 2783 p.
2. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель. – М. : Высшая школа, 2000. – 383 с.
3. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Стройиздат, 1982. – 351 с.
4. Ditlevsen, O. & Madsen, H. Structural Reliability Methods. – Technical University of Denmark, 2007. – 361 p.
5. Пичугин С.Ф. К вероятностным методам расчёта металлоконструкций / С.Ф. Пичугин, А.В. Махинько // Современные строительные конструкции из металла и древесины: сб. науч. тр.– Одесса: ОГАСА, 2005. – С.161 – 171.
6. Ditlevsen, O., Christensen C., & Randrup-Thomsen S. Empirical Stochastic Silo Load Model. III: Reliability Applications // J. of Eng. Mechanics. – ASCE, 1995. – Vol. 121. - № 9. – P. 987-993.
7. Winkelmann, K. The use of Response Surface Methodology for reliability estimation of aluminum silo subjected to wind load // Shell Structures: Theory and Application. – 2014. – Vol. 52. – № 4. – P. 1019-1032.
8. Бендат Д. Измерение и анализ случайных процессов / Д. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1974. – 464 с.
9. Бусленко Н.П. Метод статистического моделирования / Н.П. Бусленко. – М. : Статистика, 1970. – 112 с.
10. Casciati, F. & Roberts, B. Mathematical Models for Structural Reliability Analysis. – United States : CRC Press, 1996. – 384 p.
11. Гумбель Э. Статистика экстремальных значе-

- ний / Э. Гумбель. – М. : Мир, 1965. – 450 с.
12. Пичугин С.Ф. Вероятностное представление нагрузок, действующих на строительные конструкции / С.Ф. Пичугин // Известия ВУЗов. – 1995. – № 4. – С. 12–18.
13. Пичугин С.Ф. Надёжность стальных конструкций производственных зданий : монография / С.Ф. Пичугин. – Полтава : АСМИ, 2009. – 452 с.

## REFERENCES

1. Chen, W. & Richard Liew, J. The Handbook Civil Engineering. – United States : CRC Press, 2003.
2. Venttsel E.S. Teoriia sluchainykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniia / E.S. Venttsel. – М. : Vysshaiia shkola, 2000.
3. Bolotin V.V. Metody teorii veroiatnosti i teorii nadezhnosti v raschetakh sooruzhenii. – М.: Stroizdat, 1982.
4. Ditlevsen, O. & Madsen, H. Structural Reliability Methods. – Technical University of Denmark, 2007.
5. Pichugin S.F. K veroiatnostnym metodam rascheta metallokonstruksii / S.F Pichugin, A.V. Makhinko // Sovremennye stroitelnye konstruksii iz metalla i drevesiny.– Odessa : OGASA, 2005. – S. 161-171.
6. Ditlevsen, O., Christensen C., & Randrup-Thomsen S. Empirical Stochastic Silo Load Model. III: Reliability Applications // J. of Eng. Mechanics. – ASCE, 1995. – Vol. 121. - № 9. – P. 987-993.
7. Winkelmann, K. The use of Response Surface Methodology for reliability estimation of aluminum silo subjected to wind load // Shell Structures: Theory and Application. – 2014. – Vol. 52. – № 4. – P. 1019-1032.
8. Bendat D. Izmerenie i analiz sluchainykh protsessov / D. Bendat, A. Pirsol. – М. : Mir, 1974.
9. Buslenko N.P. Metod statisticheskogo modelirovaniia / N.P. Buslenko. – М. : Statistika, 1970.
10. Casciati, F. & Roberts, B. Mathematical Models for Structural Reliability Analysis. – United States : CRC Press, 1996.
11. Gumbel E. Statistika ekstremalnykh znachenii / E. Gumbel. – М.: Mir, 1965.
12. Pichugin S.F. Veroiatnostnoe predstavlenie nagruzok deistvuiushchikh na stroitelnye konstruksii / S.F Pichugin // Izvestiia VUZov. – 1995. – № 4. – S. 12–18.
13. Pichugin S.F. Nadezhnost stalnykh konstruksii proizvodstvennykh zdaniy monografiia / S.F Pichugin. – Poltava : ASMI, – 2009.

Стаття надійшла до редакції 25.02.2019 р.



УДК 620.91: 697.1



**ТИМОФЄЄВ М.В.**

Канд. технічних наук, доц., зав. Науково-технічного центру з питань енергоефективності та енергозбереження у сфері будівництва, ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», м. Київ, Україна, e-mail: [tymofeiev@ndibk.gov.ua](mailto:tymofeiev@ndibk.gov.ua), тел.: +38 (050) 239-28-37, ORCID: 0000-0001-9234-6567



**ДЕШКО В.І.**

Д-р технічних наук, проф., зав. каф., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, e-mail: [te@kpi.ua](mailto:te@kpi.ua), тел.: +38 (044)-204-82-50, ORCID: 0000-0002-8218-3933



**БІЛОУС І.О.**

Канд. технічних наук, асист., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, e-mail: [bilous\\_inna@ukr.net](mailto:bilous_inna@ukr.net), тел.: +38 (068)-015-15-63, ORCID: 0000-0002-6640-103X



**ГЕТМАНЧУК Г.О.**

Магістр, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, e-mail: [hetmanchuk.anna@gmail.com](mailto:hetmanchuk.anna@gmail.com), тел.: +38 (0 66) 06 92 638, ORCID: 0000-0003-1655-8642

## РОЗРАХУНОК ПОГОДИННОЇ ПРИРОДНОЇ КРАТНОСТІ ПОВІТРООБМІНУ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ЕНЕРГОПОТРЕБУ БУДІВЕЛЬ В ДИНАМІЧНИХ СІТКОВИХ МОДЕЛЯХ

### АНОТАЦІЯ

На енергетичні характеристики будівель впливає велика кількість як зовнішніх, так і внутрішніх факторів. Одним з найбільш впливових параметрів є кратність повітрообміну, що має природну (інфільтрація) та механічну природу. Природна складова кратності повітрообміну залежить від великої кількості факторів, та її значення різне для різних приміщень при однакових теплофізичних властивостях огорожень.

В роботі представлені результати математичного моделювання погодинного графіка енергопотреб будівлі для базового рівня при нормативному значенні кратності повітрообміну, а також при розрахованому значенні природної складової кратності повітрообміну, що змінюється відповідно до погодних умов. Результати оцінки визначили, що розраховане значення природної складової кратності повітрообміну для приміщень з сучасними огороженнями не перевищує  $0,25 \text{ год}^{-1}$ . Тому застосування цих значень природної кратності повітрообміну призводить до зменшення енергопотреб до 50%, в порівнянні з базовою лінією.

В приміщенні потрібно забезпечувати нормативну кратність повітрообміну, що повинно компенсуватися провітрюванням або механічною складовою повітрообміну. Врахування фактичної природної кратності природного повітрообміну в приміщеннях змінної зайнятості уточнює визначення рівня ефективності енергозберігаючих заходів з термомодернізації, а також визначає складову, що повинна забезпечуватися механічною вентиляцією, а отже і може бути утилізована в теплообмінниках рекуперативного типу.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** енергопотреба, динамічні сіткові моделі, кратність повітрообміну, інфільтрація.

### РАСЧЕТ ПОЧАСОВОЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ КРАТНОСТИ ВОЗДУХООБМЕНА И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ЭНЕРГОПОТРЕБНОСТЬ ЗДАНИЙ В ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

**ТИМОФЕЕВ Н.В.** Канд. технических наук, доц., зав. Научно-техническим центром по вопросам энергоэффективности и энергосбережения в сфере строительства, ГП «Государственный



научно-исследовательский институт строительных конструкций»,  
г. Киев, Украина,  
e-mail: tymofieiev@ndibk.gov.ua,  
тел.: +38 (050) 239-28-37,  
ORCID: 0000-0001-9234-6567

**ДЕШКО В.І.** Д-р технических наук, проф., зав. каф., Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»,  
г. Киев, Украина,  
e-mail: te@kpi.ua,  
тел.: +38 (044)-204-82-50,  
ORCID: 0000-0002-8218-3933

**БЕЛОУС И.Ю.** Канд. технических наук, ассистент, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»,  
г. Киев, Украина,  
e-mail: biloys\_inna@ukr.net,  
тел.: +38 (068)-015-15-63,  
ORCID: 0000-0002-6640-103X

**ГЕТМАНЧУК А.А.** Магистр, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»,  
г. Киев, Украина,  
e-mail: hetmanchuk.anna@gmail.com,  
тел.: +38 (066) 06 92 638,  
ORCID: 0000-0003-1655-8642

## АННОТАЦИЯ

На энергетические характеристики зданий влияет большое число как внешних, так и внутренних факторов. Одним из наиболее влиятельных параметров является кратность воздухообмена, которая имеет естественную (инфильтрация) и механическую природу. Естественная составляющая кратности воздухообмена зависит от большого числа факторов и ее значение отличается для разных помещений при одинаковых теплофизических свойствах ограждений.

В работе представлены результаты математического моделирования почасового графика энергопотребности здания для базового уровня при нормативном значении кратности воздухообмена, а также при расчетном значении природной составляющей кратности воздухообмена, которая изменяется в соответствии с природными условиями. Результаты оценки определили, что расчетное значение естественной составляющей кратности воздухообмена для помещений с современными ограждениями не превышает  $0,25 \text{ ч}^{-1}$ . Поэтому применение этих значений кратности воздухообмена приводит к уменьшению энергопотребности до 50%, по сравнению с базовой линией.

В помещении нужно обеспечивать нормативную кратность воздухообмена, что должно компенсироваться механической составляющей воздухообмена. Учет фактической кратности есте-

ственного воздухообмена в помещениях переменной занятости улучшает привлекательность энергосберегающих мероприятий по термомодернизации, а также определяет составляющую, которая должна обеспечиваться механической вентиляцией, а, следовательно, и может быть утилизирована в теплообменники рекуперативного типа.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** энергопотребность, динамические сетевые модели, кратность воздухообмена, инфильтрация.

## CALCULATION OF THE NATURAL RATE OF AIR EXCHANGE PER HOUR AND ITS INFLUENCE ON THE ENERGY NEEDS OF BUILDINGS IN NET DYNAMIC MODELS

**TYMOFEYEV M.V.** PhD, Ass. Prof., Head of the Scientific and Technical Center for Energy Efficiency and Energy Saving in the Construction, SE «The State Research Institute of Building Constructions», Kyiv, Ukraine,  
e-mail: tymofieiev@ndibk.gov.ua,  
tel.: +38 (050) 239-28-37,  
ORCID: 0000-0001-9234-6567

**DESHKO V.I. Dr.** Prof., Head of the Department, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine,  
e-mail: te@kpi.ua,  
tel.: +38 (044)-204-82-50,  
ORCID: 0000-0002-8218-3933

**BILOUS I.Yu.** PhD, Ass., National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine,  
e-mail: biloys\_inna@ukr.net,  
tel.: +38 (068)-015-15-63,  
ORCID: 0000-0002-6640-103X

**HETMANCHUK H.O.** Master student, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine,  
e-mail: hetmanchuk.anna@gmail.com,  
tel.: +38 (0 66) 06 92 638,  
ORCID: 0000-0003-1655-8642

## ABSTRACT

The buildings energy characteristics are influenced by a large number of external and internal factors. One of the most influential parameters is the air exchange rate, which has a natural (infiltration) and mechanical nature. The air exchange rate natural component depends on a large number of factors and its value varies for different premises with the same envelope thermophysical properties.

The paper presents the results of the mathematical modeling of the building energy need per hour schedule for the base level with the standard value of the air exchange rate, as well at the calculated value



of the air exchange rate natural component varying according to natural conditions. The results of rating determined that for premises with modern envelopes the calculated value of the air exchange rate natural component does not exceed  $0.25 \text{ h}^{-1}$ . Therefore, the application of those values of the air exchange rate results in the energy need decrease up to 50%, compared with the baseline.

In the room it is necessary to ensure the standard multiplicity of air exchange, which must be offset by the mechanical component of air exchange. Taking into account the actual rate of natural air exchange in the premises of the variable occupancy improves the attractiveness of the thermo-modernization with energy-saving measures, as well as determines the component that must be provided by mechanical ventilation and, therefore, can be utilized in the recuperative heat exchangers as well.

**KEY WORDS:** Energy need, dynamic net models, air exchange rate, infiltration.

## ВСТУП

На функціонування будівель витрачається біля 40% енергоносіїв в усьому світі, лівова частка яких складають витрати теплової енергії. Підвищення енергоефективності існуючого будівельного фонду для України є актуальною задачею, зважаючи на енергетичну залежність нашої держави.

Теплові та енергетичні характеристики будівель залежать від великої кількості зовнішніх і внутрішніх факторів [1-3], серед яких найбільш впливовими є теплофізичні властивості оболонки, геометрія, теплонадходження від сонця та додаткові внутрішні, опалення, повітрообмін та особливості експлуатації. Саме ці показники впливають на базовий рівень енергоспоживання.

## АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Відповідно до стандарту [4] щодо рекомендацій першочерговості впровадження енергозберігаючих заходів, основна увага приділена заходам з термосанації оболонки будівлі. Після впровадження заходів з термосанації (перший етап), вентиляційна складова теплових навантажень у житлових і комерційних будівлях може становити від 25 до 50% [5, 6, 3]. Зменшення цієї складової є другим етапом впровадження енергозберігаючих заходів в Україні.

Проведені в останні роки дослідження значну увагу приділяють питанням повітрообміну [7-9]. Дослідження [10] показали, що найбільш впливовим параметром на енергобаланс будівлі є кратність повітрообміну. Наприклад, стаття витрати на інфільтрацію у Франції складає 15% [11]. У США дослідники приходять до висновку, що дана складова сягає 33% [12].

В розрахунках базового рівня енергоспоживання ця величина приймається відповідно до нор-

мативних значень [13], а її фактичне значення важко визначити експериментально, враховуючи, що природна складова цього параметру має динамічну природу.

**МЕТОЮ РОБОТИ** є підвищення ефективності управління використанням енергії на основі деталізації експлуатаційних показників природної кратності повітрообміну із застосуванням динамічних сіткових моделей для визначення енергопотреби будівлі.

Методичну основу проведеного наукового дослідження склали: методи математичного та імітаційного моделювання, системний підхід з урахуванням температурно-погодних та експлуатаційних факторів.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Тенденції розвитку математичних моделей для визначення енергетичного стану будівлі спрямовані на зменшення часових інтервалів та в напрямку визначення локалізації характеристик системи і впливових факторів [14, 6, 2].

Для дослідження енергетичних характеристик будівлі було розглянуто групу репрезентативних кімнат південної та північної орієнтації для теплофізичних властивостей огорожень, характерних для масової забудови з двокамерними склопакетами в ПВХ-профілях з опором повітропроникності  $2,7 \text{ (м}^2\cdot\text{год}\cdot\text{Па}^{2/3})/\text{кг}$ . Будівля має 6 поверхів, де підтримується постійна температура повітря в приміщеннях  $18^\circ\text{C}$ . На основі обраних репрезентативних приміщень (на 1, 3 та 6 поверхах північної та південної орієнтації) створено динамічні сіткові моделі 5R1C (за стандартами ДСТУ Б EN ISO 13790:2011 [15] та EN ISO 13786:2008 [16]). В роботі дослідження проведені для кліматичних умов м. Києва за даними міжнародного кліматичного погодинного файлу IWEC [17].

На основі динамічної сіткової моделі 5R1C проведено дослідження впливу зміни кратності повітрообміну на енергопотребу будівлі.

## РОЗРАХУНОК ПРИРОДНОЇ СКЛАДОВОЇ КРАТНОСТІ ПОВІТРООБМІНУ В ДИНАМІЦІ МІНЛИВОСТІ УМОВ ЗОВНІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Зазвичай, у математичних моделях для визначення енергопотреби будівель вентиляційна складова (повітрообмін) задається через значення кратності повітрообміну. Але навіть при однакових, з точки зору повітропроникності, конструкціях вікон, природним чином в приміщення потрапляє різна кількість повітря, що пов'язано з рядом факторів, як зовнішніх, так і внутрішніх: швидкість, напрям вітру, поверховість, опір повітропроникності, температури повітря в приміщенні та зовні. В роботі використано узагальнення методик визначення





кратності повітрообміну, заснованих на визначенні різниці тисків, наведених в дослідженнях [3, 18, 19] та за підходами ASHRAE [20-22]. Різниця тисків в будівлі створюється трьома різними механізмами: ефект стека (stack effect), тиску вітру, примусовий тиск вентилятора механічної вентиляції (рис.1), - як їх сума.

Стек ефект, що створюється різницею густин між теплим і холодним повітрям, визначається за (1) [19]:

$$\Delta P_s = 3456 \cdot z \left( \frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i} \right), \quad (1)$$

де  $T_e$ ,  $T_i$  - температура зовнішнього та внутрішнього повітря, відповідно, К;  $z$  - висота від опорної точки, м;  $z=0$ , обраної за нейтральним рівнем тиску (neutral pressure level - NPL) на середньому поверсі будівлі.

Вітряний тиск створюється, коли потік повітря потрапляє на перешкоду (вираз (2)):

$$\Delta P_w \in \frac{\rho U_{met}^2}{2} C_{hp}(\theta), \quad (2)$$

де  $\Delta P_w$  - вітряний перепад тиску, Па;  $\rho$  - густина навколишнього середовища, кг/м<sup>3</sup>;  $U_{met}$  - швидкість вітру за метеоданими найближчої метеостанції, м/с;  $C_h$  - коефіцієнт тиску вітру, що враховує поверховість;  $C_p(\theta)$  - коефіцієнт, що враховує особливості напрямку вітру.

В роботі розраховано природну складову кратності повітрообміну, що обумовлена механізмом (1, 2). Для розглянутого типу віконних конструкцій розраховані за (1, 2) значення природної кратності повітрообміну знаходяться в діапазоні від -0,25 до 0, 25 год<sup>-1</sup>. Найбільший діапазон коливань цієї величини спостерігається для місяця січня.

На першому поверсі переважно спостерігається явище інфільтрації (приплив свіжого повітря природним чином через нещільності у віконних конструкціях), на середньому третьому поверсі по всіх місяцях кратність у середньому близька до нуля, що пов'язано із NPL будівлі (стек ефект), на шостому поверсі спостерігається ексфільтрація, якій відповідають від'ємні значення кратності.

На рис. 2 наведено середнє за опалювальний сезон значення природної складової кратності повітрообміну для основних та проміжних орієнтацій приміщень за сторонами світу (на прикладі 1 поверху).

Для міста Києва типовим напрямком вітру є північний та північно-західний, що призво-

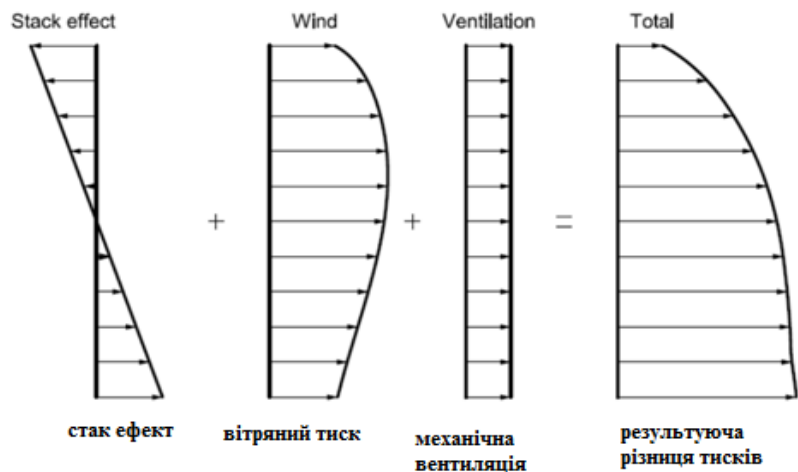


Рис. 1. Приклад підсумування профілів різниці тиску по висоті будівлі [7]

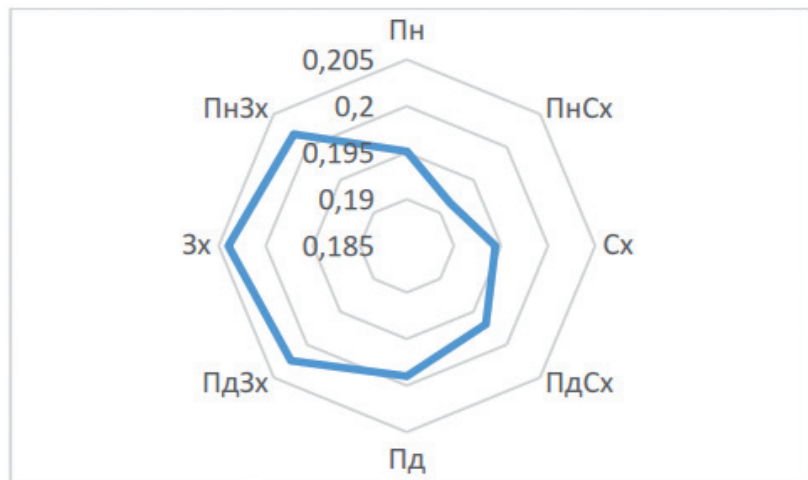


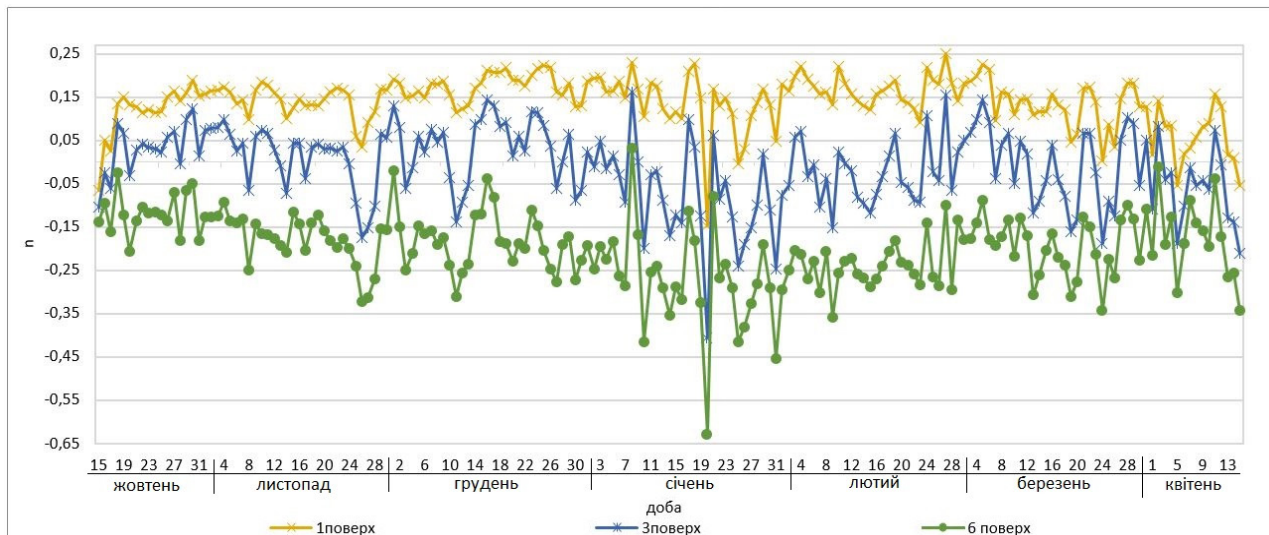
Рис. 2. Середня за опалювальний сезон природна кратність повітрообміну приміщення першого поверху для різних орієнтацій, год<sup>-1</sup>

дить до менших значень природної кратності повітрообміну для приміщень відповідних орієнтацій (рис. 2), що пояснюється найменшим значенням коефіцієнту  $C_p(\theta)$ .

З балансу природної кратності повітрообміну розглянутої шестиповерхової будівлі випливає, що кількість інфільтрованого та ексфільтрованого повітря однакова, тобто для розглянутого періоду, сума природних кратностей повітрообміну дорівнює нулю. На рис. 3 наведено зміну середньодобової природної кратності повітрообміну для репрезентативних приміщень північної орієнтації.

### РОЗРАХУНОК ЕНЕРГОПОТРЕБИ ТА АНАЛІЗ КОЛИВАНЬ НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ ЗМІНІ ФАКТИЧНОГО РІВНЯ ПРИРОДНОЇ КРАТНОСТІ ПОВІТРООБМІНУ

Відповідно до моделі 5RIC (динамічна сіткова модель кімнати, п'ять опорів, одна ємність) енергопотребна на опалення знаходиться за розра-



**Рис. 3.** Розрахована зміна середньодобової кратності повітрообміну для північної орієнтації та кліматичних даних (з файлу IWEC) протягом опалювального періоду

хунковим значення потужності опалення для кожної години, що повинна бути надана до вузла температури внутрішнього повітря ( $\theta_{air}$ ), для підтримання певної заданої температури. Схема реалізації методу наведена на рис. 4.

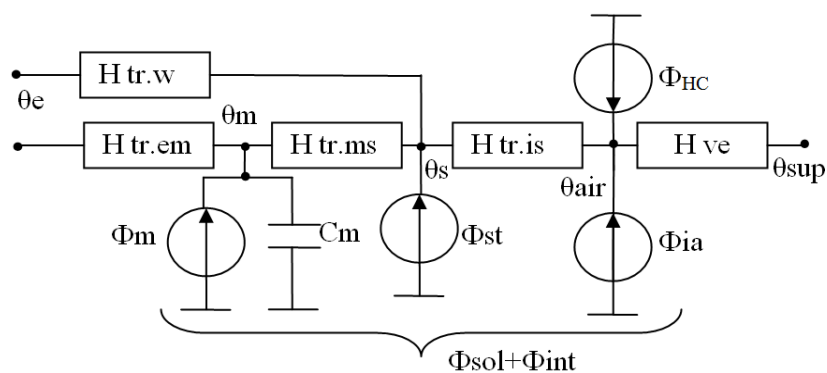
Графік енергопотребы при  $n = const$  обрано за базовий рівень і від нього розраховується економія впровадження енергозберігаючих заходів. При використанні розрахованих значень природної складової кратності повітрообміну, за рахунок природної вентиляції (нещільностей у сучасних віконних конструкціях) надходження свіжого повітря в зону кімнати і втрати тепла значно змінюються під дією природних чинників, а відповідно змінюється і енергопотреба будівлі.

Проведено співставлення відмінності питомої енергопотребы розрахованої для  $n = 1 \text{ год}^{-1}$  (нормативна кратність повітрообміну) та розрахованого значення природної складової ( $n = var$ ). Відмінність енергопотребы для опалювального періоду може становити понад 50%, в порівнянні з базовою лінією. Наприклад, на першому поверсі приміщення Пн орієнтації відмінність 50%, на Пд – 65%.

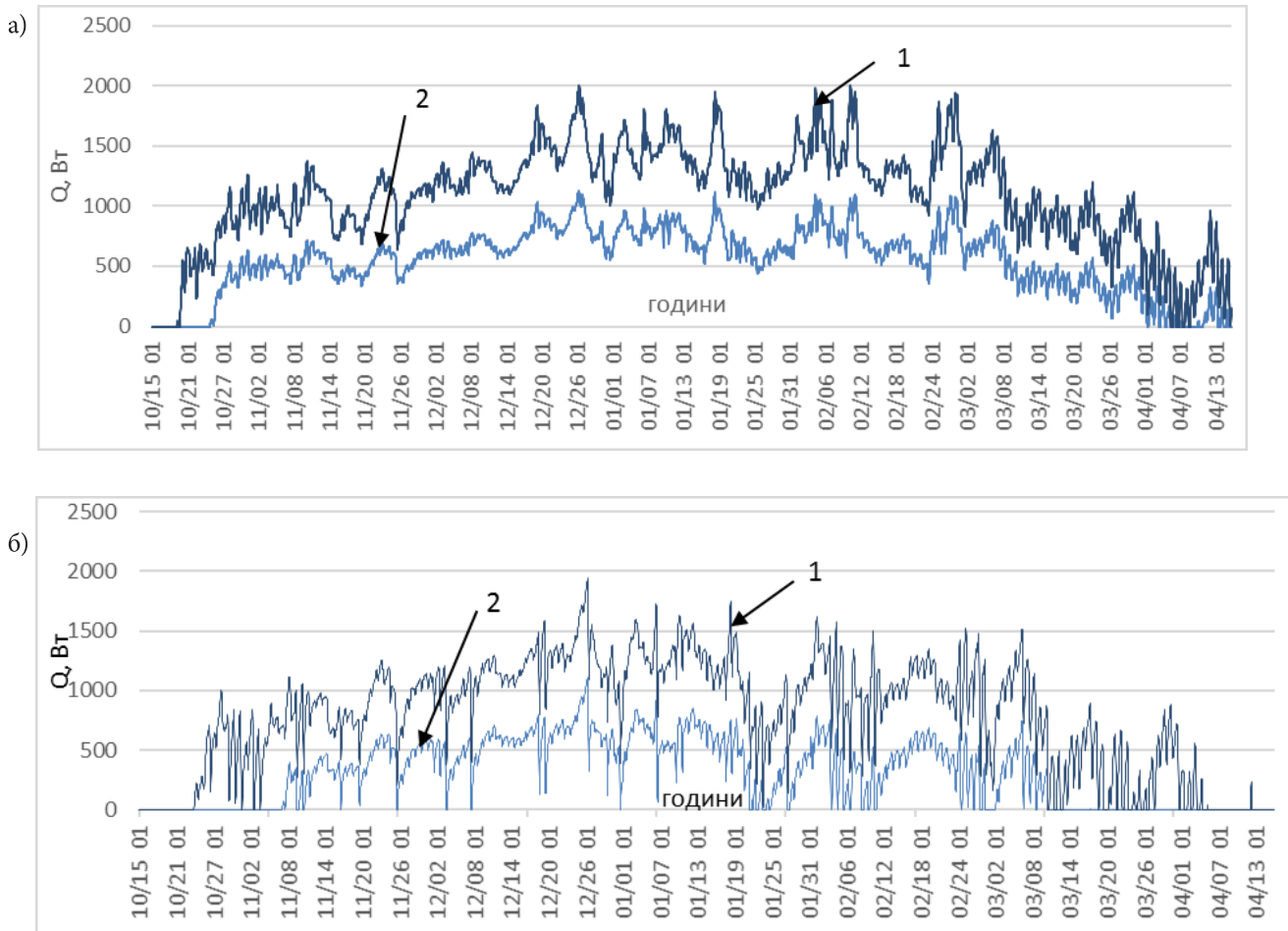
При визначеному рівні природного повітрообміну для розглянутого типу вікон (опір повітропроникності), система опалення приміщень на південь може бути відімкнена в періоди міжсезоння (жовтень, квітень), тобто вікно працює як пасивна система опалення.

В холодний період року енергопотреба, розрахована для значень кратності повітрообміну нормативних та відповідно до змінних природних умов (природної кратності повітрообміну), відрізняється до 50%, а для періоду міжсезоння – до 75%.

На рис. 5 наведено зміну навантаження на систему опалення для нормативних (1) та розрахованих (2) значень природної кратності повітрообміну для приміщення, орієнтованого на північ (а) та південь (б), розташованих на першому поверсі.



**Рис. 4.** Динамічна сіткова модель кімнати, п'ять опорів, одна ємність (5RIC) [6], де  $\theta_{air}$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_e$ ,  $\theta_m$ ,  $\theta_{sup}$  – температура повітря, внутрішніх поверхонь, зовнішнього середовища, масиву непрозорих огорожень, припливного повітря, відповідно, °C;  $\Phi_m$ ,  $\Phi_{sp}$ ,  $\Phi_{ia}$  – додаткові теплонадходження від сонця ( $\Phi_{sol}$ ) та внутрішні ( $\Phi_{int}$ ), що розподіляються між вузлом повітря, поверхнею внутрішніх огорожень та масивом стін,  $B_m$ ;  $\Phi_{HC}$  – тепловий потік від системи опалення,  $B_m$ ;  $C_m$  – внутрішня теплоємність непрозорих елементів огорожень, Дж/К;  $H_{tr.w}$ ,  $H_{tr.em}$ ,  $H_{tr.ms}$ ,  $H_{tr.is}$ ,  $H_{ve}$  – сполучена провідність між вузлами температури, що характеризує трансмісійні втрати через оболонку будівлі та вентиляцію, Вт/К



**Рис. 5.** Навантаження на систему опалення для опалювального періоду приміщення орієнтованого на північ (а) та південь (б): 1 – при нормативних значеннях кратності повітрообміну; 2 – при розрахованих (природна складова)

Для приміщень, орієнтованих на південь, коливання навантаження на систему опалення протягом доби дещо більші, на відміну від північної, що пояснюється сонячними теплонадходженнями в зону кімнати. Також в деякі дні спостерігаються короткострокові відключення опалення в пікові години сонячної активності.

### ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. На основі узагальненої методики [18-22] та міжнародного кліматичного файлу IWEC [17] проведено погодинний розрахунок природної складової кратності повітрообміну. Визначено вплив на неї мінливості погодних умов (швидкість та напрям вітру, температура), зміни поверховості будівлі та поверху розташування кімнати. Значення природної кратності повітрообміну не перевищує  $0,25\text{год}^{-1}$ . Потрібно відмітити, що її величина дещо більша для приміщень північної орієнтації, що обумовлено переважно північним напрямком вітру.
2. Створено динамічні сіткові моделі для

дослідження енергетичного стану будівель на основі стандартів EN ISO 13790 [15] та EN ISO 13786 [16].

3. Встановлено, що енергопотреба будівлі при нормативному значенні кратності повітрообміну та розрахованому значенні природної складової кратності повітрообміну відрізняється до 50-75%.
4. Для підтримання нормативного значення кратності повітрообміну при перебуванні людей в приміщенні потрібно додатково використовувати провітрювання або механічну вентиляцію. Врахування фактичної природної кратності природного повітрообміну в приміщеннях змінної зайнятості уточнює визначення рівня ефективності енергозберігаючих заходів з термомодернізації, а також визначає складову, що повинна забезпечуватися механічною вентиляцією, а отже і може бути утилізована в теплообмінниках рекуперативного типу. Дослідження динаміки впливу кратності повітрообміну на енергопотребу за цих умов потребує подальших досліджень.



## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Maslesa, I. E., Jensen P. A. & Birkved, M. Indicators for quantifying Environmental Building Performance: A systematic literature review. *J. of building engineering*. 2018. Vol. 19. Pp. 552-560.
2. Bilous, I. Yu., Deshko V. I. & Sukhodub I. O. Building inside air temperature parametric study. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. Vol. 8. Pp. 65–75.
3. Mechouet, A., Mouhib, T., Balhamri, A. & Ouali, E. M. Evaluating the impact of air infiltrations on the thermal and energy performances for different types of dwellings in casablanca city. *International J. of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. 2018. Vol. 8. Pp. 793-800.
4. ДСТУ-Н Б В.3.2-3:2014 Настанова з виконання термомодернізації житлових будинків. – Чинний від 2015-10-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2015. – 40 с.
5. Younes, C., Abishihid, C. & Bitsuamlak, G. Air infiltration through building envelopes: a review. *J. of Building Physics*. 2011. Vol. 35-3. Pp. 267-302.
6. Білоус І. Ю. Оцінювання енергоефективності будівлі в умовах динамічної зміни характеристик середовища: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук / І. Ю. Білоус. – Київ, 2019. – 20 с.
7. Kalamees, T. Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia. *Building and Environment*. 2007. Vol. 42. Pp. 2369-2377.
8. Jokisalo, J., Kurnitski, J., Korpi, M., Kalamees, T. & Vinha, J. Building leakage, infiltration, and energy performance analyses for finnish detached houses. *Building and Environment*. 2009. Vol. 44. Pp. 377-387.
9. Chen, S., Levine, M. D., Li, H., Yowargana, P. & Xie, L. Measured air tightness performance of residential buildings in North China and its influence on district space heating energy use. *Energy and Buildings*. 2012. Vol. 51. Pp. 157–164.
10. Bilous, I., Deshko, V. & Sukhodub, I. Parametric analysis of external and internal factors influence on building energy performance using non-linear multivariate regression models. *J. of building engineering*. 2018. Vol. 20. Pp. 327-336.
11. Leprince, V. & Lyon, C. *Les rencontres de l'Arcad, Etanchéité à l'air des enveloppes*. 2011. Vol. 20.
12. Emmerich, S. J., Persily, A. K. & Dowell, T. P. Impact of infiltration on heating and cooling loads in US office buildings. *Proc. of the 26<sup>th</sup> IEA Conf. of the Air Infiltration and Ventilation Center*. 2005.
13. ДСТУ Б А.2.2-12:2015 Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні – Чинний від 2015.01.01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2015. – 140 с.
14. Bilous, I. Yu. & Deshko, V. I. Mathematical models for determination of specific energy need for heating and cooling of the administrative building. *Intern. J. of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7 (4.3). Pp. 325-330.
15. ДСТУ Б EN ISO 13790:2011 Енергоефективність будівель. Розрахунок енергоспоживання при опаленні та охолодженні (EN ISO 13790:2008, IDT) – Чинний від 01.01.2013. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2011. – 229 с.
16. EN ISO 13786:2007 Thermal performance of building component - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods. — CEN. European Committee for Standardization, 2007. 27 p.
17. Міжнародний кліматичний файл погоди IWEC для типового року: [https://energyplus.net/weather-location/europe\\_wmo\\_region\\_6/UKR//UKR\\_Kiev.333450\\_IWEC](https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR//UKR_Kiev.333450_IWEC).
18. Biler, A., Tavit, A. U., Su, Y. & Kha, N. A Review of Performance Specifications and Studies of Trickle Vent. Buildings, 2018. Vol. 8. Pp. 152-183.
19. Berge A. Analysis of Methods to Calculate Air Infiltration for Use in Energy Calculations. Sweden 2011. 98 p.
20. ASHRAE Standard 62.2-2003 Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Low-Rise Residential Buildings.
21. ASHRAE Fundamentals Handbook. 1997. P. 85.
22. ДСТУ Б В.2.2-19:2007 Будинки і споруди. Метод визначення повітропроникності огорожувальних конструкцій в натурних умовах. – Чинний від 2008-07-01. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2008. – IV, 19 с.

## REFERENCES

1. Maslesa, I. E., Jensen, P. A. & Birkved, M. (2018). Indicators for quantifying Environmental Building Performance: A systematic literature review. *J. of building engineering*, Vol. 19, 552-560 [in English].
2. Bilous, I. Yu., Deshko, V. I. & Sukhodub, I. O. (2016). Building inside air temperature parametric study. *Magazine of Civil Engineering*, Vol. 8, 65–75 [in English].
3. Mechouet, A., Mouhib, T., Balhamri, A. & Ouali, E. M. (2018). Evaluating the impact of air infiltrations on the thermal and energy



- performances for different types of dwellings in Casablanca city. *International J. of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, Vol. 8, 793-800 [in English].
4. Guidelines for the implementation of thermomodernisation of residential buildings. (2014). DSTU-H B V.3.2-3:2014 from 01<sup>st</sup> October 2015. K.: DP «Ukrarhbudinform», 2015 [in Ukrainian].
  5. Younes, C., Abishihid, C. & Bitsuamlak, G. (2011). Air infiltration through building envelopes: a review. *J. of Building Physics*, Vol. 35-3, 267-302 [in English].
  6. Bilous, I. Yu. (2019). Rating of building energy performance in the conditions of dynamic change of environmental characteristics. Extended abstract of candidate thesis. K. [in Ukrainian].
  7. Kalamees, T. (2007). Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia. *Building and Environment*, Vol. 42, 2369-2377 [in English].
  8. Jokisalo, J., Kurnitski, J., Korpi, M., Kalamees, T. & Vinha, J. (2009). Building leakage, infiltration, and energy performance analyses for finnish detached houses. *Building and Environment*, Vol. 44, 377-387 [in English].
  9. Chen, S., Levine, M. D., Li, H., Yowargana, P. & Xie, L. (2012). Measured air tightness performance of residential buildings in North China and its influence on district space heating energy use. *Energy and Buildings*, Vol. 51, 157-164 [in English].
  10. Bilous, I., Deshko, V. & Sukhodub, I. (2018). Parametric analysis of external and internal factors influence on building energy performance using non-linear multivariate regression models. *J. of building engineering*, Vol. 20, 327-336 [in English].
  11. Leprince, V. & Lyon, C. (2011). *Les rencontres de l'Arcad, Etanchéité à l'air des enveloppes*. Vol. 20 [in French].
  12. Emmerich, S. J., Persily, A. K. & Dowell, T. P. (2005). Impact of infiltration on heating and cooling loads in US office buildings. *Proc. of the 26<sup>th</sup> IEA Conf. of the Air Infiltration and Ventilation Center* [in English].
  13. Method for calculation of energy use for space heating, cooling, ventilation, lighting and domestic hot water (2015). DSTU B A.2.2-12:2015 from 01<sup>st</sup> January 2016. K.: DP «Ukrarhbudinform» [in Ukrainian].
  14. Bilous, I. Yu. & Deshko, V. I. (2018). Mathematical models for determination of specific energy need for heating and cooling of the administrative building. *Intern. J. of Engineering & Technology*, Vol. 7 (4.3), 325-330 [in English].
  15. Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling (2008). EN 13790:2008. CEN. European Committee for Standardization [in English].
  16. Thermal performance of building component - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods (2007). EN ISO 13786:2007. CEN. European Committee for Standardization, 2007 [in English].
  17. International Weather for Energy Calculations. Retrieved from [https://energyplus.net/weather-location/europe\\_wmo\\_region\\_6/UKR//UKR\\_Kiev.333450\\_IWEC](https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR//UKR_Kiev.333450_IWEC). [in English].
  18. Biler, A., Tavil, A. U., Su, Y. & Kha, N. (2018). A Review of Performance Specifications and Studies of Trickle Vent. Buildings. Vol. 8. [in English].
  19. Berge, A. (2011). Analysis of Methods to Calculate Air Infiltration for Use in Energy Calculations. Göteborg: Chalmers University of Technology [in English].
  20. ASHRAE Standard 62.2-2003 Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Low-Rise Residential Buildings [in English].
  21. ASHRAE Fundamentals Handbook. 1997. P. 85 [in English].
  22. Method of determination of air permeability of envelope structures in field conditions (2015). DSTU B V.2.2-19:2007 from 01<sup>st</sup> July 2007. K.: DP «Ukrarhbudinform» [in Ukrainian].

Стаття надійшла до редакції 16.04.2019 р.