



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ПІВНІЧНО-СХІДНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
ТРАНСПОРТНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ**

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

Випуск 191

Харків 2020

УДК 656.2(062)

У Збірнику наукових праць УкрДУЗТ відображені матеріали та наукові розробки вчених і спеціалістів залізничного транспорту, наукових установ і промисловості з вирішення сучасних задач та проблем організації перевезень та управління на транспорті, рухомого складу і тяги поїздів, транспортного будівництва та залізничної колії, автоматики, телемеханіки та зв'язку.

Збірник наукових праць УкрДУЗТ призначений для інженерно-технічних працівників, магістрантів, студентів і науковців залізничного транспорту та промисловості.

З електронною версією збірника можна ознайомитися на сайті:
http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus (Польща).

З реєстрацією збірника можна ознайомитися на сайті
<http://jml2012.indexcopernicus.com>.

Google Scholar профіль: <https://scholar.google.com.ua>

Веб-сторінка збірника: <http://znp.kart.edu.ua>

Реферативна база

"Наукова періодика України": <http://csw.kart.edu.ua>

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р.
Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 7 від 21 вересня 2020 р.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що включаються до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 15.10.2019 р. № 1301).

Редакційна колегія

Головний редактор – Вовк Руслан Володимирович, доктор фізико-математичних наук, професор, УкрДУЗТ

Випусковий редактор – Кравець Андрій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, УкрДУЗТ

Залізничний транспорт (273)

Пузир В. Г., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Фомін О. В., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Путято А. В., д.т.н., доцент (БДУТ, Білорусь)
Горобченко О. М., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Дацун Ю. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Мартинов І. Е., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Vureika G., dsc, professor (VGTU, Литва)
Михалків С. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ловська А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Будівництво та цивільна інженерія (192)

Бліхарський З. Я., д.т.н., професор
(НУ Львівська політехніка)
Борзяк О. С., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ватуля Г. Л., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Лобяк О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Орел Є. Ф., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Плугін А. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Плугін Д. А., д.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Пушкарьова К. К., д.т.н., професор (КНУБА)
Толмачов С. М., д.т.н., професор (ХНАДУ)
Трикоз Л. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Шабанова Г. М., д.т.н., професор (НТУ ХП)
Шмуклер В. С., д.т.н., професор (ХНУМГ)
Fisher Hans-Bertram., dr. ind., professur (Bauhaus-
Universität Weimar F.A., Німеччина)
Опанасенко О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Механічна інженерія (131, 132, 133)

Астанін В. В., д.т.н., професор (НАУ м. Київ)
Воронін С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Геворкян Е. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Ковальова І. М., к.т.н., доцент (НАНБ, Білорусь)
Онопрійчук Д. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Стефанов В. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Тимофеев С. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Тимофеева Л. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Федориненко Д. Ю., д.т.н., професор (ЧНТУ,
м. Чернігів)

Транспортні технології (275)

Панченко С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Бутько Т. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Прохорченко А. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Шраменко Н. Ю. д.т.н., професор (ХНТУСГ)
Мороз М. М. д.т.н., професор (КНУ, м. Кременчук)
Кириллова О. В., д.т.н., доцент (ОНМУ, м. Одеса)
Бабаєв М. М., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Лаврухін О. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Потапов Д. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ходаківський О. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Геодезія та землеустрій (193)

Eimuntas Paršeliūnas, Prof. Habil Dr. (VGTU, Литва)
Jūrate Sužiedelytė Visockienė, Assoc. Prof. Dr.
(VGTU, Литва)
Угненко Є. Б., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Маланчук М. С., д.т.н., доцент (НУ «Львівська
політехніка»)
Церклевич А. Л., д.т.н. професор (НУ «Львівська
політехніка»)
Viselga Gintas, Assoc. Prof. Dr. (VGTU, Литва)
Мамонов К. А., д.е.н., професор (ХНУМГ)
Савенко В. Я., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)

Теплоенергетика (144)

Каграманян А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Мороз В. І., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Фалендиш А. П., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Грицук І. В., д.т.н., доцент (ХМДА, м. Херсон)
Сотник М. І., д.т.н., доцент (СДУ, м. Суми)
Дешко В. І., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)
Володарець М. В., к.т.н., старш. викл. (УкрДУЗТ)
Бабіченко Ю. А., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Pavlenko A., dsc. tech., profesor (KUT, Poland)
Bartoszewicz J., dsc. tech., profesor (PUT, Poland)
Tomaszewski F., phd, profesor (PUT, Poland)

ЗМІСТ

Механічна інженерія (131, 132, 133)

- Субботіна В. В., Білозеров В. В., Соболев О. В.* Структура і властивості гетерогенного каталізатора на оксидному носії на основі алюмінію 6

Теплоенергетика (144)

- Deshko V., Sukhodub I., Yatsenko O.* Joint Influence of Intermittent Heating Mode and Outdoor Factors on Apartment Heat Load 17

Будівництво та цивільна інженерія (192)

- Ромашко В. М.* Загальні основи механіки деформування залізобетонних елементів і конструкцій 27
- Резнік П. А., Шмуклер В. С., Мохамед Альмохамед.* Про одну можливість оцінювання прогресуючого обвалення конструкцій при пожежі 35
- Ромашко-Майструк О. В.* Основи моделювання енергетичного ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій 46

Залізничний транспорт (273)

- Барібін М. А., Фалендиш А. П., Гатченко В. О., Клецька О. В., Кіріцева О. В.* Системи глобального позиціонування в тягових розрахунках з розрахуванням зносу колісних пар рухомого складу 53

УДК 669.295.539.121

СТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ ГЕТЕРОГЕННОГО КАТАЛІЗАТОРА
НА ОКСИДНОМУ НОСІЇ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ

Кандидати техн. наук В. В. Субботіна, В. В. Білозеров, д-р фіз.-мат. наук О. В. Соболю

STRUCTURE AND PROPERTIES OF HETEROGENEOUS CATALYST ON AN OXIDE
CARRIER BASED ON ALUMINIUM

PhD (Tech.) V. V. Subbotina, PhD (Tech.) V. V. Belozarov, D. Sc. (Phys-Math.) O. V. Sobol

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.191.2020.217284>

Анотація. В роботі оптимізувалася технологія МДО з метою отримання високої розвиненості покриттів та їх гарної адгезії з основою для створення високоефективного гетерогенного каталізатора на оксидному носії системи Pt/Al₂O₃. Методами МДО на сплаві Д16 і технічному алюмінії А97 отримані оксидні покриття різного фазового складу, різної структури поверхні і шорсткості, товщиною 20–100 мкм. Показано, що структура і морфологія поверхні покриттів визначається умовами електролізу, що дозволяє проводити їх оптимізацію для підвищення ефективності використання. Виявлено закономірності впливу - фазово-структурного стану і морфології МДО-покриттів на ефективності їх використання в системі Pt/Al₂O₃ як каталізаторів очищення оксиду азоту, що дозволило досягти величини коефіцієнта очищення понад 90 %.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, мікродугове оксидування, шорсткість, фазовий склад, коефіцієнт очищення.

Abstract. In this study, the MAO technology was optimized in order to obtain a high development of coatings and their good adhesion to the substrate for the creation of a highly efficient heterogeneous catalyst on the oxide carrier of the Pt/Al₂O₃ system. Oxide coatings of different phase composition, surface structure and roughness, with a thickness of 20–100 μm were obtained by MAO methods on D16 alloy and A97 commercial aluminum. It is shown that the structure and morphology of the surface of the coatings is determined by the conditions of electrolysis, which allows their optimization to improve efficiency. It is determined that the surface coating layer consists of the following phases: γ-Al₂O₃, α-Al₂O₃ and 3 Al₂O₃ • 2SiO₂ (mullite). On the D16 alloy there was a predominant formation of γ-Al₂O₃ and α-Al₂O₃ phases. Increasing the duration of microarc oxidation increases the content in the coating of the α-Al₂O₃ phase. It is established that the use of MAO technology allows to change the morphology of the surface and its roughness in a wide range. The formation of two types of surface inhomogeneity in the planar growth region of coatings is revealed: with a relatively small size of such formations (up to 50 μm) and with the formations of the second type, the sizes of which in the planar growth region of MAO coatings reach 300 μm.

It is determined that the purification coefficient of nitrogen oxide in Pt/Al₂O₃ catalysts is temperature dependent. At relatively low (150°C) and high (300°C) temperatures the highest value of α is achieved in systems based on MAO coatings with binary (γ-Al₂O₃ and α-Al₂O₃) phase composition. In the temperature range of the most effective cleaning (200–250°C) the greatest influence on their efficiency, apparently, has a surface morphology, namely, the formation of large

(up to 300 μm) formations of surface inhomogeneity in the growth plane. In this case, the purification coefficient (for the reduction of nitrogen oxides) α reaches 92 %.

The results of the study can be used in the development and creation of a new type of catalysts for the Pt/Al₂O₃ system.

Keywords: aluminum alloy, microarc oxidation, roughness, phase composition, purification coefficient.

Вступ. Нейтралізація шкідливих викидів (найбільшою мірою – оксидів азоту і вуглецю) вихлопних газів автотранспортних машин є нагальним завданням сучасної екології та навколишнього середовища. Ці шкідливі викиди значно подразнюють слизові оболонки очей, носа, руйнують легені людини. Зокрема оксид азоту при русі дихальним трактом взаємодіє з вологою верхніх дихальних шляхів, утворюючи азотну й азотисту кислоти. Ефективним способом очищення відпрацьованих газів від незгорілих вуглеводнів є використання нанесених на носії каталізаторів у реакціях довідпалювання і селективного каталітичного відновлення.

Для цього в наш час усе більшого поширення набувають гранульовані та монолітні каталітичні системи, які містять активні метали на різних носіях. Як носії застосовують як природні, так і синтетичні матеріали (оксиди, алюмосилікати та ін.).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оксиди перехідних металів, а також благородні метали, в тому числі нанесені на керамічні моноліти та металеві підкладки, застосовують як каталізатори окиснення-відновлення [1, 2]. Як активний компонент використовують один або кілька металів Mn, Fe, Cr, V, Mo, Co, Ni, W, Cu, Sn, Au, Pt, Pd, Rh, Ir, Rh [3]. Для нанесення каталітично активної маси на металевий носій в багатьох випадках необхідно використовувати «підшар», або вторинний носій, який поліпшує зчеплення з підкладкою і надає каталізатору більш високу порівняно з металом питому поверхню.

Вперше перспектива отримання каталізаторів на металевих поверхнях методом «оксидування в умовах іскрового розряду», який пізніше отримав назву

мікродугового оксидування (МДО), була описана в роботі [4].

МДО одночасно властиві риси двох різних методів модифікації: нанесення покриттів (тобто модифікації з приростом товщини) і зміни стану, структури, властивостей поверхні і приповерхневих шарів (тобто без збільшення товщини).

Для МДО-покриттів найбільша ефективність використання як матеріалу-носія передбачається для оксиду алюмінію $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ [5]. Оксид алюмінію $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ становить великий інтерес, оскільки він є одним з найефективніших носіїв для активного компонента, зокрема використовується в каталізаторах відновлення оксидів азоту [6], окиснювання CO [7], отримання сингазу [8], окиснювання аміаку [9] та ін.

Для нанесення покриття на основі алюмінію на сьогодні використовуються такі методи: просочування суспензією, термічне напилення, електрофоретичне осадження, хімічне осадження з газової фази (CVD – chemical vapor deposition), електрохімічне осадження, кристалізація з розчину. Однак у всіх цих методів є кілька суттєвих недоліків, пов'язаних з низькою адгезією, великою тривалістю процесу, якістю покриттів та ін. Метод мікродугового оксидування в поєднанні зі спеціальними матеріалами дозволить значною мірою позбутися цих недоліків, а також досягти унікальних властивостей з високими механічними характеристиками до матеріалу основи.

При цьому на сьогодні не існує єдиних підходів і принципів у виборі складу електроліту і режиму оксидування для отримання необхідних функціональних властивостей. Тому в кожному конкретному випадку вони підбираються емпірично.

Слід зазначити, що практична реалізація мікроплазмового процесу завжди вимагає ретельного узгодження пари «метал–електроліт». Одним з найпростіших і широко використовуваних електролітів для оброблення сплавів на основі Al є розбавлений (2–8 г/л) розчин KOH, який дає можливість отримувати якісні, високотверді покриття. У ряді випадків для збільшення товщини модифікованого шару при мікроплазмовому обробленні використовуватиметься додавання технічно рідкого скла (Na_2SiO_3) до складу електроліту.

Як активний метал найбільшу ефективність показала платина [10].

Мета і завдання дослідження. Метою роботи було використати технологію мікродугового оксидування (МДО) для створення каталізаторів системи Pt/ Al_2O_3 ; оцінити ефективність працездатності каталізаторів з очищення оксиду азоту.

При цьому потрібно вирішити такі питання:

– підібрати умови електролізу (склад електроліту, електричні параметри процесу, тривалість оброблення), що забезпечують протікання процесу в режимі мікродугових

розрядів і отримання покриттів з розвиненою поверхнею і шорсткістю;

– вивчити структурні особливості покриттів та їх властивості залежно від умов електролізу;

– дослідити каталітичні властивості системи Pt/ Al_2O_3 з відновлення оксиду азоту;

– проаналізувати отримані результати і зробити висновки щодо доцільності МДО-технології при створенні каталізаторів.

Основна частина дослідження. У роботі використовувалися зразки зі сплавів А97 і Д16 розміром 100 x 20 x 5 мм. Склад сплавів наведено в табл. 1.

Мікродугове оксидування проводилося у ванні об'ємом 100 л. Під час процесу МДО забезпечувалося охолодження і барботування електроліту [11]. Корпус ванни використовувався як протиелектрод. Застосовувалося джерело живлення конденсаторного типу потужністю 40 кВт, оксидування проводилося в анодно-катодному режимі. Середнє значення напруги становило 380 В. Для виходу процесу на стадію мікродугових розрядів використовувалася щільність струму 20–40 А/дм².

Таблиця 1

Хімічний склад алюмінієвих сплавів

Марка сплаву	Хімічні компоненти, %			
	Al	Cu	Mg	Mn
А97	основа (не менш 99,97 %)	0,005	0,005	0,002
Д16	основа	3,8–4,9	1,2–1,8	0,3–0,9

Покриття формувалися в електролітах чотирьох типів, склад яких вибирався відповідно до результатів попередніх досліджень [12].

Для приготування електролітів застосовували їдкий калій KOH, натрієве рідке скло Na_2SiO_3 і дистильовану воду. При цьому для електролізу використовувалися чотири суміші: 1 г/л KOH + 3 г/л Na_2SiO_3 , 1 г/л KOH + 6 г/л Na_2SiO_3 , 2 г/л KOH + 6 г/л Na_2SiO_3 і 2 г/л KOH + 12 г/л Na_2SiO_3 .

Тому МДО-процес проводився в лужно-силікатному електроліті різного складу на установці конденсаторного типу в анодно-катодному режимі.

Визначення фазового складу МДО-покриттів здійснювалося за результатами рентгенофазового аналізу. Дослідження проводилися на установці ДРОН-3 у монохроматизованому випромінюванні $K_{\alpha-\text{Cu}}$. Дифракційні спектри знімалися за схемою Бреґга–Брентано на відбиття. Знімання

здійснювалося як у безперервному, так і поточковому режимі із кроком $2\theta = 0,1^\circ$. Мінімальна виявлюваність структурних складових становить похибку близько 1%. Така точність виявлення була визначена шляхом порівняння реперних ліній фаз із базовими сумішами.

Для проведення кількісного фазового аналізу використовувався метод еталонних сумішей [13]. Для цього були побудовані градууювальні графіки залежності інтенсивностей ліній порівняння від складу суміші.

Для дослідження рельєфу застосовувалася растрова електронна мікроскопія на установці РЕМ МА 101.

Товщина покриття визначалася на вихровому товщинімірі ВТ-10 НЦ. Похибка у вимірюванні товщини покриття становила не більше 5% при найменшій товщині покриття (близько 10 мкм). Мікротвердість визначалася на приладі ПМТ-3.

На сформовані покриття наносилася платина шляхом просочування зразків у розчині хлориду платини та подальшого відновлювання при температурі 350–500 °С. Активний компонент (Pt) наносився шляхом занурення в 10-відсотковий розчин HPtCl_6 (температура сорбції 25 °С). Час, необхідний для досягнення повної адсорбційної ємності, становив 1 хв. У

результаті вміст платини у всіх типах каталізаторів був близько 0,01 г.

Коефіцієнт очищення від оксиду азоту (α) визначався методом евакуйованих колб [14].

МДО-технологія дозволяє перетворити поверхневі шари алюмінієвих сплавів у високотемпературні модифікації оксидів алюмінію.

Оброблення алюмінієвих сплавів і алюмінію в лужно-силікатному електроліті формує покриття, яке має двошарову будову і незалежно від умов електролізу характеризується дуже розвиненою поверхнею і пористістю [11]. Ці чинники дають підставу використовувати МДО-технологію для створення каталізаторів на основі $\text{Pt} / \text{Al}_2\text{O}_3$.

Результати рентгенівського фазового аналізу показали, що поверхневий шар покриття складається з таких фаз: $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ і $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (муліт). На сплаві Д16 відбувалося переважне утворення фаз $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Типовий дифракційний спектр від покриття на сплаві Д16, отриманого в електроліті 1 г/л KOH + 3 г/л Na_2SiO_3 при тривалості оксидування 120 хв, подано на рис. 1, а. Слід зазначити, що збільшення тривалості оброблення сприяє утворенню великої кількості фази $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунд).

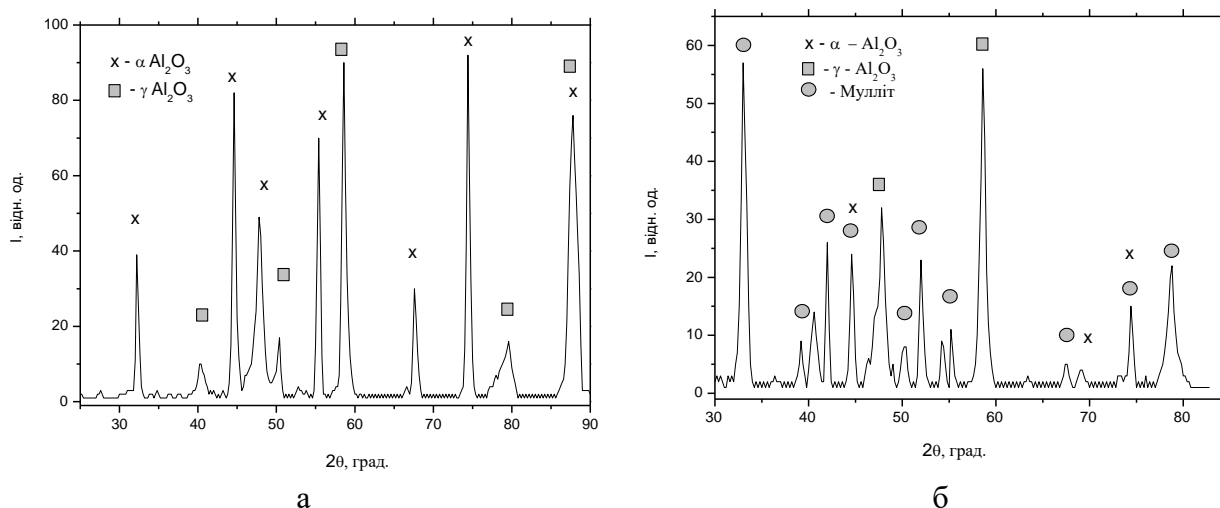


Рис. 1. Ділянки дифракційних спектрів покриттів, отриманих методом мікродугового оксидування на сплаві Д16 (а) в електроліті 1 г/л KOH + 3 г/л Na_2SiO_3 ($\tau = 120$ хв) і на сплаві А97 (б) в електроліті 2 г/л KOH + 12 г/л Na_2SiO_3 ($\tau = 120$ хв)

Покриття на технічному алюмінії А97 мають практично однаковий фазовий склад для електролітів складу 2 г/л КОН + 6 г/л Na₂SiO₃ і 2 г/л КОН + 12 г/л Na₂SiO₃ і незалежно від товщини покриття. До складу таких покриттів для всіх використовуваних умов оксидування входить мулліт. На рис. 1, б наведено ділянку типового дифракційного спектра МДО-покриття на А97, отриманого в електроліті складу 2 г/л КОН + 12 г/л Na₂SiO₃ при тривалості процесу 60 хв.

Відзначимо, що наявність чітких дифракційних максимумів свідчить про кристалічну будову покриття при всіх режимах мікродугового оксидування.

Залежно від режиму електролізу кількісне співвідношення між фазами змінюється. Також слід зазначити загальну закономірність, а саме, що збільшення в електроліті рідкого скла призводить до збільшення вмісту муліту.

Узагальнені результати наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Умови електролізу, товщина покриттів, фазовий склад, шорсткість і каталітична здатність МДО покриттів, отриманих на сплавах Д16 і А97 в різних електролітах

Серія знак	Матеріал	Режим електролізу		Товщина покриття h, мкм	Фазовий склад			Шорст- кість R _z , мкм	Коефіцієнт очищення α, % (200 °С)
		електроліт	τ, хв		α-Al ₂ O ₃	γ-Al ₂ O ₃	3Al ₂ O ₃ •2SiO ₂		
1	Д16	1 г/л КОН + 3 г/л Na ₂ SiO ₃	60	40	21	79	-	33	78,9
2	Д16	1 г/л КОН + 3 г/л Na ₂ SiO ₃	120	80	30	70	-	38	81,4
3	Д16	1 г/л КОН + 6 г/л Na ₂ SiO ₃	60	70	45	55	-	42	82,1
4	Д16	1 г/л КОН + 6 г/л Na ₂ SiO ₃	30	20	32	68	-	27	88,4
5	Д16	2 г/л КОН + 6 г/л Na ₂ SiO ₃	30	20	12	85	13	24	84,6
6	Д16	2 г/л КОН + 6 г/л Na ₂ SiO ₃	60	100	38	57	5	46	92,1
7	Д16	2 г/л КОН + 12 г/л Na ₂ SiO ₃	45	30	10	75	5	28	91,9
8	Д16	2 г/л КОН + 12 г/л Na ₂ SiO ₃	60	60	10	65	25	45	85,6
9	А97	2 г/л КОН + 6 г/л Na ₂ SiO ₃	30	30	15	25	60	34	70,9
10	А97	2 г/л КОН + 12 г/л Na ₂ SiO ₃	25	25	12	20	62	33	80,1
11	А97	2 г/л КОН + 12 г/л Na ₂ SiO ₃	60	60	20	25	55	36	79,3

Примітка: R_z – шорсткість; α – коефіцієнт очищення

Таким чином, МДО-технологія дозволяє отримати покриття різного фазового складу, варіюючи умовами електролізу.

Структура поверхні МДО покриттів досліджувалася за допомогою растрової електронної мікроскопії (РЕМ). Характерна риса топографічного контрасту в РЕМ – підвищена яскравість зображення гострих вершин і виступів рельєфу, викликана збільшенням виходу електронів з цих ділянок.

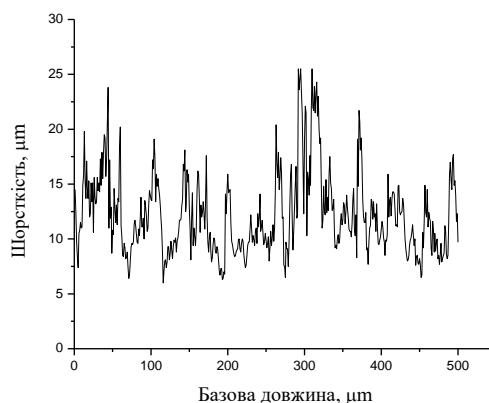
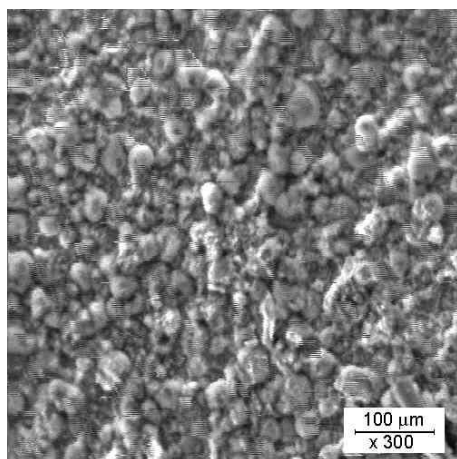
Зазначимо, що як на сплаві Д16, так і на алюмінії А97 виявляється розвиненість поверхні, в більшості випадків поверхня являє собою конгломерат частинок округлої форми різного розміру. Зі збільшенням товщини покриття структурні утворення збільшуються в розмірі.

Таким чином, технологія МДО дозволяє отримувати різну морфологію поверхні покриття, змінюючи склад електроліту і формуючи покриття різної товщини.

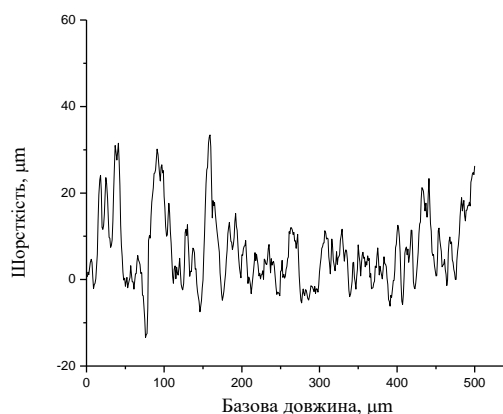
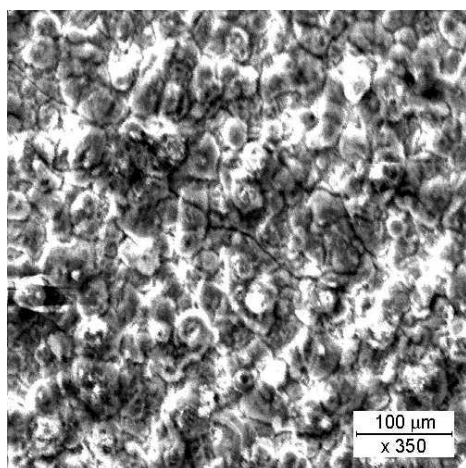
На сформовані покриття наносилася платина шляхом просочування зразків в розчині хлориду платини і подальшого відновлення при температурі 350–500 °С.

Оцінювання шорсткості показало, що шорсткість змінюється від 20 до 50 мкм і визначається в першу чергу товщиною покриття (табл. 2).

Морфологію поверхні досліджуваних покриттів на сплаві Д16 і А97 наведено на рис. 2.

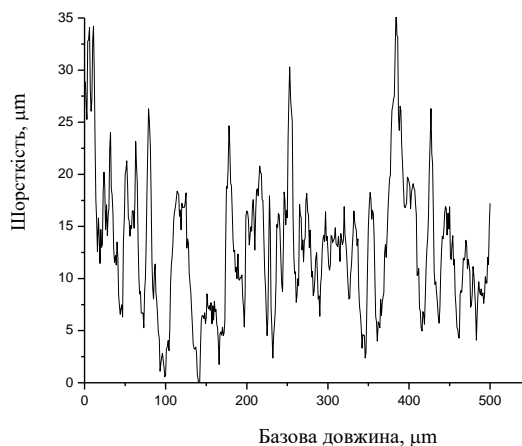
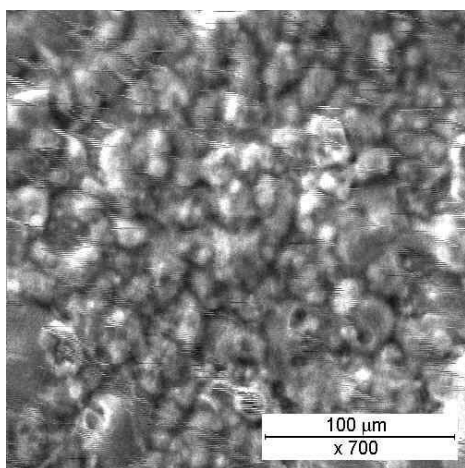


а) 2 + Pt

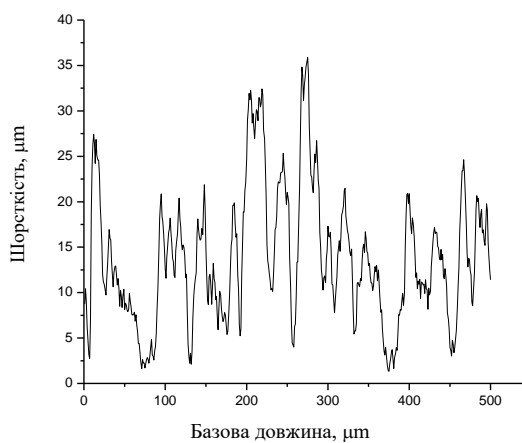
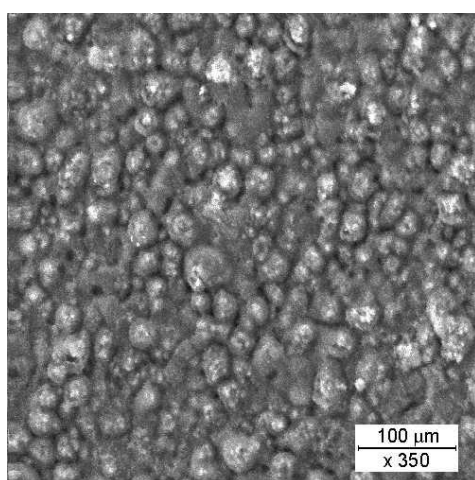


б) 4 + Pt

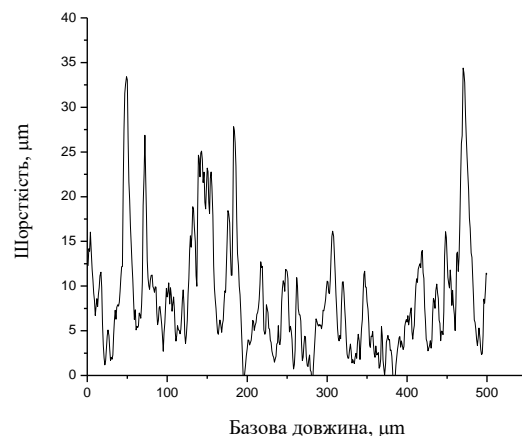
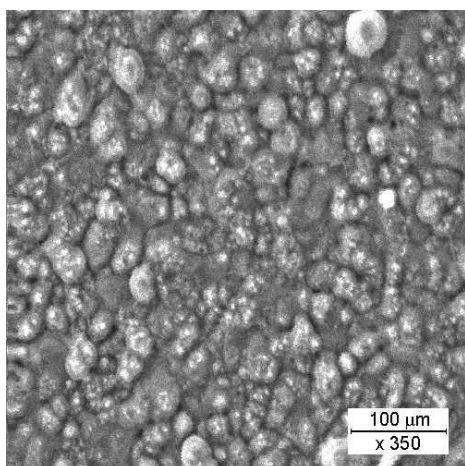
Рис. 2. Структура поверхні та рельєф шорсткості МДО-покриттів після просочування платиною для використання як каталітичних систем Pt/Al₂O₃: а – серія 2 в табл. 2; б – серія 4 в табл. 2 (початок)



в) 6 + Pt

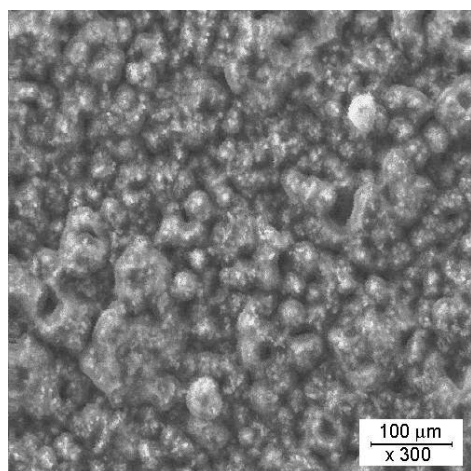


г) 7 + Pt



д) 9 + Pt

Рис. 2. Структура поверхні та рельєф шорсткості МДО-покриттів після просочування платиною для використання в якості каталітичних систем Pt/Al₂O₃: в – серія 6 в табл. 2; г – серія 7 в табл. 2; д – серія 9 в табл. 2 (продовження)



е) 11 + Pt

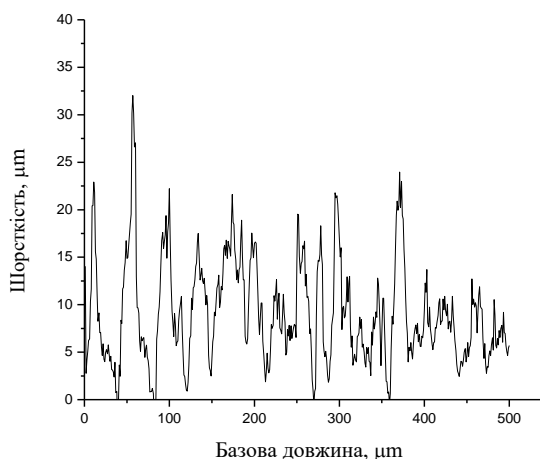


Рис. 2. Структура поверхні та рельєф шорсткості МДО-покриттів після просочування платиною для використання в якості каталітичних систем Pt/Al₂O₃:
е – серія 11 в табл. 2 (продовження)

З отриманих результатів видно, що в усіх випадках виявляється сильна розвиненість поверхні, в більшості випадків поверхня являє собою конгломерат частинок округлої форми різного розміру. У покриттях більше 50 мкм виявляються «кратери», які є результатом прожога покриття дуговими розрядами. Однак щільність цих прожогів невелика і вони не значно змінюють загальну морфологію.

У вертикальній площині шорсткість складає в основному не більше 40 мкм. Приблизно такий період утворення в площині покриття і для більшості отриманих зразків. Однак структура на рис. 2, в, г дещо відрізняється формуванням досить великих утворень (до 200 мкм) в планарній області зростання МДО-покриттів. В інших випадках відбувається формування структурної неоднорідності в площині покриття зі значно меншою базовою шириною до 50 мкм.

Таким чином, застосування МДО-технології дозволяє в широкому інтервалі змінювати фазовий склад покриття, морфологію поверхні та її шорсткість.

Раніше для створення каталізаторів Pt/Al₂O₃ використовувалося класичне анодування. Але воно не забезпечує

необхідної розвиненості поверхні і хорошої адгезії з основою [3]. Зазначимо, що процес МДО дозволяє усунути ці недоліки.

В роботі каталітичні властивості всіх досліджуваних зразків визначалися за методикою евакуйованих колб [14].

Реперними точками при вивченні каталітичних властивостей покриттів служили чотири температури, при яких вивчалися властивості: 150, 200, 250 і 300 °С. Отримані при цьому значення коефіцієнта очищення оксиду азоту наведені в табл. 2 (для температури 200 °С) і на рис. 3.

Як видно з отриманих результатів, існує температурна залежність коефіцієнта очищення. При цьому для різних типів покриттів оптимальні властивості з очищення проявляються при різній температурі. Це свідчить про те, що каталітична здатність може змінюватися в широкому інтервалі шляхом зміни режимів мікродугового оксидування.

Також слід зазначити, що практично для всіх серій МДО-покриттів каталітичні властивості, які наведені на рис. 3, мають температури, при яких забезпечується коефіцієнт очищення $\alpha \geq 80\%$, що відповідає вимогам до існуючих в даний час каталізаторів.

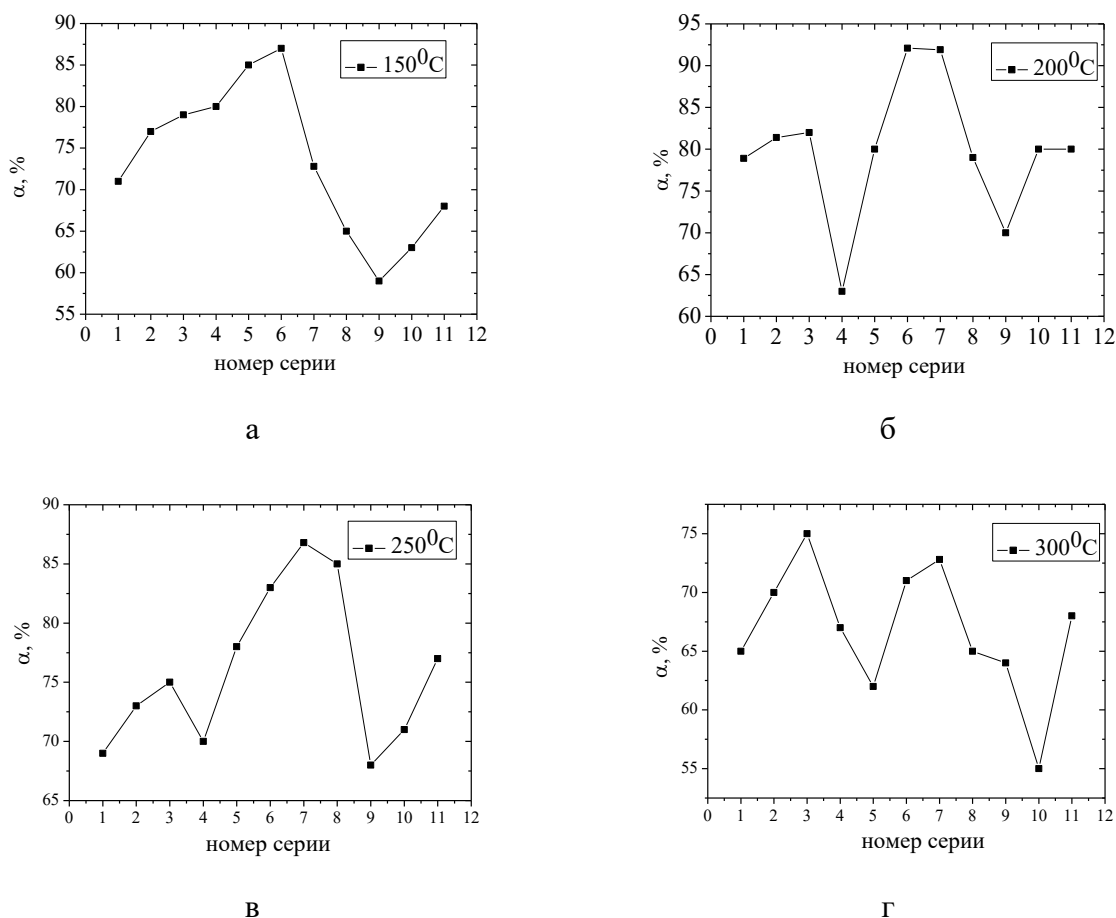


Рис. 3. Залежність коефіцієнта очищення оксиду азоту при різних температурах процесу: а – 150 °С; б – 200 °С; в – 250 °С; г – 300 °С

При цьому, як видно з наведених рисунків, коефіцієнт очищення для різних зразків різний як за абсолютною величиною, так і за температурної залежності. Так, є зразки, для яких коефіцієнт очищення при температурі 150 °С складає близько 80 %, проте спостерігається його збільшення до 90 % при зміні температури випробування від 150 до 250 °С.

Слід зазначити виявлені закономірності. При низькій температурі 150 °С найбільш ефективними каталізаторами є системи Pt / Al₂O₃ на основі МДО-покриттів серій 1–6, отриманих на сплаві Д16. Особливістю фазово-структурного стану таких покриттів є практично двофазовий їх склад (γ-Al₂O₃ і α-Al₂O₃), де вміст фази α-Al₂O₃ досягає 40 %. Морфологія поверхні

таких покриттів досить різноманітна без явно виражених закономірностей. Таким чином, при низькій температурі 150 °С найефективнішими МДО-покриттями є зразки, отримані при малому вмісті рідкого скла (Na₂SiO₃) в електроліті. При цьому найбільші значення α (близько 87 %) досягаються при використанні МДО-покриттів, отриманих електролізом в електроліті, який містить 2 г/л КОН + 6 г/л Na₂SiO₃ (серії 5 і 6).

При збільшенні температури випробувань до 200–250 °С найбільшу ефективність показують каталітичні системи на базі МДО-покриттів серій 6 і 7. Рис. 2 свідчить про те, що особливістю таких покриттів є морфологія структурних утворень на поверхні. Як було зазначено

вище, для таких покриттів характерне формування досить великих утворень (до 200 мкм) у планарній області зростання МДО-покриттів. При цьому досягається найбільше значення α до 92 %.

При максимальній температурі випробувань 300 °С ефективність очищення дещо знижується і не перевищує 75 %. При цьому знову таки найбільш високі значення отримані для систем на базі МДО-покриттів серій 1–3, одержаних в електроліті з відносно малим вмістом рідкого скла, що сприяє формуванню двофазного стану, який складається з фаз γ - Al_2O_3 і α - Al_2O_3 .

Таким чином, аналіз отриманих результатів показує, що застосування МДО-технології для створення каталізаторів типу $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ дозволяє забезпечити коефіцієнт очищення оксиду азоту близько 80 %. При цьому є можливість відповідним підбором умов електролізу при отриманні покриттів певного фазово-структурного стану та особливостями морфології поверхні підвищити коефіцієнт очищення до 92 % (табл. 2 і рис. 3).

Висновки:

1. Методами МДО на сплаві Д16 і технічному алюмінії А97 отримані оксидні покриття різного фазового складу, різної структури поверхні і шорсткості, товщиною 20–100 мкм. Показано, що структура покриттів визначається умовами електролізу.

2. Визначено, що поверхневий шар покриття складається з таких фаз: γ - Al_2O_3 ,

α - Al_2O_3 і $3 \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (муліт). На сплаві Д16 відбувалося переважне утворення фаз γ - Al_2O_3 і α - Al_2O_3 . Зростання тривалості мікродугового оксидування збільшує вміст у покритті фази α - Al_2O_3 .

3. Встановлено, що використання МДО-технології дозволяє в широкому інтервалі змінювати морфологію поверхні та шорсткість покриття. При цьому виявлено формування у планарній області зростання покриттів двох типів: з відносно невеликим розміром таких утворень (до 50 мкм) і з формуванням утворень другого типу, розміри яких у планарній області зростання МДО-покриттів досягають 300 мкм.

4. Виявлено, що коефіцієнт очищення оксиду азоту в каталізаторах $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ є температурно залежним. При відносно низькій температурі 150 °С і найвищій 300 °С найбільше значення α досягається в системах на основі МДО-покриттів з бінарного (γ - Al_2O_3 і α - Al_2O_3) фазового складу. В температурному інтервалі найефективнішого очищення (200–250 °С) найбільший вплив на їх ефективність, очевидно, має морфологія поверхні, а саме формування в площині зростання великих (до 300 мкм) упорядкованих станів. У цьому випадку коефіцієнт очищення (з відновлення оксидів азоту) α досягає 92 %.

5. Результати роботи можуть бути використані при розробленні та створенні нового типу каталізаторів системи $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$.

Список використаних джерел

1. El-Shobaky H. G. Surface and catalytic properties of Co, Ni and Cu binary oxide systems. *Applied catalysis A: General*. 2004. Vol. 278. Iss. 1. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2004.09.006> (last accessed: 15.09.2020).

2. El-Shobaky H. G., Fahmy Y. M. Nickel cuprate supported on cordierite as an active catalyst for CO oxidation by O₂. *Applied catalysis B: Environmental*. 2006. Vol. 63. Iss. 3–4. P. 168–177. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2005.10.001> (last accessed: 15.09.2020).

3. Meille V. Review on methods to deposit catalysts on structured surfaces. *Applied catalysis A: General*. 2006. Vol. 315. P. 1–17. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2006.08.031> (last accessed: 15.09.2020).

4. Clyne T. W., Troughton S. C. A review of recent work on discharge characteristics during plasma electrolytic oxidation of various metals. *International materials reviews*. 2019. Vol. 64. Iss. 3. P. 127–162. URL: <https://doi.org/10.1080/09506608.2018.1466492> (last accessed: 15.09.2020).

5. Patcas F., Krysmann W. Efficient catalysts with controlled porous structure obtained by anodic oxidation under spark-discharge. *Applied catalysis. A*. 2007. Vol. 316. Iss. 2. P. 240–249. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2006.09.028> (last accessed: 15.09.2020).
6. Viscon C. G. Alumina: A key-component of structured catalysts for process intensification. *Transactions of the indian ceramic society*. 2012. Vol. 71. № 3. P. 123–136. URL: <https://doi.org/10.1080/0371750X.2012.738481> (last accessed: 15.09.2020).
7. Roy S., Hegde M. S., Madras G. Catalysis for NO_x abatement. *Applied energy*. 2009. V. 86. Iss. 11. P. 2283–2297. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.03.022> (last accessed: 15.09.2020).
8. Han S. W., Kim D. H., Jeong M. - G., Park K. J., Kim Y. D. CO oxidation catalyzed by NiO supported on mesoporous Al₂O₃ at room temperature. *Chemical engineering journal*. 2016. Vol. 283. P. 992–998. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.021> (last accessed: 15.09.2020).
9. Ratchahat S., Kodama S., Tanthapanichakoon Wi., Sekiguchi H. Combined molten salt-Ni / Al₂O₃ as synergistic medium for high-quality syngas production. *Chemical engineering journal*. 2015. Vol. 278. P. 224–233. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.09.109> (last accessed: 15.09.2020).
10. Zhang L., He H. Mechanism of selective catalytic oxidation of ammonia to nitrogen over Ag / Al₂O₃. *Journal of catalysis*. 2009. V. 268. Iss. 1. P. 18–25. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2009.08.011> (last accessed: 15.09.2020).
11. Luo H, Wu X. D., Weng D., Liu S., Ran R. A novel insight into enhanced propane combustion performance on PtUSY catalyst. *Rare Metals*. 2017; Vol. 36. Iss. 1. P. 1–9. DOI <https://doi.org/10.1007/s12598-016-0760-1> (last accessed: 15.09.2020).
12. Belozarov V., Sobol O., Mahatilova A., Subbotina V., Tabaza T. A., Al-Qawabeha U. F., Al-Qawabah S. M. The influence of the conditions of microplasma processing (microarc oxidation in anode-cathode regime) of aluminum alloys on their phase composition. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2017. Vol. 5. Iss. 12–89. P. 52–57. URL: DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112065> (last accessed: 15.09.2020).
13. Subbotina V. V., Sobol' O. V., Belozarov V. V., Makhatilova A. I., Shnyder V. V. Use of the method of micro-arc plasma oxidation to increase the antifriction properties of the titanium alloy surface. *Journal of nano- and electronic physics*. 2019. Vol. 11. Iss. 3. P. 03025-01–03025-05. DOI: 10.21272/jnep.11(3).03025 (last accessed: 15.09.2020).
14. Основы рентгеноструктурного анализа в материаловедении / А. А. Клопотов, Ю. А. Абзаев, А. И. Потекаев, О. Г. Волокитин. Томск: ТГАСУ, 2012. 275 с.
15. Мищенко А. В., Кузнецов С. И. Термический метод нейтрализации оксидов азота // Вісник ХНТУ. Інженерні науки. 2018. № 2(65). С. 35–40. URL: [http://kntu.net.ua/kaf_design/content/download/56054/329477/file/%D0%92%D1%96%D1%81%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%E2%84%962\(65\).pdf](http://kntu.net.ua/kaf_design/content/download/56054/329477/file/%D0%92%D1%96%D1%81%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%E2%84%962(65).pdf) (дата звернення: 15.09.2020).

Субботіна Валерія Валеріївна, канд. техн. наук, доцент кафедри матеріалознавства Національного технічного університету «ХПІ». ORCID iD: 0000-0002-3882-0368. Тел. (057) 707-64-35. E-mail: subbotina.valeri@gmail.com.

Білозеров Валерій Володимирович, канд. техн. наук, професор кафедри матеріалознавства Національного технічного університету «ХПІ». ORCID iD: 0000-0002-7623-3658. Тел. (057) 707-64-35.

Соболь Олег Валентинович, д-р. фіз.-мат. наук, професор кафедри матеріалознавства Національного технічного університету «ХПІ». ORCID iD: 0000-0002-4497-4419. Тел. (057) 707-64-35. E-mail: sool@kpi.kharkov.ua.

Subbotina Valeria Valerievna, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Materials Science, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute». ORCID iD: 0000-0002-3882-0368. Tel. (057) 707-64-35.

E-mail: subbotina.valeri@gmail.com.

Belozarov Valery, PhD, Professor, Department of Materials Science, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute». ORCID iD: 0000-0002-7623-3658. Tel. (057) 707-64-35.

Sobol Oleg, D. Sc. (Phys-Math.), Professor, Department of Materials Science National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute». ORCID iD: 0000-0002-4497-4419. Тел. (057) 707-64-35. E-mail: sool@kpi.kharkov.ua.

Статтю прийнято 18.09.2020 р.

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА (144)

UDC 697.1

JOINT INFLUENCE OF INTERMITTENT HEATING MODE AND OUTDOOR FACTORS ON APARTMENT HEAT LOAD

D. Sc. (Tech.) V. Deshko, PhD (Tech.) I. Sukhodub, postgraduate student O. Yatsenko

СУМІСНИЙ ВПЛИВ ПЕРЕРИВЧАСТОГО РЕЖИМУ ОПАЛЕННЯ ТА ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ НА ТЕПЛОВЕ НАВАНТАЖЕННЯ КВАРТИРИ

Д-р техн. наук В. І. Дешко, канд. техн. наук І. О. Суходуб, асп. О. І. Яценко

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.191.2020.217286>

***Abstract.** Qualitative energy efficiency measures calculation should take into account the interaction between various factors influence and building thermal mode. The main direction of this work is the investigation of outdoor and indoor factors influence on the energy performance indicators and heating system operation mode. Using energy simulation program apartment heat load for constant and intermittent heating modes was analyzed.*

***Keywords:** energy saving, intermittent heating, apartment, building energy modelling, EnergyPlus.*

***Анотація.** Дослідження ефективності роботи системи опалення може проводитися за різними підходами, з урахуванням контрольованих та неконтрольованих факторів. Якісний розрахунок заходів з підвищення енергоефективності повинен враховувати динамічну поведінку будівлі – взаємодію між температурним режимом всередині та факторами, які впливають на нього. Основним напрямом цієї роботи є дослідження зовнішніх та внутрішніх факторів, які впливають на енергетичні показники приміщень і режим роботи системи опалення. Оцінювання впливових факторів проводилось для існуючого приміщення квартири за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення для динамічного моделювання EnergyPlus. Програмована модель квартири враховує теплоінерційні властивості будівельних конструкцій та дозволяє оцінити вплив зміни зовнішніх і внутрішніх факторів на енергетичні показники у часі. Зокрема досліджено вплив температури навколишнього середовища та радіаційної складової сонячних теплонадходжень на навантаження системи опалення квартири для заданих режимів постійного та переривчастого опалення. З метою детального оцінювання впливу сонячних теплонадходжень проведено аналіз температур на внутрішніх поверхнях зовнішніх стін і поверхнях внутрішніх стін кімнат при різній орієнтації зовнішніх огорожувальних конструкцій за сторонами світу. Результати, приведені в даній роботі, отримано шляхом погодинної симуляції в програмній моделі квартири та подано у вигляді діаграм і графіків. Також проведено чисельний аналіз річного енергоспоживання квартири за погодними умовами з бази даних IWES для міста Києва при застосуванні постійного та переривчастого режимів опалення і залежно від орієнтації огорожувальних конструкцій за сторонами світу.*

Наявність енергетичної моделі приміщення в програмному середовищі EnergyPlus дозволяє прийняти оптимізаційні рішення шляхом дослідження впливу внутрішніх і зовнішніх факторів на динамічну поведінку будівлі, а також проаналізувати вплив цих факторів на

енергетичні показники будівлі. Наведені результати досліджень доводять, що рекомендації щодо вибору режиму роботи системи опалення доцільно розробляти з урахуванням проаналізованих впливових факторів.

Ключові слова: енергозбереження, переривчасте опалення, квартира, енергетичне моделювання, EnergyPlus.

Introduction. The buildings and construction sector has the largest shares of energy and emissions in the world. According to United Nations Environment Programme (2018) buildings construction and operations consumes for 36 % of global final energy use, of which residential buildings accounts for 22 %. Therefore, there is a need to find and implement approaches to improve the energy efficiency of each building. European experience shows that implementation of energy efficiency measures should be carried out comprehensively.

Most residential buildings in Ukraine do not reach the European energy performance indicators. Due to the high payback period, building owners are implementing measures gradually. So they follow strategy that typically include increase of building envelope thermal insulation but they usually neglecting the possibility of weather-dependent heating system regulation. But for the highest effect from implementation of measures it is important to consider interaction between building constructions materials and heating and ventilating systems, under dynamic ambient air conditions indoor and outdoor.

Analysis of recent research and publications. In modern buildings with high electrical energy consumption and intermittent heating mode, impact of different factors on thermal building behavior investigated by many authors. In general, highlighted the following main factors that affect building thermal mode [1]:

- outdoor – outside air temperature, solar radiation and wind speed;
- indoor – heating capacity of a building and internal heat gains.

Data-based building energy models were utilized to calculate energy saving, which is then compared to the actual data. Outside dry air

temperature was the only energy consumption influence factor. So the impact of other parameters, especially solar gains, on energy consumption needs further consideration [2].

An exploration of the intermittent heating system operation modes efficiency is carried out in different approaches taking into account controlled and uncontrolled factors. The article [3] compares the two approaches: quasi-stationary and dynamic. According to [3] quasi-stationary approach can only provide an approximate energy efficiency estimation because it doesn't take into account the duration of real transient processes in the heating system. At the same time dynamic approach allows to achieve higher quality results taking into account dynamic characteristics of the building constructions. The importance of dynamic characteristics consideration in conditions of intermittent heating mode is investigated in paper [4]. The paper [4] presents calculation results of various single-layer walls dynamic characteristics done by an exact and an approximate methods of no stationary thermal conductivity. The results indicate that reducing the building massiveness reduce heat losses and time spent on heating of building.

Comparison of standard and new approaches of intermittent thermal energy need calculation is made in article [5]. The proposed in [5] new approach improves transparency of the current ISO 13790 method and provides more accurate results. To validate the proposed calculation of intermittent energy need, the article [5] presents the results of modeling in EnergyPlus. Review of occupant-centric building controls [6] shows the feasibility of studying and practical consideration of the influence of solar radiation on intermittent heating modes.

The article [7] includes analysis of outdoor and indoor factors influence on building energy performance indicators. In this

work the daily average heating load forecast using non-linear multivariate regression models is based on daily average factors history data.

The dynamic behavior of buildings in response to environment factors is extremely complex and difficult to analyze. Dynamic simulation software is a powerful tool that allows to take into account different thermal storage capacities of the building constructions as well as different climates for thermal state investigation [8]. Such programs allow to get high-quality results for decision making to enhance energy efficiency during the building design and operation phases [9, 10].

In article [11] results of intermittent heating mode simulation was compared with available practical data of indoor temperature profile. Created in dynamic simulation program apartment energy model accurately describes the heat-inertial properties of building envelope and allows to take into account outdoor temperature changes over time.

Purpose and objectives of the study.

The main purpose of this study is to present selected results of the analyzes of the way exterior walls cardinal direction impact on heating system mode during the day in case of constant and intermittent heating schedule. Studies were conducted on the example of an existing apartment with individual heating source.

According to the purpose the following tasks are solved:

- apartment dynamic energy model was created;
- hourly heat load for chosen day in case of constant and intermittent heating mode determined;
- investigated outdoor temperature and solar radiation impact on the thermal mode during the chosen day;
- analyzed solar radiation impact on the walls inner surface temperature;
- annual apartment energy consumption was determined.

Main Body of Paper

Dynamic energy modelling of the apartment. The 3d apartment model was created in DesignBuilder software. Calculations have been carried out by means of simulation program EnergyPlus. So DesignBuilder uses EnergyPlus engine to perform dynamic building energy simulation. Programmed apartment model describes the heat-inertial properties of building constructions and allows to take into account outdoor and indoor factors changes over time. Thus EnergyPlus dynamic approaches take into account the building enclosing structures accumulation ability. At the same time, point and linear heat-conducting inclusions are not considered by the program.

The apartment enclosing structures reported in tabl. 1.

Fig. 1 presents the apartment plan as well as rooms area data.

Table 1

Enclosing structures description

Construction type	Construction layers	U-value, W/m2·K
Exterior walls	- gypsum plastering 10 mm - brick 400 mm - mineral fibre 50 mm - external rendering 10 mm	0,488
Exterior windows and glazed door	double-chamber glazing with internal Low-E glass and two chambers with argon	1,058
Internal partitions	- gypsum plastering 10 mm - brick 125 mm - gypsum plastering 10 mm	-
Ceiling	- cast concrete 200 mm	-
Floor	- cast concrete 200 mm	-

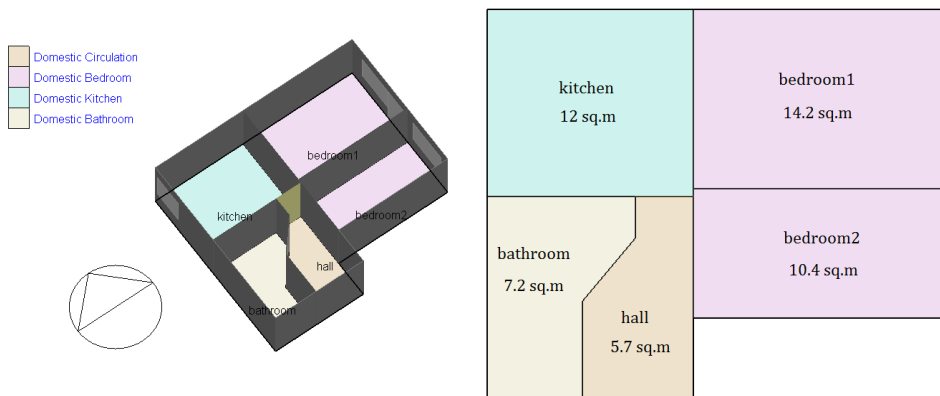


Fig. 1. Apartment plan

In fact, the exterior walls and windows of the apartment are oriented to the east («bedroom1» and «bedroom2») and west (kitchen). The exterior glass area in «bedroom1» – 3,26 m², in «bedroom2» – 1,8 m², in “kitchen” – 1,32 m².

The apartment has individual water-based heating system with automated gas-fired boiler. Boiler operates to maintain specified temperature mode for all hours. Each room in apartment is heated during the heating period.

Such heating system allows setting individual heating schedules using a thermostat.

Assumed heating schedule is maintained an internal temperature at 16-22 °C for weekdays and at 20-22 °C for weekends. In fact, heating mode for the apartment corresponds to the occupancy schedule. The programmed daily heating schedules for weekday and weekend are shown in histograms in fig. 2.

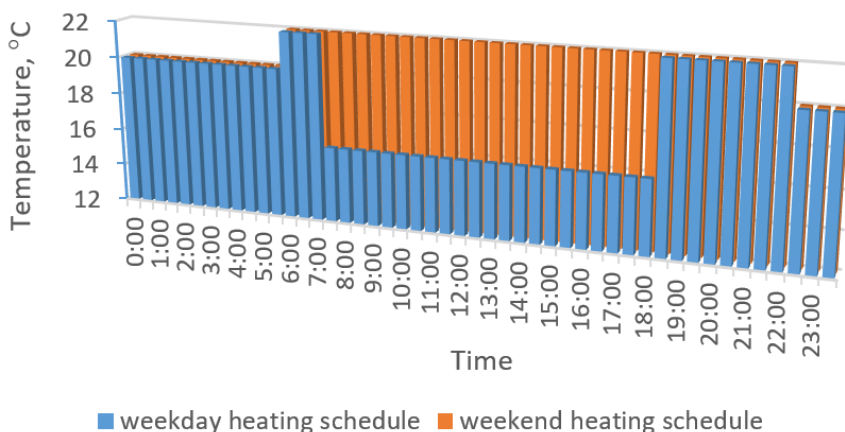


Fig. 2. Weekday and weekend heating schedules

Air exchange rate in the apartment was assumed to be 0,6 h⁻¹.

The energy model of the apartment also takes into account occupancy schedule and

internal heat gains (people, lighting and electric equipment). To consider heat gains from people next histograms are presented in fig. 3.

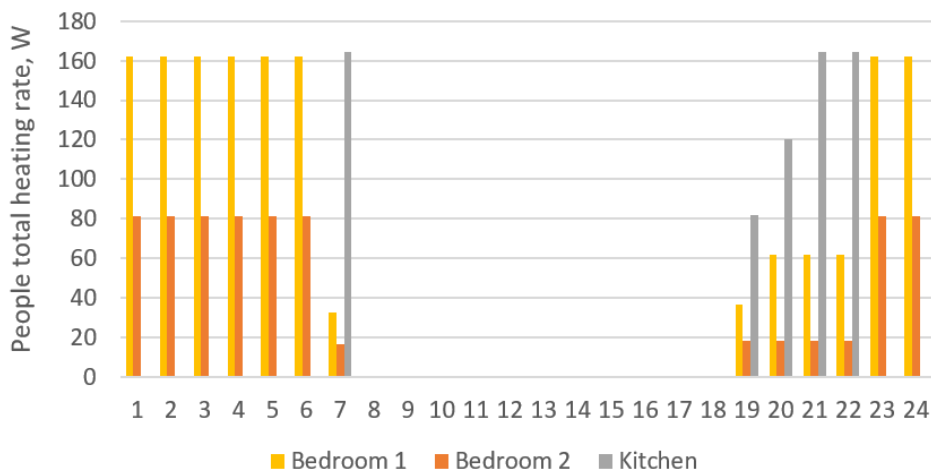


Fig. 3. Weekday people heat gains

The calculations have been performed for the climatology of the sunny winter day (10 February, weekday) taken from the IWEC weather database for Kyiv [12]. The outside air temperature minimum (-15 °C) appears at

5 AM at morning, and maximum (-7,7°C) at 2 PM at afternoon.

Fig. 4 presents the graph of outside air temperature as well as histograms of windows transmitted solar radiation rate depending on cardinal direction (IWEC solar radiation data).

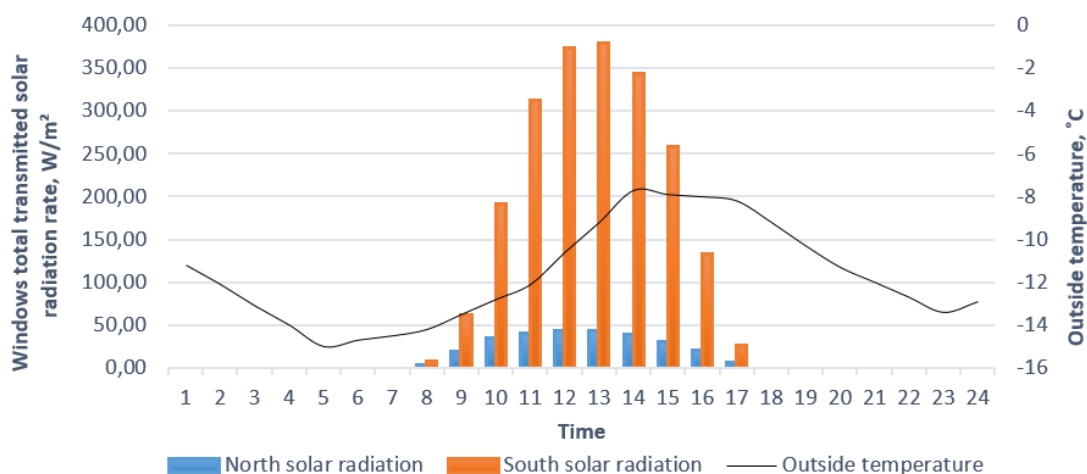


Fig. 4. Daily outside air temperature and windows solar radiation rate

IWEC weather database was also used to determine annual apartment heat consumption.

Apartment heating load hourly investigation. Apartment heating system load during the day is investigated using constant mode, as well as intermittent mode. The first study was conducted when bedrooms exterior walls correspond to the north cardinal direction.

The solar radiation effect on the heating load in constant (22 °C) and intermittent (16-22 °C) modes was investigated and shown in fig. 5 and 6.

It was also analyzed heating load when the bedrooms exterior walls correspond to the southern orientation (fig. 7 and 8).

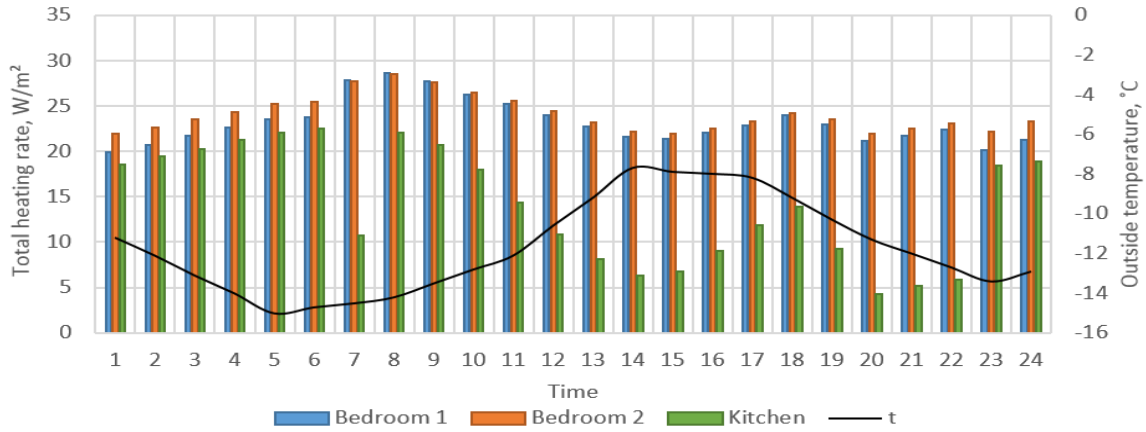


Fig. 5. Total heating load during the chosen day with constant heating mode (Bedrooms – N, kitchen – S)

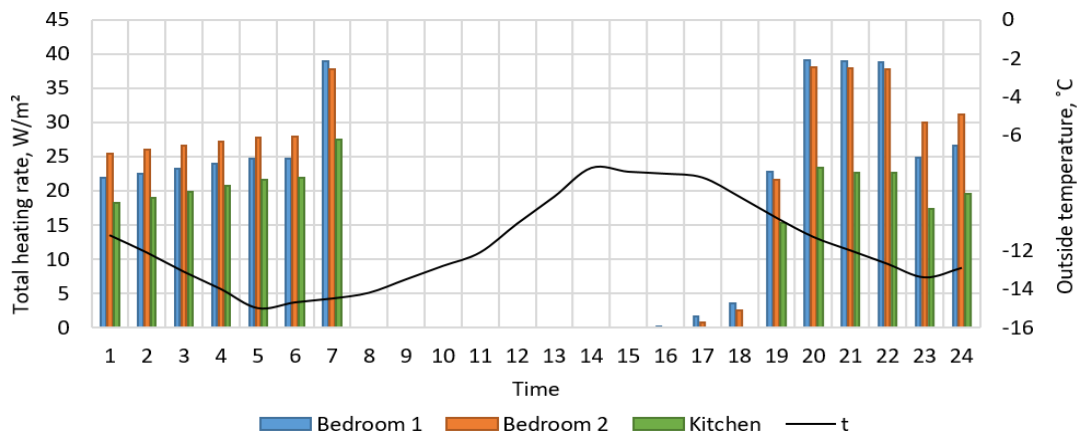


Fig. 6. Total heating load during the chosen day with intermittent heating mode (Bedrooms – N, kitchen – S)

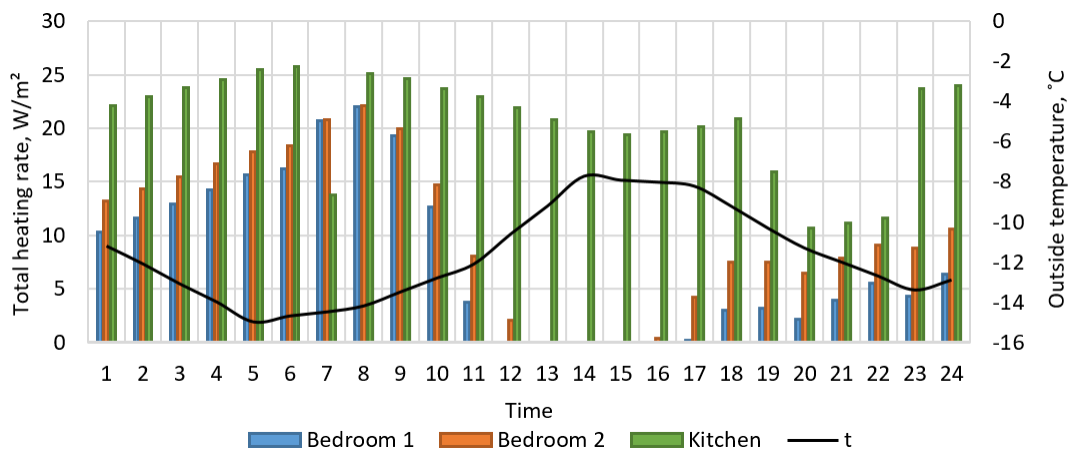


Fig. 7. Total heating load during the chosen day with constant heating mode (Bedrooms – S, kitchen – N)

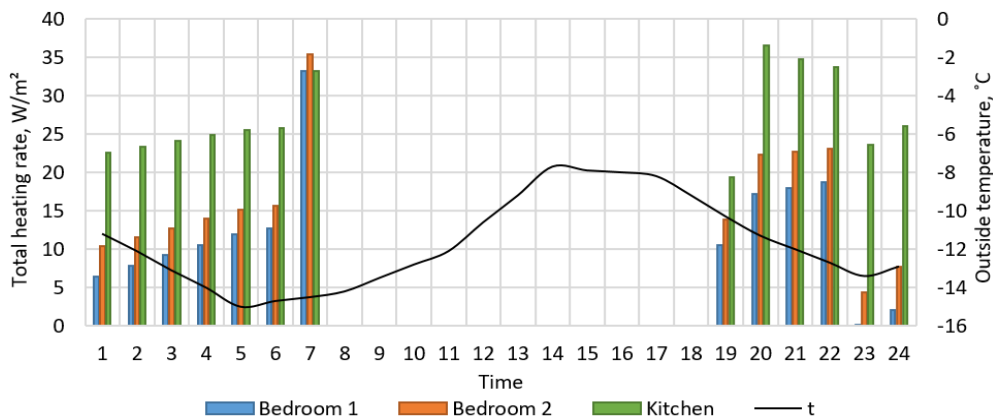


Fig. 8. Total heating load during the chosen day with intermittent heating mode (Bedrooms – S, kitchen – N)

In case when bedrooms exterior walls correspond to the southern orientation the apartment consumes 17,2 % less energy in constant heating mode and 17,6 % less energy

in intermittent heating mode than in the previous case. Results of building energy consumption calculations are given in table below (tabl. 2).

Table 2

Energy consumption calculations

Cardinal direction	Specific energy consumption, kWh/m ²	
	Constant heating mode	Intermittent heating mode
Bedrooms – N, kitchen – S	48,89	40,7
Bedrooms – S, kitchen – N	40,49	33,52

Inside surfaces temperature analysis. To analyze the effect of solar radiation on the thermal state of the premises, the temperature

on the inner surfaces of exterior walls and interior partitions was investigated on different cardinal directions (fig. 9 and 10).

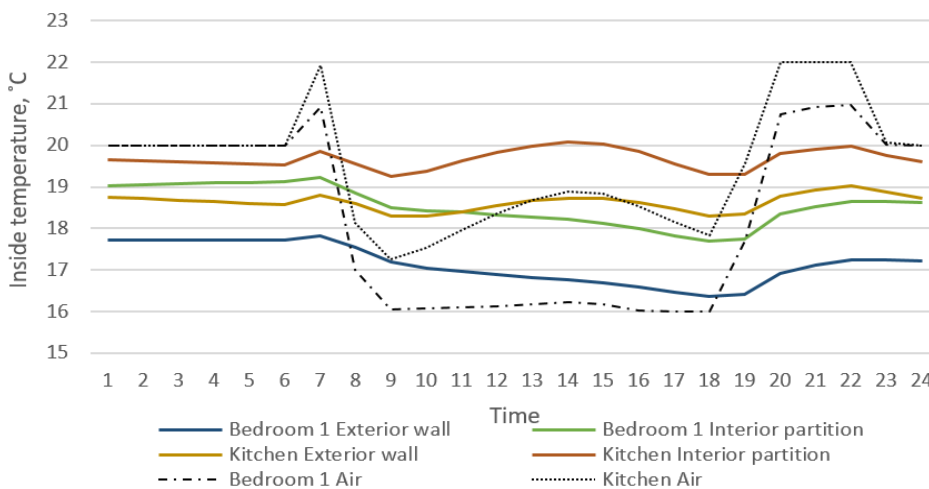


Fig. 9. Temperature on the inner surfaces of exterior walls and interior partitions with intermittent heating mode (Bedrooms – N, kitchen – S)

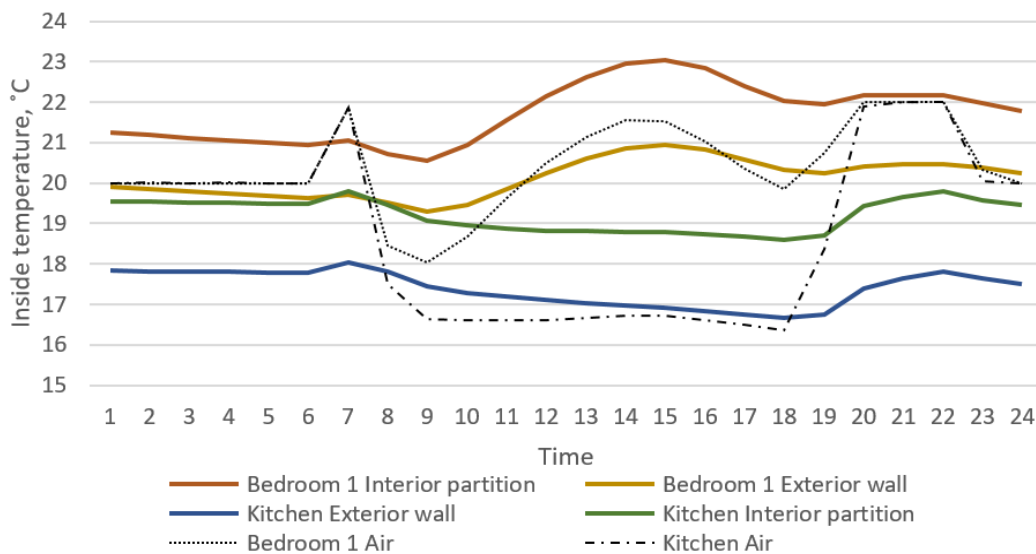


Fig. 10. Temperature on the inner surfaces of exterior walls and interior partitions with intermittent heating mode (Bedrooms – S, kitchen – N)

The schedules in fig. 9 and 10 show that temperature change on the inner surfaces of exterior walls is parallel to the interior partitions. The analysis of the above graphs reveals that during the periods without solar activity the inner surfaces temperature of exterior walls of southern orientation is lower than inside air temperature. This is largely affected by dynamic characteristics of building construction materials. It is also important to note that inside air temperature in the studied premises doesn't reach the programmed 16 °C during intermittent heating mode shutdown periods.

To check the massiveness influence the apartment energy consumption was investigated at different brick layer thicknesses of the exterior walls. The brick layer has been chosen as analyzed because it affects the massiveness to a greater extent and has a less impact on U-value. The effect was studied during intermittent heating mode when the bedrooms exterior walls correspond to the northern orientation. It established, that reducing exterior walls brick layer thickness by 20 cm resulted in apartment energy consumption increase by 5,4 %. In the same conditions exterior walls brick layer thickness

increase by 20 cm resulted in consumption decrease by 4,3 %. The results of the intermittent heating schedule analysis show that reducing the exterior walls massiveness by 2 times causes the internal temperature decrease by 0,5 °C during the shutdown periods. Thus, because of change in building construction massiveness, the heating mode schedule changes.

Conclusions. According to the modeling results in EnergyPlus the use of intermittent heating mode for apartment saves approximately 17 % of thermal energy compared to the constant mode. At different external enclosure structures orientation, the impact of solar radiation on the hourly heat load and total energy consumption of the apartment was evaluated. Thus, the difference in heat consumption of the same premises oriented in opposite cardinal directions could be as high as 17,2 % in constant heating mode. This value depends on windows and exterior walls area as well as solar activity during the heating period.

The analysis of the temperatures on the inner surfaces of the exterior walls and partitions has proved the importance of enclosing structures storage capacity in the context of the dynamics of solar radiation and

comfort conditions changes. This context should be taken into account when analyzing the modes of intermittent heating and the development of their hourly forecast.

It established, that recommendations for intermittent heating can be developed depending on the outside air temperature, solar

radiation impact and internal heat gains. To improve the quality of future research it is also important to take into account the influence of comfort conditions [13] on energy consumption and the dynamics of its interaction under the conditions of changing external factors.

References

1. Valančius Kęstutis, Stankevičius Vytautas. Influence of active heat capacity on indoor climate and energy demand of a building. Proceedings of the 8th Nordic symposium on building physics in the Nordic countries (NSB 2008), Copenhagen, June 16-18, 2008. Department of Civil Engineering Technical University of Denmark, The Danish Society of Engineers Society for Building Physics, Danish Building Research Institute Aalborg University. Lyngby: Technical University of Denmark. ISBN 9788778772657. Vol. 1 (2008). P. 65-70. [M.kr.:T 002; T 006] [Aut.lankų sk.: 0.429]
2. Kevin Eaton, Nabil Nassif, Pyrian Rai and Alexander Rodrigues. Energy Consumption and Saving Calculations Using Nearest Neighbor and Artificial Neural Network Models. *Energy Management Research Journal*. 2019. Vol. 2. No. 1. P. 1-11.
3. Куценко А. С., Коваленко С. В., ТОВАЖНЯНСКИЙ В. И. Анализ энергоэффективности прерывистого режима отопления здания. *Ползуновский вестник*. 2014. № 4-1. С. 247-253.
4. Vychtikov Yu., Saparev M., Chulkov A. Analyzing energy consumption while heating one-layer building envelopes in conditions of intermittent heating. MATEC Web of Conferences 106. 06013 (2017).
5. Lee Sang-Hoon. Intermittent Heating and Cooling Load Calculation Method - Comparing with ISO 13790. *Architectural Research*. 2012. 14 (1). P. 11-18.
6. June Young Park, Mohamed M. Ouf, Burak Gunay, Yuzhen Peng, William O'Brien, Mikkel Baun Kjærgaard, Zoltan Nagy. A critical review of field implementations of occupant-centric building controls. *Building and Environment*. 165 (2019). 15 p.
7. Bilous, I., Deshko, V., Sukhodub, I. Parametric analysis of external and internal factors influence on building energy performance using non-linear multivariate regression models. *Journal of Building Engineering*. 2018. Vol. 20. P. 327-336.
8. Deshko V., Sukhodub I., Yatsenko O. Comparison of building energy consumption by instrumental and calculation approaches. *Journal of New Technologies in Environmental Science*. 2017. Vol. 2. P. 74-80.
9. Abdullah A., Cross B., Aksamija A. Whole Building Energy Analysis: A Comparative Study of Different Simulation Tools and Applications in Architectural Design. 2014 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings. 2014. P. 11-1, 11-12.
10. Attia S., Hensen J.L.M., Bertran L. & De Herde A. Selection criteria for building performance simulation tools: contrasting architects' and engineers' needs. *Journal of Building Performance Simulation*. 2012. Vol. 5. no 3. P. 155-169.
11. Deshko V., Sukhodub I., Yatsenko O. Intermittent heating system operation modes for residential spaces. *Journal of New Technologies in Environmental Science*. 2019. Vol. 3. P. 139-148.
12. International Weather for Energy Calculations. URL: https://energyplus.net/weather-region/europe_wmo_region_6/UKR%20%20.

13. Deshko V., Buyak N., Bilous I., Voloshchuk V. Reference state and exergy based dynamics analysis of energy performance of the «heat source - human - building envelope» system. *Energy*. 2020. Vol. 200.

Дешко Валерій Іванович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри теплотехніки та енергозбереження КПІ ім. Ігоря Сікорського. ORCID iD: 0000-0002-8218-3933. Тел.: (050) 386-88-23. E-mail: te@kpi.ua.

Суходуб Ірина Олегівна, канд. техн. наук, доцент кафедри теплотехніки та енергозбереження КПІ ім. Ігоря Сікорського. ORCID iD: 0000-0002-5895-1306. Тел.: (050) 068-38-90. E-mail: ira_krot@ukr.net.

Яценко Олена Ігорівна, аспірант, асистент кафедри теплотехніки та енергозбереження КПІ ім. Ігоря Сікорського. ORCID iD: 0000-0002-8001-5987. Тел.: (050) 086-96-77. E-mail: loco-motion@ukr.net.

Deshko Valerii, D. Sc. (Tech), Professor, Head of Department of Heat Engineering and Energy Saving at Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. ORCID iD: 0000-0002-8218-3933. Tel. (050) 386-88-23. E-mail: te@kpi.ua.

Sukhodub Iryna, PhD (Tech.), Associate prof., Department of Heat Engineering and Energy Saving at Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. ORCID iD: 0000-0002-5895-1306. Tel. (050) 068-38-90. E-mail: ira_krot@ukr.net.

Yatsenko Olena, postgraduate student, Assistant lecturer, Department of Heat Engineering and Energy Saving at Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. ORCID iD: 0000-0002-8001-5987. Tel. (050) 086-96-77. E-mail: loco-motion@ukr.net.

Статтю прийнято 12.08.2020 р.

УДК 624.012.35:620.173/174

ЗАГАЛЬНІ ОСНОВИ МЕХАНІКИ ДЕФОРМУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ І КОНСТРУКЦІЙ

Д-р техн. наук В. М. Ромашко

GENERAL FUNDAMENTALS OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS AND STRUCTURES DEFORMATION MECHANICS

D. Sc. (Tech.) V. M. Romashko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.191.2020.217288>

***Анотація.** У статті викладено критичний аналіз розвитку загальної теорії та моделей опору залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам. Оцінено їх взаємозв'язок з визначальними положеннями механіки деформування залізобетонних елементів і конструкцій. Загальні положення механіки деформування залізобетонних елементів і конструкцій пропонується розвивати на основі універсальної деформаційно-силової моделі. Вказано головну перевагу деформаційно-силової моделі, пов'язану з розширенням загальновідомої системи статичних, геометричних і фізичних співвідношень до рівня статично визначеної. Підкреслена одна з основних особливостей деформаційно-силової моделі, яка дозволяє досить просто інтегрувати технічну теорію зчеплення арматури з бетоном в загальну теорію деформування залізобетону.*

Ефективність використання деформаційно-силової моделі опору залізобетону силовим впливам оцінено статистичним порівнянням теоретичних розрахунків з результатами експериментальних досліджень залізобетонних елементів, випробуваних різними авторами.

***Ключові слова:** залізобетон, елементи, деформування, модель, механіка, граничні стани, розрахунок.*

***Abstract.** This article presents a critical development analysis of the general deformation theory and models of reinforced concrete elements and structures resistance to force effects. Their relationship with the defining provisions of the mechanics of reinforced concrete elements and structures deformation is estimated. The main disadvantages of the considered models are established. General provisions of the mechanics of reinforced concrete elements and structures deformation are proposed to be developed on the basis of a universal deformation-force model. It is noted that the latter is devoid of most of the shortcomings characteristic to other models. The main advantage of the deformation-force model is indicated, associated with the expansion of the well-known system of static, geometric and physical relationships to the level of statically definable. It becomes especially noticeable when calculating reinforced concrete elements and structures for deflections and crack resistance. One of the main features of the deformation-force model is emphasized, which makes it possible to quite simply «embed» or integrate the technical theory of reinforcement to concrete adhesion into the general theory of reinforced concrete deformation. Through the averaged design section and average deformations of materials in the block between adjacent cracks, all parameters of the normal cracks formation and opening in the deformation-force model are directly related to the parameters of reinforcement to concrete adhesion.*

The effectiveness of using the deformation-force model of reinforced concrete to force effects resistance was evaluated by a statistical comparison of theoretical calculations with the reinforced concrete elements experimental studies results tested by different authors. Similar comparisons were made for the methods of the current standards. It was confirmed that the priority in the accuracy of assessing the reinforced concrete elements stress-strain state parameters belongs to the calculation method, which is based on the deformation-force model of reinforced concrete resistance.

Keywords: reinforced concrete, elements, deformation, model, mechanics, limit states, calculation.

Вступ. Загалом теорія залізобетону являє собою певну сукупність положень і тверджень про закономірності деформування бетону й арматури та їх спільну взаємодію. І як будь-яка справжня наукова теорія, вона має одночасно описувати властивості зазначених матеріалів, пояснювати цілісну картину закономірностей (механіку) деформування залізобетонних елементів і конструкцій, забезпечуючи можливість визначення їх дійсного напружено-деформованого стану на будь-якій стадії деформування. Тому її розвиток завжди зводився до удосконалення складових структурних елементів:

- передумов у вигляді фундаментальних понять і принципів, законів та аксіом, припущень і гіпотез, характерних для залізобетону;

- ідеалізованого об'єкта у вигляді абстрактних моделей визначальних ознак, властивостей та взаємозв'язків залізобетону як твердого тіла;

- логіки у вигляді сукупності певних співвідношень (правил, способів і засобів), націлених на прояснення та розвиток структури знань про залізобетон;

- висновків у вигляді сукупності законів і тверджень, методів і методик, здатних спрогнозувати стан залізобетонних елементів і конструкцій на будь-якій стадії їх деформування.

Ступінь взаємної відповідності та узгодженості зазначених структурних елементів продовжує і надалі впливати на повноту та ефективність розроблюваних методів розрахунку залізобетонних елементів і конструкцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На ранніх етапах свого розвитку залізобетон моделювали у вигляді абсолютно твердого (пружного) тіла. Його стан описували системою статичних, геометричних і фізичних співвідношень, що отримали назву відповідних рівнянь механіки твердого тіла. В основу цих співвідношень були покладені найпростіші припущення та гіпотези, властиві лише для такого тіла. Це дозволило сформуванню методикою розрахунку залізобетонних елементів і конструкцій за «допустимими напруженнями». Однак згодом було встановлено, що бетон не варто розглядати як пружний матеріал.

На другому етапі розвитку теорії залізобетону його уже стали моделювати з урахуванням пружно-пластичних властивостей бетону. Це потребувало певного коригування, перш за все, фізичних співвідношень механіки твердого тіла. Саме з використанням нелінійних діаграм деформування бетону почали закладатися основи механіки деформованого твердого тіла. Тому в кінці 30-х років ХХ століття була сформована та запроваджена у нормативні документи багатьох країн світу нова методика розрахунку перерізів залізобетонних конструкцій за «руйнуючими зусиллями» [1]. Відтоді розвиток загальної теорії залізобетону розділився на два окремих напрями.

У більшості країн світу її розвиток пішов за так званою «деформаційною» моделлю, тоді як в колишньому СРСР і деяких інших країнах було прийнято «силову» модель деформування залізобетону. За останньою вважалось, що

руйнування конструкцій в граничній стадії відбувається внаслідок утворення так званих «шарнірів пластичності» [2]. Таке спрощення дозволило суттєво спростити основні розрахунки [3, 4], однак використання моделі «пластичного шарніра» віддаляло теорію залізобетону від методів будівельної механіки. Це призвело до втрати методологічної єдності розрахунків залізобетонних елементів і конструкцій за граничними станами.

До початку ХХІ століття всім стало зрозуміло, що «силова» модель повністю вичерпала себе. Відтоді теорія залізобетону загалом і метод розрахунку перерізів конструкцій за граничними станами зокрема були зорієнтовані на «деформаційну» модель. З розвитком комп'ютерних технологій ця модель не тільки остаточно закріпилася в країнах Заходу, але й набула визнання в країнах Східної Європи та колишнього СРСР. Однак сьогодні складається враження, що і «деформаційна» модель вже потребує суттєвого удосконалення, оскільки часто «ідеалізовані об'єкти» (абстрактні моделі залізобетону) доволі слабо пов'язуються з «логікою» його досліджень, а тому:

- технічна теорія зчеплення арматури з бетоном вкрай слабо інтегрована в загальну теорію залізобетону;
- питання методологічної (діалектичної) єдності розрахунків конструкцій за граничними станами практично так і не вирішено;
- внутрішня статична невизначеність залізобетонних елементів навіть у розрахунках за несучою здатністю у більшості випадків розкривається за допомогою численних ітерацій;
- у розрахунках за тріщиностійкістю та прогинами виникає необхідність не тільки в численних ітераційних операціях, але й у використанні різного роду емпіричних параметрів, залежностей та коефіцієнтів;
- відсутність універсальних методик розрахунку залізобетонних елементів і конструкцій, які могли б реалізовуватися як

програмно, так і за допомогою інженерних експрес-методів, веде не тільки до втрати інженерної осяжності самих результатів розрахунку, але й фізичної сутності процесів деформування.

Мета та завдання досліджень. Дані дослідження спрямовані на формування узагальненої моделі та механіки деформування залізобетону, в основу яких закладено:

- визначальні гіпотези та передумови деформаційних і силових моделей;
- ідеалізований об'єкт дослідження у вигляді деякої абстрактної моделі деформованого твердого тіла, наділеного пружно-пластичними властивостями;
- достатньо обґрунтовану логіку досліджень у вигляді загальноновизнаної «розширеної» системи рівнянь механіки деформованого твердого тіла (МДТТ);
- можливість розрахунку або прогнозування стану залізобетонних елементів і конструкцій на будь-якій стадії їх деформування.

Побудова універсальної теорії залізобетону саме на таких принципах одночасно сприятиме вирішенню завдань, пов'язаних з «логікою» досліджень.

Основна частина досліджень. Сучасний аналіз стану наукових досліджень в галузі залізобетону дозволяє стверджувати, що одним з найбільш вдалих ідеалізованих об'єктів загальної теорії його деформування можна вважати модель деформованого твердого тіла. Така модель дала змогу не тільки відтворювати пружно-пластичні властивості самого залізобетону, але й пропонувати їх варіантні рішення у вигляді силових, деформаційних та удосконалених деформаційно-силових моделей [5].

Самі ж варіантні рішення або шляхи розвитку загальної теорії залізобетону значною мірою залежать від основних вихідних гіпотез та передумов. І в цьому визначальну роль необхідно відвести гіпотезам граничної рівноваги, плоских перерізів і «нелінійності» жорсткості [6].

В деформаційно-силовій моделі (ДСМ) гіпотеза граничної рівноваги не тільки закладена в основу статичних співвідношень деформування залізобетону, але й безпосередньо виступає загальним критерієм вичерпання несучої здатності залізобетонних елементів і конструкцій [7].

Не менш важливою для загальної теорії залізобетону залишається гіпотеза плоских перерізів. Після утворення тріщин її справедливність в окремих перерізах залізобетонного елемента дійсно порушується [8-10]. Однак свого часу В. Я. Бачинський [11, 12] обґрунтував, чому загальний напружено-деформований стан (НДС) залізобетонного елемента не можна оцінювати за деформаціями та

напруженнями матеріалів, вимірними лише в окремому його перерізі. Слід розглядати навіть не середній, а «осереднений» переріз елемента в блоці між тріщинами (рис. 1). А для нього гіпотеза плоских перерізів загалом залишається справедливою протягом всього процесу деформування елемента. Тому не дивно, що переважна більшість альтернативних рішень [8, 10, 13] теж зводиться до «прихованого» використання гіпотези плоских перерізів, а не вибудовується за «депланацією» нормальних перерізів.

Та все ж вирішальну роль у формуванні узагальненої теорії залізобетону слід відвести гіпотезі «нелінійності» жорсткості [5]

$$M / (1/r) = A - B \cdot (1/r) / (1/r_u) - C \cdot M / M_u, \quad (1)$$

де A , B , C – параметри, що відображають міцнісні та деформаційні характеристики перерізу елемента, безпосередньо пов’язані

з його початковою жорсткістю (D_o), граничною кривиною ($1/r_u$) та несучою здатністю (M_u).

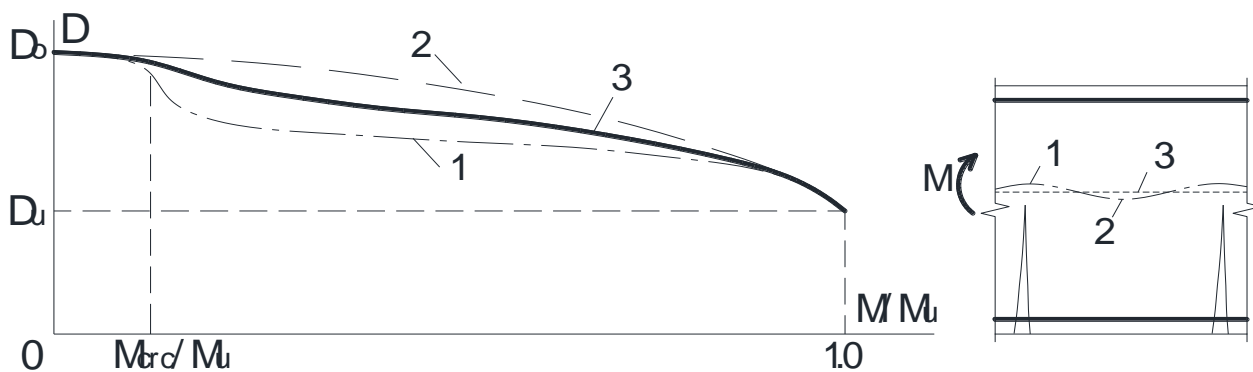


Рис. 1. Діаграми жорсткості згинального залізобетонного елемента в перерізі:
1 – з тріщиною; 2 – між тріщинами; 3 – осередненому

Згідно з цією гіпотезою узагальнена діаграма стану залізобетонного елемента набуває універсального вигляду

$$M = \frac{D_o \cdot 1/r - M_u \cdot ((1/r) / (1/r_u))^2}{1 + (D_o / M_u - 2 / (1/r_u)) \cdot (1/r)} \quad (2)$$

та за певних вихідних умов трансформується у загально визнану діаграму деформування бетону

$$\sigma_c = f_{ck} \cdot \frac{E_{co} \cdot \varepsilon_c / (E_{cu} \cdot \varepsilon_{cu}) - (\varepsilon_c / \varepsilon_{cu})^2}{1 + (E_{co} / E_{cu} - 2) \cdot (\varepsilon_c / \varepsilon_{cu})}, \quad (3)$$

де f_{ck} – характеристичне значення міцності бетону на стиск; E_{co} – початкове значення модуля деформацій бетону; E_{cu} – граничне значення модуля деформацій бетону; ε_{cu} – значення граничних деформацій стиснутого бетону.

Саме завдяки вищевказаному перетворенню діаграм $M - 1/r$ та $\sigma_c - \varepsilon_c$

забезпечується методологічна єдність розрахунків залізобетонних елементів і конструкцій за несучою здатністю, тріщиностійкістю і прогинами. Більш того, універсальна діаграма стану залізобетонного елемента (2) виступає тією ланкою, що не тільки зв'язує, але й доповнює загально визнану систему найпростіших співвідношень МДТТ [5, 6]:

$$\left. \begin{aligned} & \bullet \text{ статичних } M = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s), \quad N = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s); \\ & \bullet \text{ геометричних } 1/r = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s); \\ & \bullet \text{ фізичних } \sigma_c = f(\varepsilon_c), \quad \sigma_{ct} = f(\varepsilon_{ct}), \quad \sigma_s = f(\varepsilon_s). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Загалом система рівнянь (4) доповнюється не тільки діаграмою стану елемента (2), але й функцією граничних деформацій стиснутого бетону ε_{cu} [5]. Її отримано з тієї самої діаграми (2) завдяки застосуванню екстремального критерію Ферма $dM/d(1/r) = 0$. Внаслідок цього «логіка» досліджень залізобетонних елементів за ДСМ дозволяє розширити згадану систему рівнянь МДТТ (4) аж до рівня статично визначеної. Це дає змогу суттєво скоротити кількість ітерацій у розрахунках і навіть позбутися їх, що сприяє розробленню інженерних експрес-методів розрахунку залізобетонних елементів і конструкцій.

Переваги ДСМ з розширеною системою співвідношень (4) особливо помітні у розрахунках за прогинами і тріщиностійкістю [5-7]. Згідно з існуючими методами [8, 14-16] їх розрахунок зводиться до визначення НДС залізобетонного елемента окремо у перерізах з тріщинами та у середніх перерізах між ними. Згодом обчислюються осереднені параметри та характеристики НДС самого елемента. Характерною ж відмінністю деформаційно-силової моделі є те, що вона одразу дозволяє безпосередньо визначити осереднену кривину залізобетонного елемента на будь-якій стадії його деформування

$$\frac{1}{r} = \frac{1/r_u}{2M_u} \left[\left(1 - \frac{M}{M_u}\right) \frac{D_o}{r_u} + 2M - \sqrt{\left(\left(1 - \frac{M}{M_u}\right) \frac{D_o}{r_u} + 2M\right)^2 - 4M \cdot M_u} \right] \quad (5)$$

та за гіпотезою плоских перерізів пов'язати її безпосередньо з відносними

деформаціями матеріалів в осередненому перерізі блока між тріщинами

$$1/r = (\varepsilon_{c2} + \varepsilon_{s1})/d, \quad (6)$$

де ε_{c2} – поточні значення відносних деформацій бетону найбільш стиснутої грані; ε_{s1} – поточні значення відносних деформацій видовження арматури; d – робоча висота перерізу елемента прямокутного профілю.

Ще однією особливістю деформаційно-силової моделі є те, що вона дала змогу доволі просто «вмонтувати» технічну теорію зчеплення арматури з бетоном в загальну теорію деформування залізобетону [17-19]. Через осереднені характеристики в блоці між суміжними тріщинами всі параметри тріщиноутворення безпосередньо пов'язуються з характеристиками зчеплення арматури з бетоном. Отримані при цьому рішення є набагато простішими за ті, що пропонуються в рамках механіки руйнування за моделями «двоконсольних елементів» чи складених стрижнів. Декларовані переваги згаданих моделей [8, 13, 20] в загальній теорії залізобетону взагалі є дискусійними. Річ в тім, що механіка руйнування дозволяє досить ефективно описувати закономірності зародження і розвитку неоднорідностей та дефектів структури відносно однорідних матеріалів. Застосування ж її до залізобетону, в якому ще до початку завантаження є безліч неоднорідностей та дефектів у вигляді пор і раковин, мікро- та макротріщин і дислокацій різного роду, призводить до рішень, реалізація яких вкрай ускладнена навіть за допомогою спеціальних програмних комплексів. Тому запровадження рішень механіки руйнування у практику проектування залізобетонних елементів і конструкцій залишається доволі обмеженим.

Ефективність використання деформаційно-силової моделі опору

залізобетону силовим впливам та розроблених на її основі методів розрахунку залізобетонних елементів і конструкцій була оцінена шляхом порівняння результатів теоретичних розрахунків з експериментальними даними (таблиця). Водночас аналогічні порівняння були зроблені з результатами розрахунків, виконаних за методиками чинних норм [15, 16]. Всі вони показали, що пріоритет в точності оцінювання несучої здатності, прогинів та ширини розкриття нормальних тріщин залізобетонних елементів належить методам розрахунку, в основі яких лежить ДСМ опору залізобетону.

Висновки. Таким чином, пропонований напрям розвитку загальної теорії залізобетону за деформаційно-силовою моделлю дозволяє:

- досягти повної методологічної єдності розрахунку залізобетонних елементів і конструкцій за несучою здатністю, тріщиностійкістю та прогинами;
- суттєво знизити рівень статичної невизначеності загальновідомої системи рівнянь МДТТ і навіть перетворити її в статично визначену;
- ефективно прогнозувати не тільки загальну жорсткість, але й будь-який інший параметр НДС залізобетонних елементів і конструкцій на будь-якій стадії їх деформування за мінімального використання емпіричних параметрів і коефіцієнтів або ж взагалі без їх залучення;
- створювати інженерні експрес-методи розрахунку залізобетонних елементів і конструкцій за граничними станами без використання спеціального програмного забезпечення;
- доволі просто інтегрувати технічну теорію зчеплення арматури з бетоном в загальну теорію деформування залізобетону.

Порівняння теоретичних та експериментальних значень параметрів

Автори та параметри досліджень	Відхилення дослідних даних від розрахункових за								
	[15]			[16]			[5]		
	Δ	σ	$\nu, \%$	Δ	σ	$\nu, \%$	Δ	σ	$\nu, \%$
Несуча здатність згинальних елементів									
Pam H. J. [21]	1,02	0,083	7,83	1,016	0,08	7,83	1,013	0,073	7,25
Sarkar S. [22]	1,052	0,17	16	1,048	0,174	16,65	1,028	0,133	12,93
Прогини									
Burns N., Siess C.[23]	1,019	0,155	15,24	1,022	0,159	15,51	0,978	0,11	11,29
Ernst G. C. [24]	1,011	0,18	17,78	1,009	0,188	18,64	1,018	0,142	13,96
Ширина розкриття нормальних тріщин									
Pundinaitė M. [25]	1,289	0,3	23,29	1,334	0,321	24,06	1,106	0,199	18,31
Gilbert R., Nejadi S.[26]	1,095	0,332	30,33	1,103	0,377	34,14	1,087	0,21	19,34
Δ і σ - середньоарифметичне та стандартне відхилення, ν - коефіцієнт варіації									

Список використаних джерел

1. Лолейт А. Ф. Инструкция для подбора сечений железобетонных элементов по критическим усилиям. Москва: ВНИИТОБ, 1933. 82 с.
2. Пастернак П. Л. Замечания к проекту новых норм проектирования железобетонных конструкций. *Строительная промышленность*. 1944. № 7. С. 20-23.
3. Гвоздев А. А. Расчёт несущей способности конструкций по методу предельного равновесия: сущность метода и его обоснование. Москва: Госстройиздат, 1949. 280 с.
4. Гольденблат И. И. Основные положения метода расчета строительных конструкций по расчетным предельным состояниям и нагрузкам. Москва: Госстройиздат, 1955. 35 с.
5. Ромашко В. М. Деформаційно-силова модель опору бетону і залізобетону: монографія. Рівне: О. Зень, 2016. 424 с.
6. Romashko V., Romashko O. The construction features of the deformation and force model of concrete and reinforced concrete resistance. *MATEC Web of Conf.* 2017. Vol. 116. 02028.
7. Romashko V. and Romashko O. Fundamentals of the General Theory of Resistance of Reinforced Concrete Elements and Structures to Power Influences. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 968. P. 534-540.
8. Бондаренко В. М., Колчунов В. И. Расчётные модели силового сопротивления железобетона: монография. Москва: «АСВ», 2004. 472 с.
9. Колчунов В. И., Яковенко И. А. Об использовании гипотезы плоских сечений в железобетоне. *Строительство и реконструкция*. 2011. № 6(38). С. 16-23.
10. Кочкаръов Д. В., Бабич В. І. Передумови розрахунку та розрахунок прогинів залізобетонних елементів, що зазнають згину, з урахуванням нелінійного деформування матеріалів. *Будівельні конструкції: зб. наук. праць НДІБК*. Київ, 2011. Вип. 74. Ч.1. С. 406-413.
11. Бачинский В. Я. О потере устойчивости деформирования изгибаемого бруса. *Строительные конструкции: респ. межведомст. науч.-техн. сб. НИИСК Госстроя СССР*. Київ, 1982. Вып. 35. С. 55-58.

12. Голышев А. Б., Бачинский В. Я. К разработке прикладной теории расчёта железобетонных конструкций. *Бетон и железобетон*. 1985. № 6. С. 16-18.
13. Колчунов В. И., Яковенко И. А. Разработка двухконсольного элемента механики разрушения для расчета ширины раскрытия трещин железобетонных конструкций. *Вестник гражданских инженеров СПбГАСУ*. 2009. № 4(21). С. 160-163.
14. Бамбура А. М. Експериментальні основи прикладної деформаційної теорії залізобетону: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / НДІБК. Київ, 2005. 379 с.
15. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. [Чин. від 01.06.11]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с.
16. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings [Final Draft, Dec. 2004]. Brussels: CEN. 2004. 225 p.
17. Romashko O., Romashko V. Evaluation of bond between reinforcement and concrete. *MATEC Web of Conf.* 2018. Vol. 230. 02027.
18. Romashko V., Romashko O. Calculation of the crack resistance of reinforced concrete elements with allowance for the levels of normal crack formation. *MATEC Web of Conf.* 2018. Vol. 230. 02028.
19. Romashko O. V. and Romashko V. M. Model of multilevel formation of normal cracks in reinforced concrete elements and structures. *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. 012069.
20. Яковенко І. А. Моделі деформування залізобетону на засадах механіки руйнування: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.23.01. Полтава, 2018. 44 с.
21. Pam H. J., Kwan A. K. H., Islam M. S. Flexural strength and ductility of reinforced normal- and high-strength concrete beams. *Structures & Buildings*. 2001. Vol. 146, No 4. P. 381-389.
22. Sarkar S., Adwan O., Munday J. G. L. High strength concrete: an investigation of the flexural behavior of high strength RC beams. *The Structural Engineer*. 1997. Vol. 75, No 7. P. 115-121.
23. Burns N. H., Siess C. P. Plastic Hinging in Reinforced Concrete. *Proceedings ASCE*. 1966. Vol. 92, ST5. P. 45-64.
24. Ernst G. C. Plastic hinging at the intersection of beams and columns. *ACI Journal*. 1957. Vol. 28, No 12. P. 1119-1144.
25. Pundinaitė M. Lenkiamųjų gelžbetoninių element pleišėjimo eksperimentiniai ir teoriniai tyrimai: Baigiamasis magistro darbas Vilnius: Gedimino Technikos Universitetas, 2010. 103 p.
26. Gilbert R. I., Nejadi S. An Experimental Study of Flexural Cracking in Reinforced Concrete Members under Sustained Loads: UNICIV Report № R-435, School of Civil and Environmental Engineering. Sydney: University of New South Wales, 2004. 59 p.

Ромашко Василь Миколайович, д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри основ архітектурного проектування, конструювання і графіки Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне). ORCID iD: 0000-0003-3448-7489. Тел.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasy1@gmail.com.

Romashko Vasyl Mykolayovych, D. Sc. (Tech.), associate professor, head of Chair of Architectural Designing Bases, Constructing and Graphics National University of Water Management and Nature Recourses Use (Rivne). ORCID iD: 0000-0003-3448-7489. Tel.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasy1@gmail.com.

Статтю прийнято 18.06.2020 р.

УДК 624.012.45

ПРО ОДНУ МОЖЛИВІСТЬ ОЦІНЮВАННЯ ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ПОЖЕЖІ

Канд. техн. наук П. А. Резнік, д-р техн. наук В. С. Шмуклер, асп. Мохамад Альмохамад

ON ONE POSSIBILITY OF THE ASSESSMENT OF PROGRESSIVE COLLAPSE OF STRUCTURES IN FIRE

PhD (Tech.) P. Reznik, D. Sc. (Tech.) V. Shmukler, Postgraduate Student M. Almohamad

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.191.2020.217291>

Анотація. У статті запропоновано алгоритм визначення відповідальних елементів при прогресуючому обваленні будівлі від впливу пожежі. Алгоритм заснований на застосуванні максимально гнучких розрахункових схем та ітераційної процедури енергетичних портретів будівлі за критерієм Василькова-Шмуклера. Реалізація алгоритму продемонстрована на прикладі визначення відповідальних елементів реального житлового комплексу в м. Львові. За результатами складання 15 сценаріїв надзвичайного впливу пожежі на одну з будівель виявлено найбільш небезпечний сценарій аварії для всього комплексу в цілому.

Ключові слова: відповідальний елемент, прогресуюче обвалення, пожежа, система «Монофант», вогнестійкість.

Abstract. The paper proposes an algorithm for determining the responsible elements in the progressive collapse of a building in fire. The algorithm is based on the use of the most flexible calculation schemes and iterative procedure of energy portraits of the building according to the Vasilkov-Shmukler criterion. The implementation of the algorithm is demonstrated on the example of determining the responsible elements of a real residential complex in Lviv. The object of the study is the residential complex «America», which consists of two 17-storey paired blocks and a block of two-storey shopping centre, located between them. Structurally, each of two buildings is a monolithic reinforced concrete frameless structure with voided overlappings made according to «Monofant» technology. At the beginning, all the initial data related to the structural scheme of the building are collected and systematized, such as geometric parameters, physical and mechanical characteristics of materials, engineering and geological conditions, loads and impacts. Then the computational model of the building is created. Herein the «Lira» software based on finite element method is used. Based on the results of the generated initial data and the building model, a static calculation is performed. After verification of compliance with the requirements for structures of the 1st and 2nd groups of limit states, the analysis of possible fire scenarios and modes is performed. The next step is determination of temperature fields, which gives the possibility to generate temperature loads. In general, 16 separate downloads were formed. The first download included all vertical loads from static calculation, and the next 15 downloads - all vertical loads and 1 different temperature load. The main aspect in the proposed algorithm is the criterion for selecting the responsible elements based on the approach of building of energy portrait of structure. After Vasytkov-Shmukler criterion, it is proposed to determine the values of the strain energy density for each finite element and strain energy of the whole system. According to the results of compiling 15 scenarios of emergency fire on one of the buildings and determining the largest values of strain energy density, the most dangerous accident scenario for the whole complex was identified.

Keywords: responsible element, progressive collapse, fire, «Monofant» system, fire resistance.

Вступ. Щорічне зростання кількості аварій внаслідок пожеж, терористичних актів, вибухів побутового газу і просто видалення опор при наїзді автотранспорту, які не були передбачені на стадії проектування, але викликали обвалення окремих конструкцій, а в деяких випадках – і всієї будівлі, ставить за мету забезпечення конструктивної безпеки і живучості споруд досить гостро. Для абсолютної більшості будівельних об'єктів сприйняття таких «особливих впливів» не передбачалося, оскільки вони належать до аварійних ситуацій, врахування яких суттєво збільшило б вартість проектних робіт. Загальновідомо, що на попередження аварій необхідно значно менше коштів, ніж на їх ліквідацію. Так, за даними іноземних дослідників, середньостатистичний розмір збитків від руйнування будівлі оцінюється в 684,5 % при його 100 % вартості. У зв'язку зі збільшенням останнім часом кількості аварій будівель і споруд в результаті помилок проектування та зведення, порушення правил експлуатації і високого ступеня зносу експлуатованих об'єктів капітального будівництва сьогодні вимагають розроблення принципово нові концепції захисту будівельних об'єктів від прогресуючого обвалення.

Для забезпечення живучості будівлі до прогресуючого руйнування необхідно мати методіку щодо визначення відповідального елемента. Згідно з ДБН В.1.2-14:2018 *відповідальним* називають елемент, руйнування якого призводить до руйнування або загрози руйнування споруди в цілому. Правильнішим було б формулювання «*відповідальні елементи*», тому що поліморфізм віртуальних руйнувань зумовлюється більш складними процесами, що породжують аварії. Закономірно, що при різних видах аварій відповідальні елементи будівель відрізнятимуться. Тому побудова алгоритму виявлення відповідального елемента будівель і споруд для якісного оцінювання прогресуючого обвалення є актуальним та своєчасним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз теоретичних і експериментальних досліджень у сфері прогресуючого обвалення каркасних залізобетонних будівель свідчить про недостатню вивченість проблеми. Більш того, практично відсутні рекомендації з проектування сценаріїв надзвичайних ситуацій, зокрема пожеж. А в діючих вітчизняних нормативних документах взагалі відсутні рекомендації щодо розрахунку на можливість прогресуючого обвалення.

Визначення терміна «прогресуюче (лавиноподібне, непропорційне) обвалення» зустрічається в нормативних документах багатьох країн. Проте серед них відрізняються не лише власне визначення «прогресуючого обвалення», але й допустимі його розміри. Деякі визначення вказують на поширення руйнувань від місцевого до загального, тобто на зміну стану будівлі в часі, а інші тільки констатують факт руйнувань і встановлюють їх розміри.

Узагальнюючи положення нормативних документів різних країн, можна виділити два сформованих підходи захисту від «прогресуючого» обвалення. Відповідно до першого підходу (англ. Indirect method) необхідно використовувати непрямі заходи захисту, другого (англ. Direct method) – слід враховувати здатність ключових елементів (англ. Specific local resistance method або key element design) сприймати ушкоджуючі впливи (вплив високих температур, вибухи газу, бомб; ударні навантаження від транспортних засобів, літаків і т. д.) і (або) здатність конструкції перерозподіляти навантаження при відмові елемента (англ. alternate load path method, bridging method).

У більшості нормативних документів різних країн для розрахунку монолітних житлових будинків рекомендується використовувати просторову розрахункову модель. Розрахункова модель будівлі має передбачати можливість видалення (руйнування) окремих вертикальних

конструктивних елементів. Видалення одного або декількох елементів змінює конструктивну схему і характер роботи елементів, які примикають до місця руйнування або завислих над ним, що необхідно враховувати при визначенні характеристик жорсткості елементів і їх зв'язків. Розрахункова модель будівлі має бути розрахована окремо з урахуванням кожного (одного) з локальних руйнувань.

Розрахунок будівлі можна виконувати з використанням різних програмних комплексів, у тому числі заснованих на методі скінченних елементів. Використання програмних комплексів, що допускають можливість урахування фізичної та геометричної нелінійності характеристик жорсткості елементів, забезпечує найбільшу достовірність результатів розрахунку і зниження додаткових матеріалозатрат.

Проте жодних рекомендацій щодо визначення ключових елементів при розглянутих сценаріях надзвичайних ситуацій як у вітчизняних нормативних документах, так і нормативних документах зарубіжних країн не виявлено.

За минулі роки на тему прогресуючого обвалення було написано величезну кількість робіт. Зокрема в статті [1] було проведено натурний експеримент на реально існуючому 20-поверховому залізобетонному будинку та вивчено розподіл власної ваги і можливість прогресуючого обвалення. Видалення колони середнього ряду першого поверху не призвело до прогресуючого руйнування. Дані випробувань зіставлені з результатами аналітичного аналізу за допомогою МСЕ та показали задовільний збіг.

В роботі [2] пропонується сіткова модель для аналізу поведінки руйнування монолітних залізобетонних безригельних каркасних будинків з урахуванням фізичної нелінійності бетону й арматури.

У статті [3] наведені дані з експериментального дослідження руйнування залізобетонної будівлі на 6 моделях у масштабі 1:10.

В роботі [4] аналізується досвід пожеж в попередньо напружених залізобетонних конструкціях, в тому числі і пожежа в каркасному будинку.

Аналіз та узагальнення згаданих наукових робіт, а також наявної вітчизняної та іноземної нормативної бази дозволили сформулювати мету і завдання даного дослідження.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є побудова алгоритму виявлення відповідального елемента будівель і споруд для якісного оцінювання прогресуючого обвалення під час пожежі. *Об'єкт дослідження* – вогнестійкість безригельної каркасної монолітної залізобетонної будівлі при розгляді багатьох варіантів пожежі. *Предмет дослідження* – процеси поширення температури і формування напружено-деформованого стану в залізобетонних будівлях, що можуть викликати прогресуюче обвалення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати чисельний аналіз монолітного каркасного будинку з використанням методу скінченних елементів для виявлення відповідального елемента і визначення його несучої здатності при надзвичайній дії пожежі;
- отримати і дослідити нестационарні температурні поля в перерізах основних несучих конструкцій споруди і використати їх для формування додаткового навантаження;
- оцінити ефективність енергетичних критеріїв для виявлення відповідальних елементів при багатоваріантних аварійних ситуаціях.

Основна частина дослідження. Для вирішення поставленого в роботі завдання з побудови алгоритму визначення відповідального елемента при прогресуючому обваленні внаслідок пожежі моделювання віртуальної аварійної ситуації виконано на прикладі реально існуючої багатоповерхової житлової будівлі.

Об'єктом дослідження виступає житловий комплекс «Америка» (м. Львів), що складається з двох 17-поверхових спарених блоків і блока двоповерхового торговельного центру (рис. 1, а), що розташований між ними. Конструктивно кожна з двох будівель являє собою монолітний залізобетонний безригельний каркас (рис. 1, б) з перерізом колон 400×400 мм, 400×800 мм, 400×700 мм, 400×600 мм і плит перекриттів товщиною

300 мм, що зроблені з використанням пінополістирольних вкладишів-пустотоутворювачів (система «Монофант»).

На рис. 2 наведено запропонований алгоритм знаходження відповідальних елементів та перевірки стійкості до прогресуючого руйнування при пожежі. В основі алгоритму лежить побудова максимально гнучких розрахункових схем та ітераційна процедура енергетичних портретів будівлі за критерієм Василькова-Шмуклера.



Рис. 1. Поперечний переріз (а) та фото реалізованих (б) розглянутих будівель ЖК «Америка»

1. На початковому етапі збираються та систематизуються всі вихідні дані, що належать до конструктивної схеми будівлі: геометричні параметри, фізико-механічні характеристики матеріалів, інженерно-геологічні умови, навантаження і впливи.

Зокрема житловий комплекс «Америка» характеризується такими параметрами:

- категорія складності споруди – V;
- клас наслідків – СС2;
- ступінь вогнестійкості споруди – I;
- кліматичний район – I;
- температура зовнішнього повітря холодної п'ятиденки – 254 К (-19 °С);

- вітровий район – III; нормативний вітровий тиск – 520 Па (52 кг/м²);
- сніговий район – I; снігове навантаження – 1310 Па (131 кг/м²).

2. На наступному етапі створюється розрахункова модель будівлі. Скінченно-елементну модель каркасу будівлі, отриману через імпорту попередньої тривимірної моделі в ПК «Ліра Сапр 2019» [5], наведено на рис. 3. Загальний розмір моделі 127284 скінченних елементів (СЕ) і 114577 вузлів.

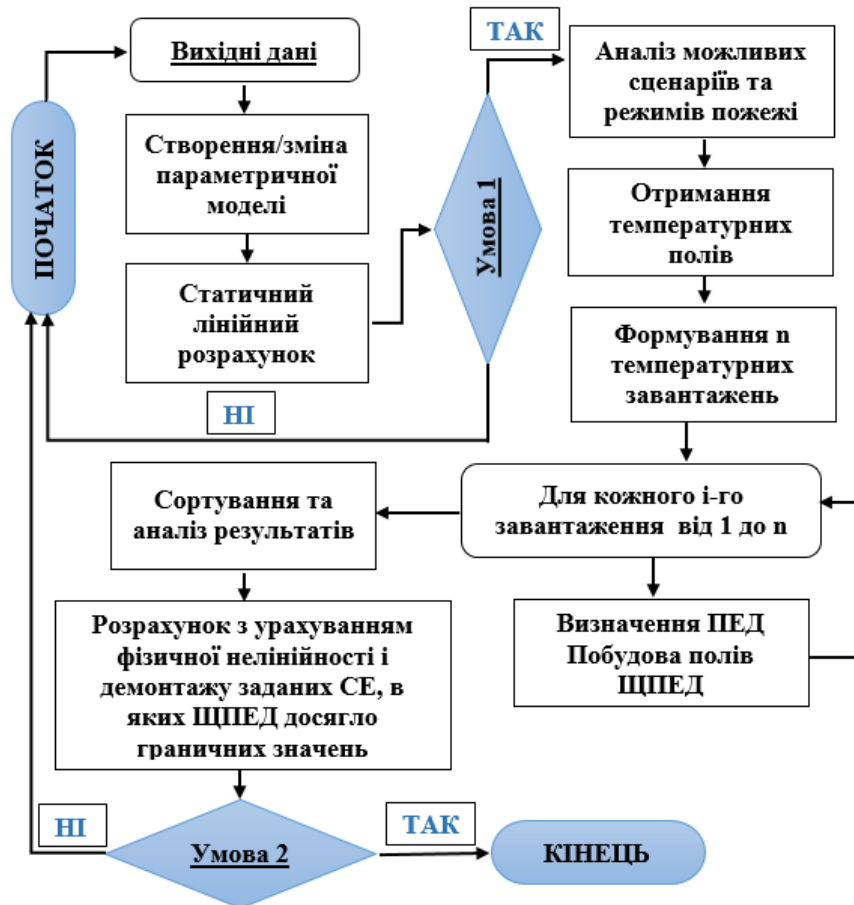


Рис. 2. Пропонований алгоритм визначення відповідального елемента

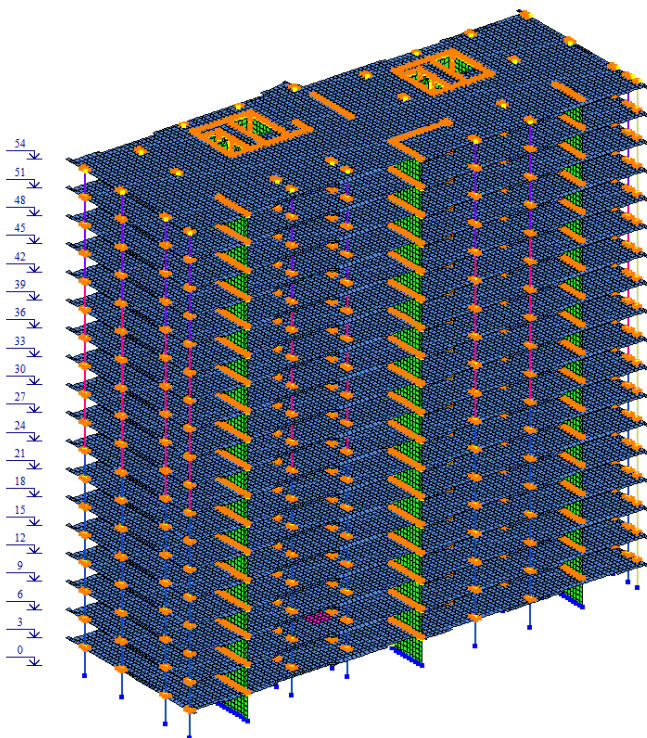


Рис. 3. СЕ модель будівлі

Беручи до уваги те, що поставлене завдання передбачає часту зміну геометричних параметрів, модель будівлі має реалізовувати підхід BIM (Building Information Modeling), а саме всі геометричні властивості об'єкта і навантаження повинні бути максимально параметризованими. У зв'язку з цим для даного об'єкта обрана система «Сапфір-Генератор», оскільки вона забезпечує безпосередній зв'язок з розрахунковими комплексами і має достатній для поставлених завдань функціонал.

3. Далі виконується статичний лінійний розрахунок. За результатами сформованих вихідних даних і моделі будівлі виконується статичний розрахунок. На цьому етапі всі властивості матеріалів задаються постійними. У даній роботі було сформовано 20 розрахункових сполучень навантажень (РСН), з них 8 перших основних сполучень, 4 других основних сполучень та 8 аварійних сейсмічних поєднань. На даному етапі важливе виконання умови 1 – перевірка задоволення вимог, що ставляться до конструкцій по 1-й і 2-й групах граничних станів [6].

4. Аналіз можливих сценаріїв і режимів пожежі. Тільки після уточнення всіх прийнятих конструктивних рішень в пунктах 1–4 слід починати розгляд можливих сценаріїв і режимів пожежі за ДБН В.1.2-14: 2018.

Складання переліку можливих подій, які можуть спричинити аварійний стан, дає можливість визначити найбільш імовірні причини та місця виникнення небезпечних явищ, а також розробити заходи з підвищення стійкості несучих конструкцій при аварії (поділом об'єкта на відокремлені частини, встановленням дублюючих конструкцій чи додаткових в'язей).

У даній роботі розглядалися лише сценарії аварійних ситуацій, пов'язані з пожежею. На наш погляд, всі сценарії мають бути детерміновані для даного об'єкта і обов'язково включати до себе всі особливості конкретної надзвичайної

ситуації. Наприклад, автори даної статті вважають за необхідне враховувати температурні зусилля, які з'являються в елементах конструкції внаслідок нагріву, а не лише знижувати фізико-механічні властивості матеріалів під час пожежі. Також має бути прорахована можливість появи інших НС внаслідок впливу даної (вибух внаслідок пожежі).

Автори вважають підхід [7], реалізований в нормах різних країн, коли до колон та перекриттів пред'являють різні межі вогнестійкості REI 120 та REI 60 (для ЖК «Америка»), некоректним. Тому що на межу вогнестійкості всієї будівлі не безпосередньо впливають межі вогнестійкості окремих конструкцій. Так, при можливому обваленні одного або декількох перекриттів можливість колон і діафрагм продовжувати забезпечувати цілісність і просторову жорсткість всієї будівлі є сумнівною. Тому потрібне комплексне оцінювання. Для будівлі, розглянутої в даному аналізі, встановлена межа вогнестійкості і для перекриттів, і для колон REI 60.

Актуальним питанням також є визначення площі вогнища пожежі. Адже діючі нормативні документи дають лише чіткі вказівки щодо зниження фізико-механічних властивостей матеріалів, задавання режимів пожежі, залежно від яких будуть визначені температурні поля в перетинах конструкцій. Цього достатньо з застереженнями для розрахунку окремої конструкції, але абсолютно не підходить при аналізі частини або всієї будівлі, особливо в даній роботі, де розглядається монолітна залізобетонна будівля. Тому що необхідно враховувати, як будуть розподілятися додаткові температурні зусилля в багато разів статично невизначеній конструкції, як буде відбуватися перерозподіл зусиль внаслідок зміни жорсткостей окремих елементів будівлі або навіть виходу їх з ладу. Більш того, логічно припустити, що температура реальної пожежі буде неоднакова в центрі вогнища і на його межах. Площа вогнища залежить від пожежного навантаження в кожному з приміщень,

планувального рішення і системи вентиляції. Для відносно точного обчислення цієї площі використовується обчислювальна гідродинаміка. Але навіть з урахуванням всіх особливостей процесу пожежі його швидкість поширення є суто стохастичним значенням. Визначення площі пожежі є окремим складним і актуальним завданням.

5. Визначення температурних полів. Виконано з використанням вбудованих сателітів ПК «Ліра-Сапр» [5] (рис. 4). При розрахунку конструкцій на вогнестійкість здійснюється підбір і перевірка арматури з урахуванням зниження міцнісних і деформаційних характеристик бетону та арматури в результаті заданого вогневого впливу [7-8].

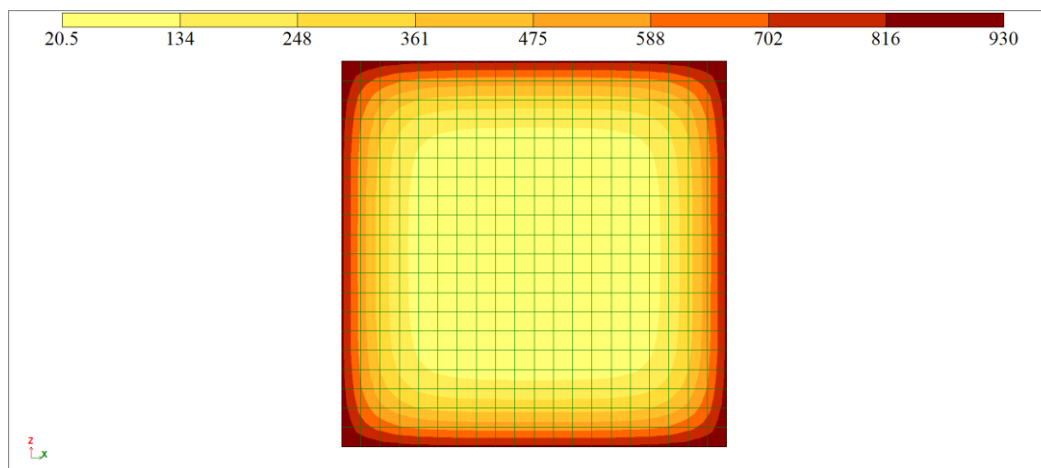


Рис. 4. Відображення температурних ізополів перерізу колони розглянутої будівлі (вогневий вплив з чотирьох сторін), °С

6. Формування температурних навантажень. Для моделювання загального алгоритму аналізу всієї будівлі підвищені температури були задані відповідно до режиму стандартної пожежі через 60 хв. Площа пожежі – 9 м². Розподіл температури пожежі по площі прийнято однаковим.

Остаточо сформовано 16 окремих навантажень. Перше навантаження включало всі вертикальні навантаження з пункту 3, а наступні 15 навантажень – всі

вертикальні навантаження і 1 температурне навантаження. Для використання температурних полів, отриманих в пункті 6, навантаження застосовано підхід, зазначений у роботах [8-10].

15 навантажень з температурними навантаженнями задані у п'яти різних точках (рис. 5) у плані плити перекриття в трьох різних ярусах, де відбувається зміна перерізу пілонів 400×800 мм, 400×700 мм, 400×600 мм.

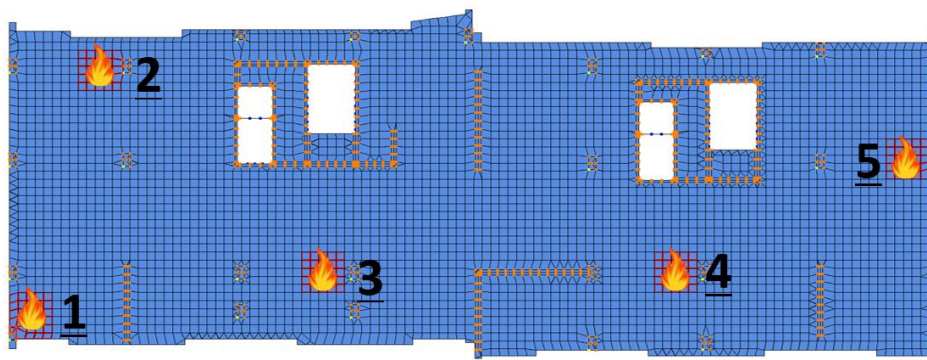


Рис. 5. Віртуальні осередки виникнення пожежі в ЖК

Визначення потенційної енергії деформацій (ПЕД) і отримання полів щільності ПЕД

Центральним аспектом в запропонованому алгоритмі є критерій вибору відповідальних елементів. Пропонується

$$e_u = 0,5\chi_\sigma^2[(\chi_\sigma + 1)e_{nc} + (\chi_\sigma - 1)e_{nt}] + (1 - \chi_\sigma^2)e_{nsh}, \quad (3)$$

де $\chi_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ – параметр Лоде-Надаї напружено-деформованого стану;

e_c, e_t, e_{sh} – щільність потенційної енергії при стисканні, розтягненні та зсуві відповідно.

Даний підхід базується на порівнянні граничного значення з поточним значенням ЩПЕД. Якщо в скінченному елементі $e_i > e_{iu}$, то він виключається зі схеми моделі. Маючи в розпорядженні алгоритми, що встановлюють послідовне об'єднання суміжних відбракованих елементів, з'являється можливість побудови поверхонь розчленування (руйнування) конструкції,

визначати щільність потенційної енергії деформації для кожного скінченного елемента (ЩПЕД) та потенційної енергії деформації всієї системи (ПЕД) на базі критерію Василькова-Шмуклера. Граничне значення ЩПЕД визначається за формулою

тобто встановлення послідовності переходу від руйнування в локальній області до глобального віртуального колапсу.

7. Сортування та аналіз результатів. На даний момент обчислення ПЕД і ЩПЕД реалізовано в програмному комплексі Ліра 10.6. Тому реалізація вищенаведеної процедури не викликає складнощів. Отримані значення ПЕД для всіх 16 варіантів сортувалися і вибиралися найгірші варіанти. На рис. 6 наведено графік ПЕД для всіх 16 навантажень. На рис. 7 подано ранжування за ПЕД тільки навантажень з температурними навантаженнями.

На рис. 8 зображено визначення граничного і поточного значень ЩПЕД.

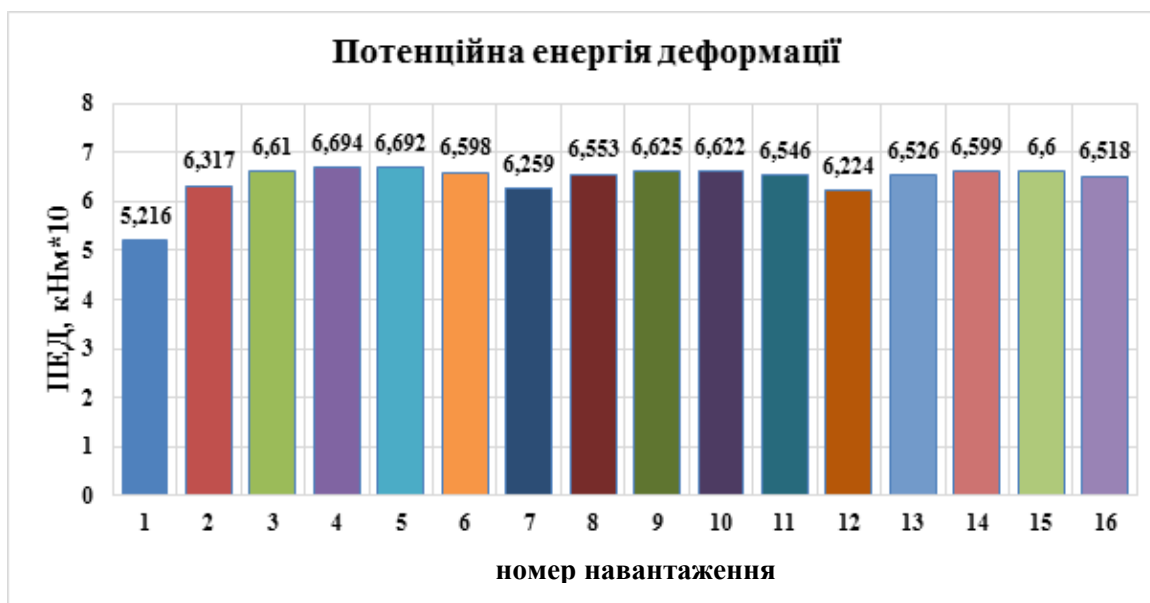


Рис. 6. Значення потенційної енергії деформації для всіх розглянутих варіантів



Рис. 7. Ранжування значень потенційної енергії деформації для температурного навантаження

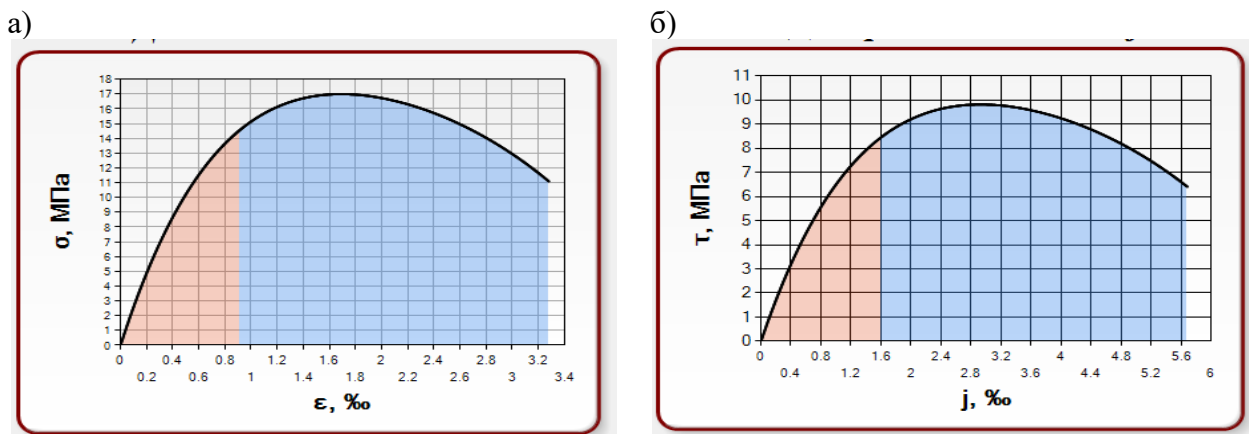


Рис. 8. Діаграми стискання (а) та зсуву (б) для бетону класу С25/30 для визначення ЩПЕД

Як видно з рис. 6, варіантами з найбільшими значеннями ПЕД виявилися навантаження № 4 і № 5. Це навантаження на найнижчому ярусі. Різниця між ними складає всього 0,04 %. Даний аспект говорить про те, що розрахунок і аналіз мають проводитися не тільки для варіанта з найбільшим значенням, але й для інших, якщо різниця між ними не перевищує заданої Δ . У цій роботі в подальшому проводився аналіз навантаження № 4.

Після ранжування і вибору розглянутого сценарію пожежі слід провести аналіз полів ЩПЕД. На рис. 9 наведені поля щільності потенційної енергії для навантаження № 4. СЕ з граничним значенням ЩПЕД видаляються з розрахункової схеми на наступному етапі.

8. На останньому етапі перевіряється задоволення вимог, що ставляться до конструкцій для конкретного аварійного сценарію з урахуванням особливих вимог

нормативних документів. Наприклад, під час пожежі приймається понижуючий коефіцієнт на корисне навантаження, що в даному випадку дорівнює 0,7. За результатами аналізу ЩПЕД, колона, піддана вогневому впливу, не вийшла з ладу. З розрахункової схеми були виключені СЕ плити перекриття сумарною площею

2,5 м². Обмеження по другому граничному стану не розглядалися. Результати показали, що в будівлі не спостерігається розвиток лавиноподібних процесів виключення зі схеми несучих елементів, окрім збільшення деформацій в місці розташування вогнища пожежі і в радіусі 3 м та додавання поздовжніх зусиль в пілоні.

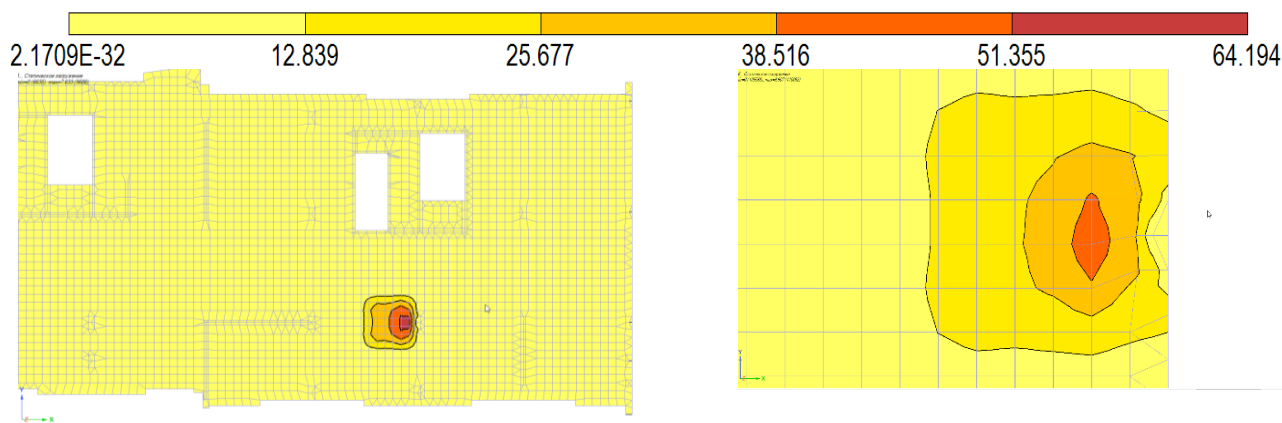


Рис. 9. Щільність ПЕД для варіанта № 4, кПа

Висновки:

1. Запропоновано алгоритм виявлення відповідального елемента будівель і споруд на базі енергетичного критерію Василькова-Шмуклера для аварійного впливу пожежі. Алгоритм дозволяє виявити «відповідальний» елемент конструкції будівлі і перевірити несучу здатність цього елемента без необхідності реалізації ітераційного процесу генерації окремих вогнищ пожежі у всіх можливих частинах будівлі.

2. Поданий алгоритм дозволяє провести чітку ідентифікацію відповідальних елементів і не є залежним від змін геометрії та граничних умов розрахункових схем, а також дає можливість враховувати, на відміну від існуючих алгоритмів, всі можливі розрахункові сполучення навантажень (РСН), включаючи й аварійні.

3. Отримано температурні поля для пілонів і колон перерізами 400×800 мм, 400×700 мм, 400×600 мм, а також для плити перекриття системи «Монофант» для стандартного режиму пожежі, що дозволяє сформулювати і задати додаткові температурні зусилля та врахувати локальне зниження фізико-механічних властивостей матеріалів.

4. Проведено верифікацію запропонованого алгоритму виявлення відповідального елемента будівлі на прикладі монолітності безригельної залізобетонної будівлі ЖК «Америка» у Львові. Складено 15 сценаріїв надзвичайного впливу пожежі та виявлено відповідно до енергетичних критеріїв найбільш небезпечний сценарій для всієї споруди в цілому.

Список використаних джерел

1. Mehrdad S., Serkan S. Gravity load redistribution and progressive collapse resistance of 20-storey reinforced concrete structure following loss of interior column. *ACI Structural Journal*. 2010. Vol. 107. № 6. P. 636-644.
2. Coronelli D. Grid model for flat-slab structures. *ACI Structural Journal*. 2010. Vol. 107. № 6. P. 645-653.
3. Bonelli P., Tobar R., Leiva G. Experimental study on failure of reinforced concrete building. *ACI Structural Journal*. 1999. Vol. 96. № 1. P. 3-8.
4. Maxia D., Porcu A., Porcu R., Tattoni S. Structural Behavior of Reinforced Pre-Compressed Concrete. Structures in Fire: Proceedings of the Sixth International Conference. Lancaster: Destech Publications, Inc., 2010. P. 294-300.
5. LIRA LAND: Розрахунок та проектування конструкцій. URL: <http://www.liraland.ua/>.
6. Практичний розрахунок елементів залізобетонних конструкцій за ДБН В.2.6-98:2009 в порівнянні з розрахунками за СНиП 2.03.01-84* і EN 1992-1-1 (Eurocode 2): довідк.-навч. посіб. / В. Н. Бабаєв, А. М. Бамбура, В. С. Шмуклер та ін.; за заг. ред. В. С. Шмуклера. Харків: Золоті сторінки, 2015. 240 с.
7. Gaponova L., Grebenchuk S., Kalmykov O., Reznik P. Study of fire-resistance of reinforced concrete slab of a new type. *MATEC Web Conf*. Vol. 116, p02018. URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/30/mateconf_tr2017_02018/mateconf_tr2017_02018.
8. Демчина Б. Г. Вогнестійкість одно- і багатошарових просторових конструкцій житлових та громадських будівель: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. Харків, 2003. 302 с.
9. Ройтман В. М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых здани. Москва: Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. 382 с.
10. Mohammad H., Shmukler V., Reznik P., Petrova O. On the criterion of the Limit State for Concrete. Proc. of the 12th fib International PhD Symposium in Civil Engineering (29 to 31 Aug. 2018. Czech Technical University in Prague). Prague, 2018. P. 593-599.
11. Фомин С. Л., Наджафи Рухоллах. Огнестойкость монолитных каркасных зданий с учетом пространственной работы. *Науковий вісник будівництва*. Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2007. Вип. 42. С. 159-164.

Резнік Петро Аркадійович, канд. техн. наук, старш. викладач кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0003-3937-6833. E-mail: engipr@gmail.com.

Шмуклер Валерій Самуїлович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-8670-0731. Тел. (057) 707 33 77. E-mail: bk@kname.edu.ua.

Мохамад Альмохамад, аспірант кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-3715-7437. E-mail: engipr@gmail.com.

Petro Reznik, PhD (Tech), senior lecturer, Building Structures department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0003-3937-6833. E-mail: engipr@gmail.com.

Valerii Shmukler, D. Sc. (Tech.), Professor, Head of the Building Structures department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0002-8670-0731. E-mail: bk@kname.edu.ua.

Mohamd Almohamad, postgraduate student, Building Structures department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0002-3715-7437. E-mail: engipr@gmail.com.

Статтю прийнято 15.09.2020 р.

УДК 624.012.35:620.173/174

ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО РЕСУРСУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ І КОНСТРУКЦІЙ

Старш. викл. О. В. Ромашко-Майструк

BASICS OF ENERGY RESOURCE MODELING OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS AND STRUCTURES

Sr. Lecturer O. V. Romashko-Maistruk

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.191.2020.217292>

***Анотація.** Завдяки критичному аналізу існуючих на сьогодні моделей деформування залізобетонних елементів і конструкцій розроблено найважливіші положення моделі, яка могла б претендувати на роль узагальненої. В її основу покладено деформаційно-силову модель опору залізобетону силовим впливам та гіпотезу незмінності в одиниці об'єму і незалежності від режиму завантаження потенціальної енергії деформування залізобетонного елемента. Водночас цю гіпотезу подано як енергетичний критерій вичерпання несучої здатності залізобетонних елементів за дії навантажень будь-якої тривалості, що дозволяє розраховувати загальний та залишковий ресурси зазначених елементів за їх тривалої експлуатації.*

***Ключові слова:** залізобетонні елементи, деформування, діаграми стану, енергетична модель, загальний та залишковий ресурси.*

***Abstract.** Thanks to a critical analysis of the currently known force and deformation models of reinforced concrete elements and structures deformation, the most important model provisions have been developed, which could claim to be a generalized one. It is proposed to base it on the deformation-force model of reinforced concrete to force effects resistance and the hypothesis of invariability in a unit volume and independence from the loading mode of the potential energy of a reinforced concrete element deformation. At the same time, the indicated hypothesis is accepted as an energy criterion for the reinforced concrete elements bearing strength exhaustion, which makes it possible to calculate the total and residual resources of these elements during their long-term operation.*

The main deformation and power parameters of the element state are interconnected not only by rigidity, but also by the potential energy spent on the reinforced concrete element deformation in its unit volume. The direct connection of the potential energy of a reinforced concrete element deformation with the generalized diagram parameters of its state is determined. Therefore, instead of deterministic and variational methods for calculating the reinforced concrete elements resource, a direct calculation of their energy resource is proposed based on such deformation characteristics as deflection or the step and width of normal cracks opening. Based on the flat sections hypothesis, these characteristics are related to the element curvature. The proposed model and calculation method also take into account the entire array of field studies results on the totality of visually identified defects and damages and the established strength materials characteristics.

Calculated dependencies for determining the potential energy of a reinforced concrete element at any stage of its deformation are given. For one of the reinforced concrete beams, a theoretical prediction of long-term crack opening was performed and its results were compared with the experimental studies results.

***Keywords:** reinforced concrete elements, deformations, state diagrams, energy model, total and residual resources.*

Вступ. Відтворення реального напружено-деформованого стану залізобетонних елементів і конструкцій на будь-якій стадії їх деформування завжди було одним із ключових завдань теорії залізобетону. Його виконання значною мірою пов'язувалося з розробленням або створенням деякої загальної моделі деформування залізобетонних елементів. Тому така модель мусила б:

- базуватись на загальних припущеннях, гіпотезах і передумовах механіки деформованого твердого тіла;
- бути наділеною чіткими критеріями настання граничних станів залізобетонних елементів і конструкцій за реальних умов їх експлуатації;
- сприяти розкриттю внутрішньої статичної невизначеності поперечного перерізу залізобетонних елементів та забезпечувати методологічну єдність усіх розрахунків за граничними станами;
- реалізовуватися за допомогою як програмних (переважно числових), так і інженерних (безпрограмних) методів розрахунку;
- бути максимально або повністю позбавленою впливу різних емпіричних залежностей, параметрів та коефіцієнтів;
- сприяти встановленню як загального, так і залишкового ресурсів залізобетонних елементів і конструкцій за їх тривалої експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що виконання більшості з вищезгаданих вимог в так званих «силових» моделях [1-3] було просто неможливим через використання ідеалізованої прямокутної епюри напружень як у стиснутому, так і розтягнутому бетоні.

В «деформаційних» моделях [4-8] методологічну єдність усіх розрахунків залізобетонних елементів і конструкцій за граничними станами загалом можна забезпечити за допомогою повних діаграм деформування бетону $\sigma_c - \varepsilon_c$. Однак при їх інтегруванні чи навіть за використання спрощених форм цих діаграм [7, 8]

внутрішню статичну невизначеність поперечного перерізу залізобетонних елементів доводиться розкривати шляхом численних ітерацій за допомогою програмних методів і комплексів з залученням цілої низки емпіричних параметрів і коефіцієнтів.

Найближчою до узагальненої моделі деформування залізобетонних елементів на сьогодні можна вважати деформаційно-силову модель [9]. Вона обґрунтовує, чому за допомогою лише самих діаграм стану бетону $\sigma_c - \varepsilon_c$, нехай навіть найповніших [10], узагальнену модель деформування залізобетонних елементів побудувати неможливо. Тому визначальне місце в деформаційно-силовій моделі займають не діаграми деформування бетону $\sigma_c - \varepsilon_c$, а діаграми стану залізобетонного елемента $M - 1/r$, що характеризують його жорсткість. Саме в цьому і полягає її основна відмінність від деформаційних моделей. Однак і деформаційно-силова модель потребує подальшого розвитку, особливо в питаннях оцінювання дійсного технічного стану залізобетонних елементів і конструкцій та розрахунку їх залишкового ресурсу.

Мета та завдання досліджень. Тому дані дослідження спрямовано, перш за все, на подальше вдосконалення деформаційно-силової моделі опору залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам в питаннях розрахунку їх загального та прогнозування залишкового ресурсів.

Основна частина досліджень. Загалом відомо, що в деформаційно-силовій моделі основні деформаційні та силові параметри стану елемента пов'язуються між собою за допомогою жорсткості $D = M / (1/r)$ [9, 11]. Але згадані параметри можна поєднати між собою і за допомогою іншої характеристики – потенціальної енергії, витраченої на деформування залізобетонного елемента в його одиничному об'ємі $W = M \cdot (1/r)$ [12]. За таких обставин методику розрахунку

загального ресурсу залізобетонних елементів можна будувати за допомогою тих самих параметрів натурних досліджень, що не опосередковано, а безпосередньо характеризують їх жорсткість.

Зазвичай залишковий ресурс залізобетонних елементів розраховують детермінованими або варіаційними методами [13-16] згідно з результатами натурних досліджень за сукупністю візуально виявлених дефектів і пошкоджень та встановлених міцнісних характеристик матеріалів. Будь-які ж деформаційні параметри самих елементів до уваги взагалі не беруться.

Однак саме прогини f або крок s_r і ширина розкриття w_k тріщин, значення яких можна виміряти безпосередньо при обстеженні будь-якими інструментальними способами (геодезичними, фотограмметричними, стереофотограмметричними тощо), дозволяють доволі просто визначити один із загальних деформаційних параметрів залізобетонного елемента чи конструкції –

їх кривину. Зокрема, використовуючи гіпотезу плоских перерізів, можна досить легко розрахувати осереднену кривину згинального елемента $1/r$ на будь-якій стадії його деформування за вимірним кроком s_r та шириною розкриття w_k нормальних тріщин [17]

$$1/r = (\varepsilon_{c,m} + w_k / s_r + \varepsilon_{ctu,m}) / d, \quad (1)$$

де $\varepsilon_{c,m}$ та $\varepsilon_{ctu,m}$ – середні значення поточних деформацій стиснутого та граничних деформацій розтягнутого бетону [18, 19] відповідно;

d – робоча висота перерізу елемента.

Загалом фактичний ресурс згинального залізобетонного елемента за короткочасної дії повного навантаження визначається потенціальною енергією деформування, витраченою на його руйнування (рис. 1):

$$W_{uf} = \int_0^{1/r_{uf}} M d(1/r) = \int_0^{1/r_{uf}} \left[\left(D_o \cdot (1/r) - \frac{M_{uf}}{(1/r_{uf})^2} \cdot (1/r)^2 \right) / \left(1 + (K-2) \frac{(1/r)}{(1/r_{uf})} \right) \right] d(1/r) =$$

$$= \frac{M_{uf} \cdot (1/r_{uf})}{(K-2)} \left[-\frac{1}{2} + \frac{(K-1)^2}{(K-2)} - \left(\frac{K-1}{K-2} \right)^2 \ln(K-1) \right], \quad (2)$$

де осереднена кривина елемента $1/r$ та внутрішні зусилля M пов'язані між собою діаграмою його стану [18]

$$M = \frac{D_o \cdot 1/r - M_{uf} \cdot ((1/r)/(1/r_{uf}))^2}{1 + (D_o / M_{uf} - 2/(1/r_{uf})) \cdot (1/r)} \quad (3)$$

зі значеннями повної початкової жорсткості залізобетонного елемента D_o та характеристикою його граничної деформативності $K = D_o \cdot (1/r)_{uf} / M_{uf}$.

Несучу здатність M_{uf} та граничну кривину $1/r_{uf}$ залізобетонного елемента за

короткочасної дії повного навантаження рекомендується розраховувати згідно з основними положеннями механіки деформованого твердого тіла за системою найпростіших загальноновизнаних статичних, геометричних і фізичних співвідношень, що доповнюється в деформаційно-силовій моделі [18] аналітичною залежністю діаграми стану елемента « $M - (1/r)$ » (3) та функцією граничних деформацій стиснутого бетону ε_{cu} , отриманою з допомогою екстремального критерію Ферма $dM / d(1/r) = 0$.

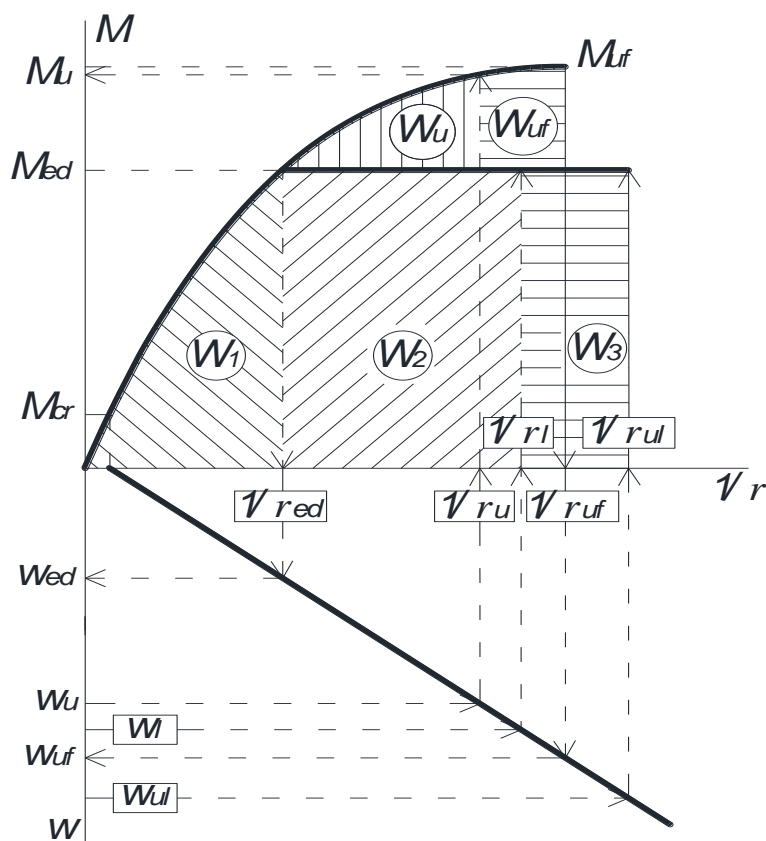


Рис. 1. До розрахунку загального та залишкового ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій

Однак при проектуванні залізобетонних елементів і конструкцій мова доволі часто іде не про фактичний, а про розрахунковий граничний стан. Він може наставати задовго до повного фізичного руйнування залізобетонних елементів через надмірний розвиток прогинів f_u або надмірну ширину розкриття нормальних тріщин w_u (рис. 1), що характерно для випадку текучості арматури. За таких

обставин значення граничної розрахункової кривини згинального залізобетонного елемента і розрахункової несучої здатності M_u в граничній стадії деформування теж слід обчислювати за формулами (1) і (3).

Тоді розрахунковий ресурс згинального залізобетонного елемента за короткочасної дії повного навантаження (рис. 1) слід розраховувати згідно з формулою (2) за таким виразом:

$$\begin{aligned}
 W_u &= \int_0^{1/r_u} M d(1/r) = \int_0^{1/r_u} \left[\left(D_o \cdot (1/r) - \frac{M_{uf}}{(1/r_{uf})^2} \cdot (1/r)^2 \right) / \left(1 + (K-2) \frac{(1/r)}{(1/r_{uf})} \right) \right] d(1/r) = \\
 &= \frac{M_{uf}}{(K-2)} \left[-\frac{(1/r_u)^2}{2 \cdot (1/r_{uf})} + \frac{(1/r_u) \cdot (K-1)^2}{(K-2)} - (1/r_{uf}) \cdot \left(\frac{K-1}{K-2} \right)^2 \ln \left(1 + (K-2) \frac{1/r_u}{1/r_{uf}} \right) \right]. \quad (4)
 \end{aligned}$$

При прогнозуванні залишкового енергетичного ресурсу осереднену кривину згинального елемента від короткочасної дії

експлуатаційного моменту M_{ed} визначають згідно з діаграмою стану (3) за формулою

$$\frac{1}{r_{ed}} = \frac{1/r_{uf}}{2M_{uf}} \left[\left(1 - \frac{M_{ed}}{M_{uf}}\right) \frac{D_o}{r_{uf}} + 2M_{ed} - \sqrt{\left(\left(1 - \frac{M_{ed}}{M_{uf}}\right) \frac{D_o}{r_{uf}} + 2M_{ed}\right)^2 - 4M_{ed} \cdot M_{uf}} \right], \quad (5)$$

а відповідну їй потенціальну енергію деформування W_1 – шляхом інтегрування виразу (4) в межах від 0 до $1/r_{ed}$.

Приріст потенціальної енергії деформування елемента за тривалої дії експлуатаційного навантаження (рис. 1) можна обчислити за формулою

$$W_2 = M_{ed} \cdot (1/r_l - 1/r_{ed}) \quad (6)$$

за відповідної кривини елемента $1/r_l$, ширини розкриття нормальних тріщин w_l і середніх деформацій стиснутого бетону $\varepsilon_{cl,m}$

$$1/r_l = (\varepsilon_{cl,m} + w_l / s_r + \varepsilon_{ctu,m}) / d, \quad (7)$$

$$\varepsilon_{cl,m} = \varepsilon_{c,m} \cdot (1 + \varphi(t, t_0)), \quad (8)$$

де $\varphi(t, t_0)$ – значення коефіцієнта повзучості стиснутого бетону при дії зовнішнього навантаження тривалістю $(t - t_0)$ [7, 19].

Беручи до уваги вищенаведені вирази (2)–(6), розрахункове значення залишкового енергетичного ресурсу залізобетонного елемента (рис. 1) можна розрахувати за формулою

$$W_3 = W_u - W_1 - W_2 = \frac{M_{uf} \cdot (1/r_{uf})}{(K-2)} \left[-\frac{1}{2} + \frac{(K-1)^2}{(K-2)} - \left(\frac{K-1}{K-2}\right)^2 \ln(K-1) \right] - \frac{M_{uf}}{(K-2)} \left[-\frac{(1/r_{ed})^2}{2 \cdot (1/r_{uf})} + \frac{(1/r_{ed}) \cdot (K-1)^2}{(K-2)} - (1/r_{uf}) \cdot \left(\frac{K-1}{K-2}\right)^2 \ln\left(1 + (K-2) \frac{1/r_{ed}}{1/r_{uf}}\right) \right] - M_{ed} \cdot (1/r_l - 1/r_{ed}). \quad (9)$$

Тоді граничні значення осередненої кривини залізобетонного елемента $1/r_{ul}$ та ширини розкриття нормальних тріщин w_{ul} можна знайти за виразами

$$1/r_{ul} = W_3 / M_{ed} + 1/r_l, \quad (10)$$

$$w_{ul} = (d / r_{ul} - \varepsilon_{clu,m} - \varepsilon_{ctu,m}) \cdot s_r, \quad (11)$$

спрогнозувавши середні деформації стиснутого бетону $\varepsilon_{clu,m}$ за формулою (8) при граничному значенні коефіцієнта повзучості бетону $\varphi(\infty, t_0)$ [7, 19].

Подібне теоретичне прогнозування тривалого розкриття тріщин виконано для однієї з балок, випробуваних R. I. Gilbert [20]. Воно відображено на рис. 2.

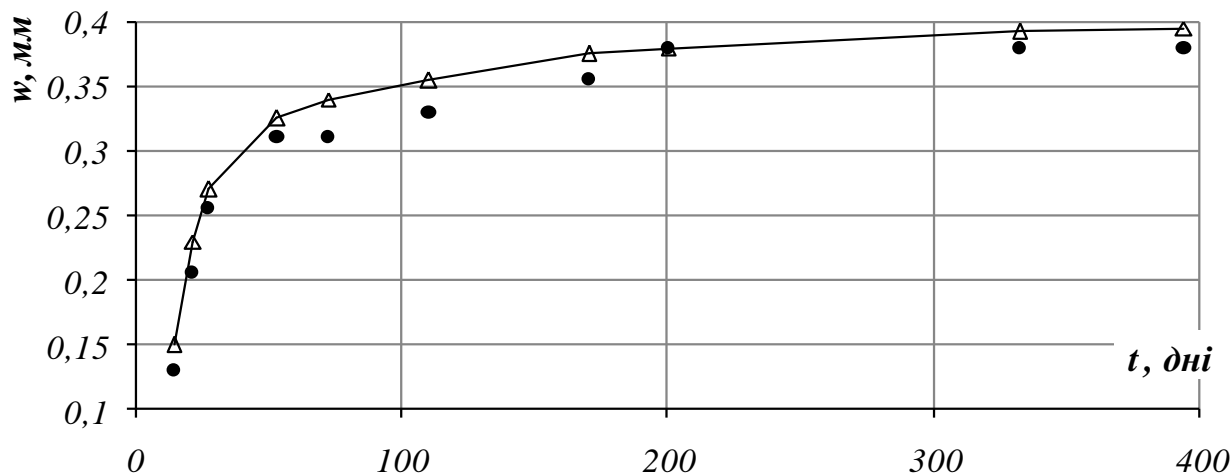


Рис. 2. Порівняння експериментальних (●) та теоретичних (Δ) значень ширини тривалого розкриття нормальних тріщин в залізобетонній балці В2-а [20]

Висновки. Таким чином, в основу наведеної енергетичної моделі деформування залізобетонних елементів і конструкцій пропонується покласти одну з визначальних гіпотез – незмінності в одиниці об'єму та незалежності від режиму завантаження потенціальної енергії деформування залізобетонного елемента,

витраченої на його руйнування $W_{uf} = const$.

Водночас цю гіпотезу можна розглядати як енергетичний критерій не тільки загального, але й залишкового ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій після їх тривалої експлуатації та використовувати при розробленні відповідних методик розрахунку.

Список використаних джерел

1. Проектирование железобетонных конструкций: справоч. пособ. / А. Б. Голышев и др.; под ред. А. Б. Голышева. Киев: Будивельник, 1985. 496 с.
2. Расчет железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформациям / А. С. Залесов, Э. Н. Кодыш, Л. Л. Лемыш и др. Москва: Стройиздат, 1988. 320 с.
3. Боровских А. В. Расчеты железобетонных конструкций по предельным состояниям и предельному равновесию: учеб. пособ. Москва: Изд-во АСВ, 2004. 320 с.
4. Карпенко Н. И., Мухамедиев Т. А., Сапожников М. А. К построению методики расчёта стержневых элементов на основе диаграмм деформирования материалов. *Совершенствование методов расчёта статически неопределимых железобетонных конструкций*. Москва: НИИЖБ, 1987. С. 4-24.
5. Attard M. M., Setunge S. Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete. *ACI Materials Journal*. 1996. Vol. 93. No. 5. P. 432-442.
6. Бамбура А. М. Експериментальні основи прикладної деформаційної теорії залізобетону: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / НДІБК. Київ, 2005. 379 с.
7. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. [Final Draft, December, 2004]. Brussels: CEN, 2004. 225 p.
8. Дорофеев В. С., Барданов В. Ю. Расчет изгибаемых элементов с учетом полной диаграммы деформирования бетона: монография. Одесса: ОГАСА, 2003. 210 с.

9. Romashko V., Romashko O. The construction features of the deformation and force model of concrete and reinforced concrete resistance. *MATEC Web of Conf.* 2017. Vol. 116. 02028.
10. Ромашко В. М. Деякі особливості діаграми деформування бетону. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць*. Рівне, 2006. Вип. 14. С. 294-301.
11. Ромашко В. М. Жорсткість та модуль деформацій бетону в деформаційній моделі. *Бетон и железобетон в Украине*. 2007. № 6. С. 2-6.
12. Romashko V. M., Romashko O. V. Energy resource of reinforced concrete elements and structures for the deformation-force model of their deformation. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019. Vol. 708. No. 1. 012068.
13. Самолинов Н. А. Использование неразрушающих методов контроля прочности конструкций при определении остаточного ресурса зданий и сооружений. *Сейсмостойкое строительство, безопасность сооружений*. 2002. № 3. С. 8–10.
14. Шматков С. Б. Расчёт остаточного ресурса строительных конструкций зданий и сооружений. *Вестник ЮУрГУ: Строительство и архитектура*. 2007. Вып. 5. № 22. С. 56-57.
15. Сушев С. П., Самолинов Н. А., Адаменко И. А. Остаточный ресурс конструкций (сооружений) и возможные методы его оценки. *Предотвращение аварий зданий и сооружений: сб. науч. трудов*. Москва, 2009. Вып. 8. С. 320-327.
16. Беляев С. М. Расчет остаточного ресурса зданий с учетом запаса несущей способности конструкций. *Вестник СГАСУ: Град-ство и арх-ра*. 2013. № 3(11). С. 22-25.
17. Ромашко В. М., Ромашко О. В. Розрахунок тріщиностійкості залізобетонних елементів з урахуванням рівнів утворення нормальних тріщин. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. Харків: УкрДУЗТ, 2018. Вип. 181. С. 58-65.
18. Ромашко В. М. Деформаційно-силова модель опору бетону і залізобетону: монографія. Рівне: О. Зень, 2016. 424 с.
19. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. [Чин. від 01.06.11]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с.
20. Gilbert R. I., Nejadi S. An Experimental Study of Flexural Cracking in Reinforced Concrete Members under Sustained Loads: UNICIV Report № R-435, School of Civil and Environmental Engineering. Sydney: University of New South Wales, 2004. 59 p.

Ромашко-Майстрок Олена Василівна, старш. викладач кафедри основ архітектурного проектування, конструювання і графіки Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне). ORCID iD: 0000-0003-3353-2268. Тел.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Romashko-Maistruk Olena Vasylivna, Senior Lecturer of Chair of Architectural Designing Bases, Constructing and Graphics National University of Water Management and Nature Recourses Use (Rivne). ORCID iD: 0000-0003-3353-2268. Tel.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Статтю прийнято 17.09.2020 р.

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

УДК 629.424.1

СИСТЕМИ ГЛОБАЛЬНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ В ТЯГОВИХ РОЗРАХУНКАХ З РОЗРАХУВАННЯМ ЗНОСУ КОЛІСНИХ ПАР РУХОМОГО СКЛАДУ

Асп. М. А. Барибін, д-р техн. наук А. П. Фалендиш,
кандидати техн. наук В. О. Гатченко, О. В. Клецька, асист. О. В. Кіріцева

GLOBAL POSITIONING SYSTEMS IN TRACTION CALCULATIONS WITH CALCULATION OF WHEELSET WEAR OF ROLLING STOCK

Postgraduate student M. A. Barybin, D. Sc. (Tech.) A. P. Falendysh,
PhD (Tech.) V. O. Hatchenko, PhD (Tech.) O. V. Kletska, assistant E. V. Kiritseva

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.191.2020.217294>

Анотація. У статті розглянуті питання встановлення впливу різних видів складових основного й додаткового опору, визначена необхідність отримання інформації з систем глобального позиціонування GPS/ГЛОНАСС поїзних локомотивів та її використання в тягових розрахунках, встановлена величина зносу деталей і вузлів екіпажної частини. Визначено рівняння основного опору заданого об'єкта дослідження на базі закону збереження механічної енергії та порівняльної технічної характеристики систем навігації.

Ключові слова: GPS/ГЛОНАСС, тягові розрахунки, екіпажна частина, математичне моделювання, локомотив.

Abstract. The article deals with global positioning systems integrated on VL11 locomotives. The scheme of operation and comparative characteristics of the accuracy of information from GPS and GLONASS systems are given. Expressions of the main resistance components of the friction forces in rolling stock bearings, rolling friction of wheels on rails, resistance forces on track irregularities, air resistance forces and sliding friction forces of wheels on rails are established. Expressions of components of additional resistance are established: resistance forces from bows, curves, resistance when starting from a place, from low temperatures and wind. The speed dependence is constructed using the specified formulas for the specified calculation parameters. The paper uses the law of conservation of mechanical energy, as the main factor takes into account all the effects on the rolling stock, the movement of the train. Shown graphically with a high-speed graph of the tracking section of the considered stage. Based on the law of conservation of mechanical energy, the real value of the main drag forces of cars on the Shebelinka-Zanki tracking section is established, the possibility of obtaining in real time is proved, and it is proposed to use it to optimize the consumption of fuel and energy resources for train traction. The paper considers the issues of establishing the actual technical parameters of the rolling stock crew by approximating (linearization) the curve of theoretical smallpox resistance to the real one. An algorithm for searching for technical parameters of the crew part is proposed. The statement about the need to introduce mathematical modeling methods in the locomotive economy in order to establish rational traction costs, search for optimal operating modes and mass practical testing.

Keywords: GPS / GLONASS, traction calculations, crew part, mathematical modeling, locomotive.

Вступ. Розвиток систем глобального позиціонування транспортних засобів набув широкого розповсюдження у світі. Завдяки йому можливо вчасно отримати інформацію про переміщення та місцезнаходження об'єктів у просторі. Залізничний транспорт України є стратегічно важливим для функціонування економіки та соціальної інфраструктури, тому впровадження в локомотивне господарство систем GPS/ГЛОНАСС призвело до інформативності місця розташування тягових основних фондів на моніторах диспетчерських та інших служб. Підвищення точності визначення основних параметрів руху, збільшення можливостей обробки електронно-обчислювальної техніки та автоматизованих систем, а також пропускну спроможності каналів передачі інформації дають можливість обробки та аналізу отриманих даних. Створення на їх базі комплексів відстеження зносу основних фондів у реальному режимі часу дозволить зменшити витрати на експлуатацію рухомого складу, встановити оптимальні міжремонтні періоди та вагові норми, а також оптимізувати кошторис паливно-енергетичних ресурсів і їх баланс в загальній системі Укрзалізниці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системний аналіз тягових розрахунків ведеться протягом існування залізничного транспорту. Точність отриманих результатів впливає на витрати ресурсів на тягу і, як наслідок, здешевлення вартості перевезень. Визначення раціональних вагових норм є основою для підвищення провізної спроможності залізниць і зменшення коштів на ремонт рухомого складу. Не дивно, що безліч фахівців присвятили свої роботи окресленому напрямку науки. Серед цих робіт слід відмітити праці С. І. Осипова [2], в яких сформовані основні методи для визначення сил, що діють на поїзд. Наукові праці [3, 5] дають картину впливу регіону експлуатації на динамічні та ремонтні характеристики рухомого складу під час експлуатації

протягом всього життєвого циклу. Становлення інформаційних систем і розвиток їх в локомотивному господарстві широко описані в праці [6]. Розвиток науково-технічного прогресу підвищує точність та об'єм інформації в процесі руху поїзда. Статті [1, 11] розкривають вплив факторів на рівняння руху та висувають вимоги до діагностичного обладнання. У статті [8] широко описана необхідність збільшення об'єму інформації та ітерацій обчислень для підвищення точності результату. У праці [13] описується застосування методів передачі даних великих об'ємів і втрати при пересиланні, що є важливим для GSM/GPRS систем та нівелює втрати одиничних сигналів у загальному потоці. Робота обладнання швидкостеміра ЗСЛ-2М [12] має досить велику похибку (2,5 %) швидкості в процесі експлуатації та потребує постійного догляду з боку ремонтного персоналу в той час, як системи глобального позиціонування при розрахунковій швидкості руху в 47,1 км/год електровоза ВЛ11 при розрахунку за даними [1, 7] складуть 0,8 %. Встановлення на локомотив блоків глобального позиціонування GPS/ГЛОНАСС вимагає оцінювання їх ефективності реєстрації і принципу дії. В загальному вигляді інформація наведена в роботах [4, 7]. Оскільки похибка супутникових систем є меншою [4, 7] порівняно з ЗСЛ-2М [12], тому доцільно проводити оцінювання впливу опору рухомого складу на основі інформації GPS/ГЛОНАСС [6].

У процесі експлуатації елементи екіпажної частини внаслідок взаємодії між собою зношуються, що характеризує якість функціонування рухомого складу [3, 5] та витрати ресурсів [9]. Тому виникає потреба знайти величину зміни зносу колісних пар та оцінити їх вплив на тягу поїздів. У статті [9] подано програмний продукт для визначення паливно-енергетичних ресурсів, але він використовує дані [2, 10]. З метою встановлення сил опору руху реального поїзда виникає потреба визначити їх в

режимі реального часу. Це можливо лише при використанні виразу, який може враховувати всі фактори впливу на рухомий склад, закону збереження механічної енергії. Тому вирішенням даної проблеми є розроблення на базі закону збереження механічної енергії з використанням даних блоків GPS/ГЛОНАСС рівняння опору руху та визначення зношеності основних вузлів екіпажної частини.

Визначення мети і завдань дослідження. Метою роботи є визначення сил основного опору руху вагонів з розрахуванням зносу основних елементів екіпажної частини. Для її досягнення необхідно вирішити такі завдання. Привести вирази для обчислень основного та додаткового опору руху з відображенням зміни параметрів залежно від швидкості. Використовуючи закон збереження механічної енергії, встановити вплив сил на поїзд. Проаналізувати систему функціонування глобального позиціонування GPS/ГЛОНАСС локомотивів ВЛ11 і розробити порівняльну характеристику. Визначити точність даних у розрахунках і методику наближення кривої «ідеального поїзда» до реального. Графічно відобразити ділянку трекінгу.

Основна частина дослідження. Розв'язання рівняння руху поїзда в умовах конкурентної боротьби залізниць за потоки

вантажів базується на економічній раціоналізації витрат ресурсів на тягу, наслідком якої є здешевлення вартості перевезень, а також зменшення трудомісткості і собівартості ремонтного процесу. Розроблення методів зниження паливно-енергетичних витрат як основна складова собівартості транспортування та відстеження зносу деталей з метою встановлення оптимальних міжремонтних періодів базується на аналізі результуючої суми сил, що діють на поїзд. При цьому їх можливо розділити на керовані, якими може керувати машиніст (гальмівні та сили тяги), та некеровані (сили опору руху). Робота тягового рухомого складу направлена у своїй більшості на подолання суми сил опору руху локомотива та складу. За умовами експлуатації вони поділяються на основні (які діють постійно) та додаткові (виникають в результаті дії профілю шляху чи особливостей роботи рухомого складу). Результуюче значення питомого основного опору є сумою питомих сил [2, 14] тертя в підшипниках рухомого складу ($w_{ТП}$), тертя кочення коліс по рейках ($w_{ТК}$), опору на нерівності шляху ($w_{НШ}$), повітряного середовища ($w_{ПОВ}$) та питомих сил тертя ковзання коліс по рейках ($w_{ТКО}$), вирази яких мають такий вигляд:

$$w_{ТП} = 10^3 \frac{q_0 - q_{КП}}{q_0} \mu_K \frac{d_{Ш}}{D_K}, \quad (1)$$

$$w_{ТК} = 10^3 \frac{2\delta}{D_K}, \quad (2)$$

$$w_{НШ} = 15,72 \frac{\Delta^2 V^2}{D_K^2 l_P} + 125 \frac{10^3 q_0 g r a^2}{u^2}, \quad (3)$$

$$w_{ПОВ} = C_X F_R \frac{0.35 H_{\text{бар}} V^2}{2 g m_{PC} (t_{HB} + 273)}, \quad (4)$$

$$w_{ТКО} = 0,11 + 4\sigma^2 (0,044 + 0,00004 V^2) + 10^3 \mu_{КО} \frac{\Delta d_K}{D_K} + 500 \mu_{КО} t g \beta, \quad (5)$$

де q_0 – осьове навантаження рухомого складу, $q_0 = 21,75$ т;

$q_{КП}$ – маса колісної пари рухомого складу, $q_{КП} = 1,45$ т;

μ_K – коефіцієнт тертя буксових підшипників [2];

$d_{Ш}$ – діаметр шийки колісної пари рухомого складу, $d_{Ш} = 130$ мм;

D_K – діаметр колеса колісної пари рухомого складу, $D_K = 950$ мм;

δ – плече тертя кочення внаслідок пружного гістерезису колеса та рейки, $\delta = 0,17$ мм;

Δ – величини зазору в стику між рейками, $\Delta = 5$ мм;

V – швидкість рухомого складу, км/год;

l_p – довжина рейки, для перегону Шебелинка-Занки $l_p = 5000$ м;

g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81$ м/с²;

r – модуль тертя основи колії, для залізобетонних шпал $r = 260$ Н/см²;

a – коефіцієнт відносної жорсткості верхньої будови залізничного шляху, для розрахунку приймаємо $a = 0,01$ см⁻¹;

u – модуль пружності колії, для рейок Р60 $u = 3000$ Н/см²;

C_x – аеродинамічний коефіцієнт рухомого складу, для 4-вісних зерновозів (цементовозів і цистерн) $C_x = 0,23$;

F_R – площа найбільшого поперечного перерізу рухомого складу, для 4-вісних зерновозів $F_R = 13,3$ м²;

$H_{бар}$ – атмосферний тиск навколишнього середовища, $H_{бар} = 760$ мм рт. ст.;

m_{PC} – маса рухомого складу, $m_{PC} = 4q_0$ т;

$t_{НВ}$ – температура навколишнього середовища, $t_{НВ} = 20$ °С;

σ – величина розбігу колісної пари в залізничній колії, приймаємо $\sigma = 0,05$ м;

$\mu_{КО}$ – коефіцієнт тертя ковзання, $\mu_{КО} = 0,09 \dots 0,03$ [14];

Δd_K – нерівність діаметрів кругів кочення колісної пари, приймаємо $\Delta d_K = 0,1$ мм;

$tg\beta$ – похибка встановлення колісної пари в раму візка, приймаємо $tg\beta = 0,000625$.

Характеристики складових основного опору, розрахованих за формулами (1-5), наведені на рис. 1.

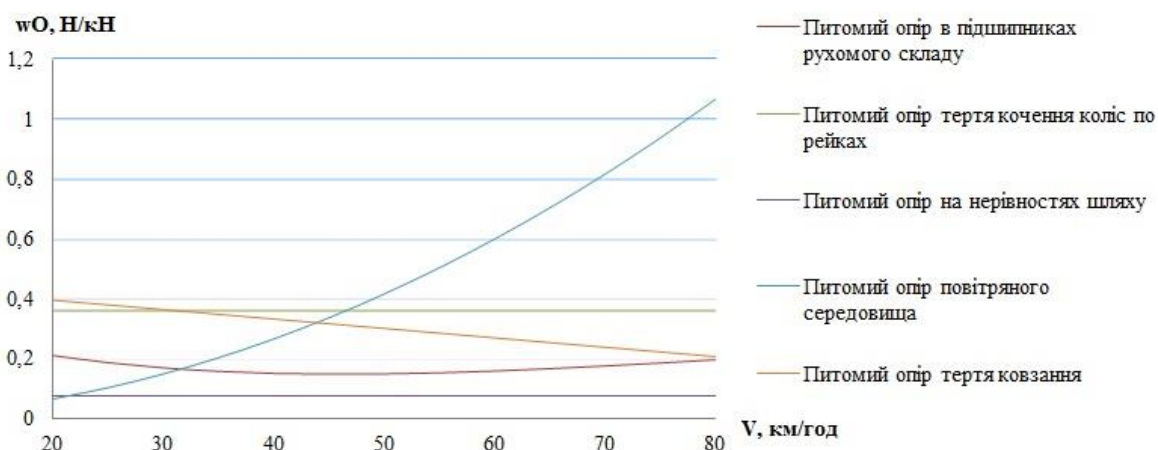


Рис. 1. Графічне відображення залежності питомих сил основного опору руху

Результуюче значення додаткового питомого опору є сумою питомих сил опору від уклонів (w_i) [2], кривих (w_r) [14], опору при рушанні з місця (w_{PM}) [2], низьких температур (w_{HT}) та вітру (w_B), вирази яких мають такий вигляд:

$$w_i = i, \quad (6)$$

$$w_r = \frac{200}{R} + 1,5 \left| \frac{V^2}{12,96R} - \frac{h}{S_K} g \right|, \quad (7)$$

$$w_{PM} = \frac{280}{q_0 + 70}, \quad (8)$$

$$w_{HT} = w_o (k_{HT} - 1), \quad (9)$$

$$w_B = w_o (k_B - 1), \quad (10)$$

де i – крутизна результуючого підйому, $i = 1 ‰$;

R – радіус кривої, $R = 800$ м;

h – різниця між висотами голівок рейок, $h = 60$ мм;

S_K – відстань між кругами кочення колісної пари рухомого складу, $S_K = 1600$ мм;

k_{HT} – коефіцієнт впливу низьких температур, при температурі -30 °С за даними [2];

k_B – коефіцієнт впливу повітряних мас (вітру), при швидкості вітру 6 м/с за даними [2].

Характеристики складових додаткового питомого опору, розрахованих за формулами (6-10), наведені на рис. 2.

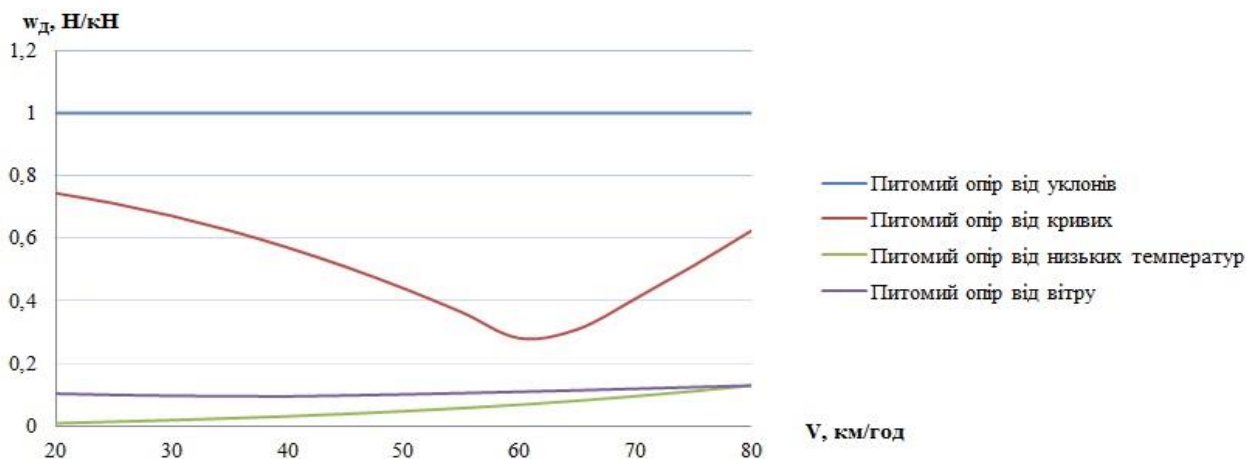


Рис. 2. Графічне відображення залежності питомих сил додаткового опору руху

Як видно з виразів (1-10), кількість складових в загальному рівнянні опору руху є досить великою, тому з метою можливості обчислень приймемо до розгляду тільки прямі дільниці перегонів та використаємо припущення, що рівняння опору локомотива нам відоме. Це рівняння можливо обчислити при прямуванні локомотива резервом чи при прямуванні з відомими значеннями вагонів. Математична обґрунтованість вказаного твердження

базується на малій кількості зчіпної маси поїзних локомотивів порівняно з вагою поїзда та виразом $P \cdot (P + Q)^{-1}$. Використаємо закон збереження механічної енергії для визначення характеру впливу результуючої суми сил в процесі переміщення поїзда у просторі:

$$E = \frac{mV_2^2}{2} - \frac{mV_1^2}{2} + mgh_2 - mgh_1, \quad (11)$$

де E – значення зміни механічної роботи, Дж;

V_1, V_2 – швидкість на початку та в кінці елемента профілю, км/год;

m – маса поїзда, кг;

h_1, h_2 – відповідно висоти на початку та в кінці елемента профілю, м.

Механічна робота, яку виконує поїзд, рухаючись по колії, має вигляд

$$E = F \cdot S, \quad (12)$$

де F – сила, що діє на рухомий склад, Н;

S – довжина ділянки переміщення, м.

Відповідно до 2-го закону Ньютона вираз для сили буде мати вигляд

$$F = m \cdot a, \quad (13)$$

де a – прискорення руху, м/с².

Згідно з роботою [2] прискорення руху має вираз

$$a = \xi \cdot (f_K - w - b_T), \quad (14)$$

де ξ – коефіцієнт питомого прискорення,

$$\xi = 0.00926 \frac{m/c^2}{H/kH} [2];$$

f_K – питома сила тяги, Н/кН;

w – питомі сили опору руху, Н/кН;

b_T – питомі гальмівні сили, Н/кН.

Підставимо формули (12)–(14) у вираз (11), тоді він буде мати вигляд

$$m \cdot \xi \cdot (f_K - w - b_T) \cdot S = \frac{mV_2^2}{2} - \frac{mV_1^2}{2} + mgh_2 - mgh_1. \quad (15)$$

Виконаємо перетворення та скорочення виразу (15) таким чином, щоб у лівій частині рівняння отримати питомі сили опору руху поїзда, а в правій – залишкові та кінетично-потенційний вплив, що виник у процесі переміщення рухомого складу. Тоді рівняння буде мати вигляд

$$w = f_K - b_T - \frac{V_2^2 - V_1^2 + g \cdot (h_2 - h_1)}{2\xi S}. \quad (16)$$

Розглянемо кінетично-потенційний вплив на базі науково-технічного прогресу супутникової навігації та встановлених на локомотиви серії ВЛ11 депо приписки ТЧ-9 Лозова та ТЧ-10 Харків-Сортувальний блоки позиціонування GPS/ГЛОНАСС. Загальний вигляд схеми роботи такої системи наведений на рис. 3. Порівняльна характеристика систем з параметрами необхідних даних, отриманих із праць [1, 4, 7, 16], для закону збереження механічної енергії подана в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняльна технічна характеристика систем навігації GPS/ГЛОНАСС

Параметр	СРНС ГЛОНАСС	GPS NAVSTAR
Похибка визначення місця розташування, м	1 «ЛУЧ»	16 (Р-код)
Похибка визначення швидкості руху, м/с	0,15	0,1
Похибка визначення часу	0,7 мкс	90 нс (Р-код)
Мінімальний період повторення запиту, мс	1	1 (С/А-код)
Надійність отриманих даних, %	99,7	95

Оскільки параметр «місце розташування» є дисперсією позиціонування рухомого складу у просторі, рух залізничного транспорту в загальному вигляді є поступальним, розрахункова швидкість ВЛ11 47,1 км/год та розрахунки програмного комплексу «Тягові розрахунки» мають практичний інтервал у 5 с, тоді похибка шляху складе $S \cong 1 м (glonass) \forall V = 47.1 км/год$. У свою чергу похибка швидкостеміра ЗСЛ-2М є

близькою до цього. Тому вважатимемо розрахунки на основі даних супутникової системи як ті, що входять до довірчого інтервалу. Результатом вказаного

$$\text{твердження є } \frac{V_2^2 - V_1^2 + g \cdot (h_2 - h_1)}{2\xi S} = const$$

на кожному розглянутому інтервалі часу. Місце відстеження параметрів (трекінг) та характеристика залежності швидкості від шляху наведені на рис. 3.

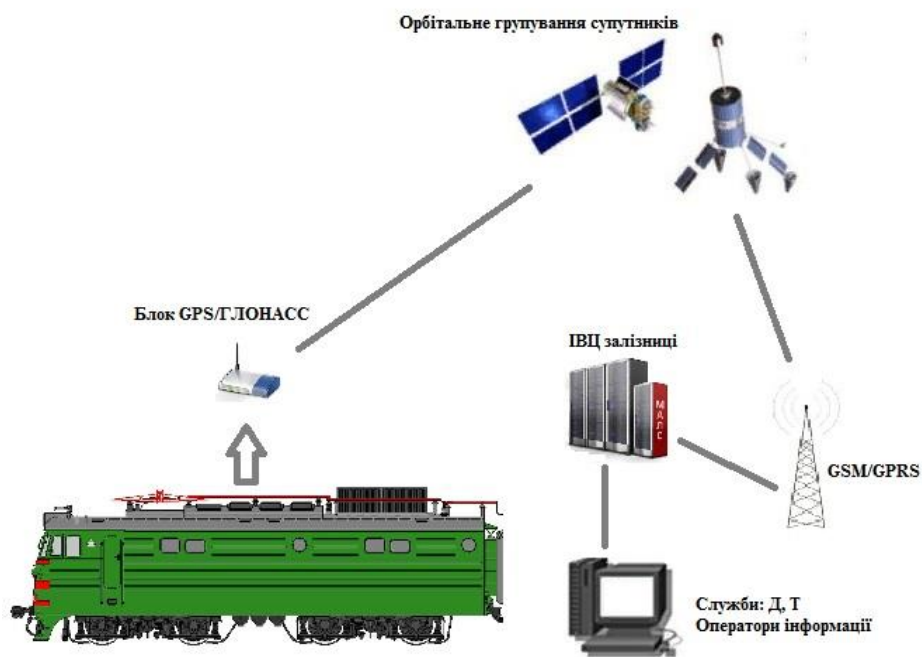


Рис. 3. Загальний вигляд схеми роботи системи супутникової навігації GPS/ГЛОНАСС

В результаті обчислень за формулою (16) та методом найменших квадратів [15] (для отримання рівняння третього порядку)

одержали вираз реального основного питомого опору вантажних вагонів поїзда:

$$\omega''_0 = 0,00000189V^3 - 0,0000V^2 + 0,0057573V + 0,9502723 \quad (17)$$

Отримані значення питомих сил основного та додаткового опору, наведених на рис. 1 та 2, зіставимо з реальними значеннями, перерахованими за формулою (17). Різниця результатів є впливом технічного стану, оскільки питомий

додатковий опір від низьких температур та вітру (згідно з даними метеорологічної служби температура складала 20 °С, а швидкість вітру – 0,7 м/с) не мав істотного впливу. $w_{пов}$ є умовно постійними протягом всього життєвого циклу рухомого

складу. Наступним етапом є наближення параметрів питомого тертя в підшипниках рухомого складу (w_{III}), тертя кочення коліс по рейках (w_{TK}) та опору на нерівності шляху (w_{HII}) за D_K , Δd_K , $tg\beta$, алгоритм виконання якого зображуємо на рис. 4 та здійснюємо за принципом виконання системи рівнянь:

$$\begin{cases} w_O''(V) - w_O^{*'}(D_K \pm \Delta D_K, V) \rightarrow \min \\ w_O''(V) - w_O^{*'}(\Delta d_K \pm \Delta(\Delta d_K), V) \rightarrow \min \\ w_O''(V) - w_O^{*'}(tg\beta \pm \Delta tg\beta, V) \rightarrow \min \end{cases}, \quad (18)$$

де $w_O''(V)$ – функція зміни реального опору, $H/кН$;

$w_O^{*'}(D_K \pm \Delta D_K, V)$ – функція зміни приросту від діаметра колеса, $H/кН$;

$w_O^{*'}(\Delta d_K \pm \Delta(\Delta d_K), V)$ – функція зміни приросту від нерівномірного зносу колеса, $H/кН$;

$w_O^{*'}(tg\beta \pm \Delta tg\beta, V)$ – функція зміни приросту від неперпендикулярності осі колісної пари візку рухомого складу, $H/кН$.

В результаті трекінгу та розрахунку на перегоні Шебелинка-Занки (рис. 5) встановлено залежність (17). Підставивши цю залежність у вираз загального питомого опору поїзда, було перетворено вираз (16) таким чином, щоб в лівій частині отримати питому силу тяги. Отримані значення питомої сили тяги були помножені на вираз $P + Q$. В результаті цього визначені реальні значення сил тяги локомотива. Зробивши аналіз отриманих розрахунків, було встановлено зниження сили тяги ВЛ11 на 5,7% порівняно з даними тягово-енергетичного паспорту на П-ПП позиції. Розглянутий основний питомий опір вагонів, який був отриманий за виразом (17), та наближена сума сил основного опору вагонів (1)–(5) згідно з системою рівнянь (18) і алгоритмом (рис. 4) дозволили визначити основні технічні характеристики колісних пар вагонів: середній діаметр колісної пари – 940 мм, нерівномірність зносу коліс – 1,5 мм.

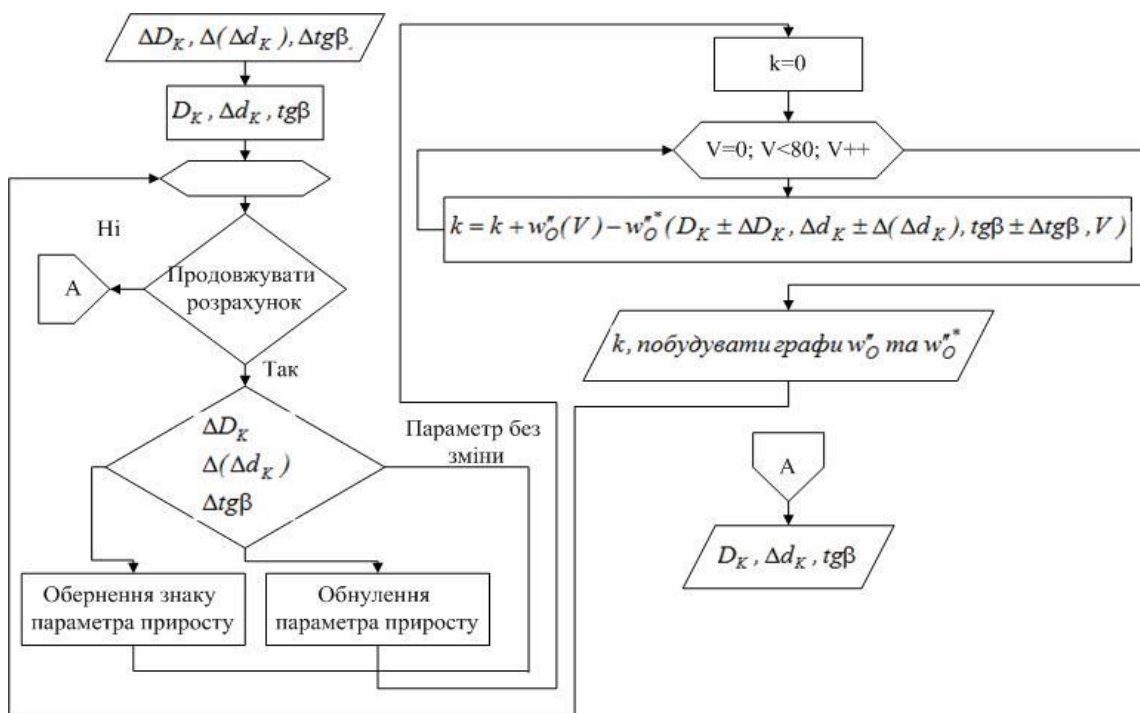


Рис. 4. Алгоритм наближення суми (1)–(5) питомих сил опору вагонів до реальної кривої сил основного опору при розв’язанні системи рівнянь (18)

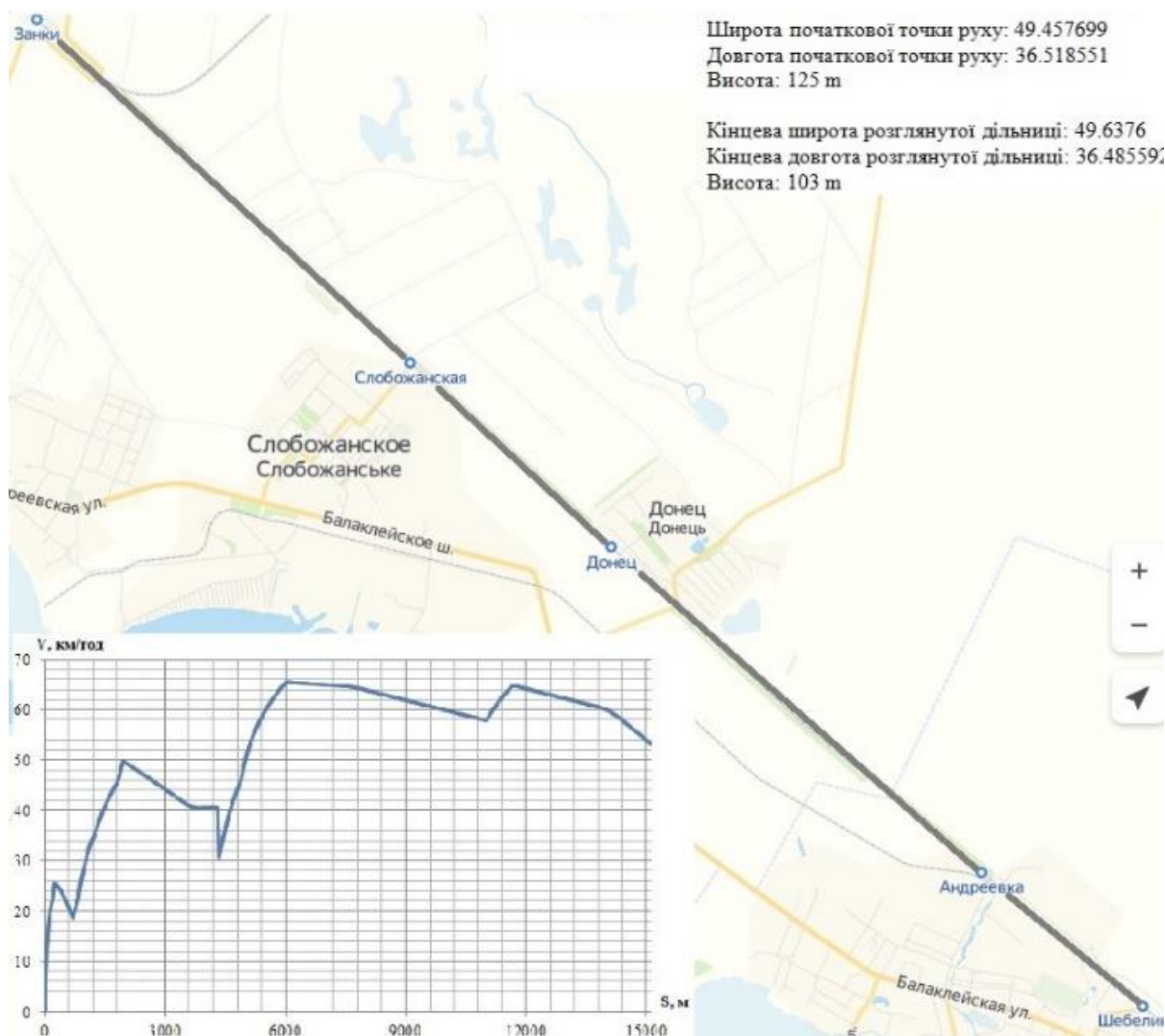


Рис. 5. Трекінг переміщення поїзда № 3608 з побудованою залежністю швидкості від шляху та координатами початку і кінця відстеження

Особливістю даної роботи є необхідність використання спеціаліста для коригування кривих. Однак отримані залежності можливо застосувати в програмному комплексі «Тягові розрахунки», встановивши оптимальні витрати паливно-енергетичних ресурсів на тягу поїздів.

Висновки. В результаті проведеної роботи встановлене реальне значення сил основного опору вагонів та доведена можливість отримання його в поточному режимі часу на основі інформації з систем глобального позиціонування, інтегрованих

на локомотиви ВЛ11. Основою для цього став закон збереження механічної енергії, двосторонній ефект якого дав можливість встановити зниження реальних значень сил тяги у вказаному діапазоні швидкостей на 5,7%. Вказані твердження можуть знайти відображення в оптимізації витрат палива на тягу поїздів. Розрахунки технічного стану, проведені в роботі, показали середній діаметр колісної пари в 940 мм, нерівномірність зносу коліс – 1,5 мм. Також вказані твердження можуть знайти відображення у визначенні оптимальних міжремонтних періодів для рухомого

складу. В подальшому доцільно на основі запропонованих алгоритмів та отриманих залежностей розробити і впровадити

програмне забезпечення в АРМ локомотивного господарства з метою встановлення раціональних витрат на тягу поїздів.

Список використаних джерел

1. Xingxing Li, Xiaohong Zhang, Xiaodong Ren, Mathias Fritsche, Jens Wickert, Harald Schuh. Precise positioning with current multi-constellation Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou. *Scientific reports*. Vol. 4. 2015. February. P. 1-14.
2. Осипов С. И., Осипов С. С. Основы тяги поездов: учебник для студентов техникумов и колледжей железнодорожного транспорта. Москва: УМК МПС России, 2010. 592 с.
3. Оценка жизненного цикла / Э. Д. Тартаковский, А. П. Фалендыш, Ю. Е. Калабухин, С. Г. Грищенко. *Локомотив-информ: научный журнал*. 2013. № 2 (80). С. 56-60.
4. Ермилов Р. В. Особенности спутниковой навигации системы ГЛОНАСС. *Психолого-педагогический журнал Гаудеамус*. 2012. № 2(20). С. 199-200.
5. Фалендиш А. П., Сумцов А. Л., Артеменко О. В. Програмный комплекс wyboru системи технічної експлуатації маневрового тепловоза. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2016. № 1. С. 54-61.
6. Черемисин В. Т. Роль информационных технологий в обеспечении надежности локомотива. *Локомотив*. 2017. № 9. С. 2-4.
7. Chen X., Lu C., Guo B., Guo F., Ge M., Li X., Schuh H. GPS/GLONASS Combined Precise Point Positioning With the Modeling of Highly Stable Receiver Clock in the Application of Monitoring Active Seismic Deformation. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 123. 2018. May. P. 4025-4040.
8. Pečáček P., Sága M. Controlling of local search methods' parameters in memetic algorithms using the principles of simulated annealing. *Proc. Eng.* Vol. 136. 2016. April. P. 70-76.
9. Математичне моделювання основних параметрів у тягових розрахунках / А. П. Фалендиш, В. О. Гатченко, С. В. Возненко, О. В. Клецька, М. А. Барибін. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». 2020. № 35. С. 102-112.
10. Правила тяговых расчетов для поездной работы: приказ № 867р. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016. Москва, 2016. 510 с.
11. Марюхненко В. С., Пультяков А. В. Особенности контроля технического состояния подвижного состава на ходу поезда. *Автоматика на транспорте*. 2016. № 2(2). С. 272-286.
12. ЦТ-3921. Инструкция по эксплуатации и ремонту локомотивных скоростемеров ЗСЛ-2М и приводов к ним. Утв. заместителем министра путей сообщения В. Ф. Сосниным 15.08.1980. Москва, 1980. 143 с.
13. Safna F., Sunny R. Artificial Neural Network Based Data Mining. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*. Vol. 5(4). 2015. June. P. 240-245.
14. Анисимов В. А., Анисимов В. В. Тяговые расчеты: монография. Хабаровск, 2013. URL: <https://www.sites.google.com/site/tagapoezd/monografia>.
15. Кудрявцев Л. Д. Курс математического анализа. Москва: Дрофа, 2003. 703 с.
16. Воронов Ю. Е., Косолапов А. В. Сравнение спутниковых навигационных систем применяемых на автомобильном транспорте. *Вестн. Кузбасского гос. техн. ун-та. Автомобильный транспорт*. 2004. № 112. С. 80-85.

Барибін Микола Анатолійович, аспірант кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-1397-7852. Тел.: 0632967498. E-mail: kanifoli4.92@gmail.com.

Фалендиш Анатолій Петрович, д-р техн. наук, професор кафедри транспортних технологій підприємств ДВНЗ Приазовського державного технічного університету. ORCID iD: 0000-0003-3602-7945. Тел.: 0503032039.
E-mail: fap_hiit@ukr.net.

Гатченко Вікторія Олександрівна, канд. техн. наук, доцент кафедри тягового рухомого складу залізниць Державного університету інфраструктури і технологій. ORCID iD: 0000-0002-9868-3852. Тел.: 0508211506.
E-mail: vogatchenko@gmail.com.

Клецька Ольга Віталіївна, канд. техн. наук, доцент кафедри транспортних технологій підприємств ДВНЗ Приазовського державного технічного університету. ORCID iD: 0000-0002-4682-860X. Тел.: 0957466579.
E-mail: gurao@ukr.net.

Кіріцева Олена Вікторівна, асистент кафедри транспортних технологій підприємств ДВНЗ Приазовського державного технічного університету. ORCID iD: 0000-0002-2481-5883. Тел.: 0672894661.
E-mail: evkiritseva@gmail.com.

Barybin Nikolay, postgraduate student, Department of Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management, Ukrainian state University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-1397-7852. Phone: 0632967498.
E-mail: kanifoli4.92@gmail.com.

Falendysh Anatoliy, D. Sc. (Tech.), Professor, Department of Transport Technologies of Enterprises, Pryazovsky State Technical University. ORCID iD: 0000-0003-3602-7945. Phone: 0503032039. E-mail: fap_hiit@ukr.net.

Hatchenko Victoria, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Traction Rolling Stock of Railways, State University of Infrastructure and Technology. ORCID iD: 0000-0002-9868-3852. Phone: 0508211506.
E-mail: vogatchenko@gmail.com.

Kletska Olha, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Transport Technologies of Enterprises, Azov State Technical University. ORCID iD: 0000-0002-4682-860X. Phone: 0957466579. E-mail: gurao@ukr.net.

Kiritseva Elena, Assistant Professor, Transport Technologies of the Enterprises, State University Pryazovskyi State Technical University. ORCID iD: 0000-0002-2481-5883. Phone: 0672894661. E-mail: evkiritseva@gmail.com.

Статтю прийнято 10.09.2020 р.

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ УКРАЇНСЬКОГО
ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ**

**COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS OF THE
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF RAILWAY
TRANSPORT**

Випуск 191

«Збірник наукових праць УкрДУЗТ» включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що включаються до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 15.10.2019 р. № 1301).

Статті друкуються в авторській редакції мовою оригіналу.
Всі статті пройшли подвійне сліпе наукове рецензування.

Відповідальний за випуск Новікова М. А.

Редактор Третьякова К. А.

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 21.09.2020 р.
Формат паперу А4. Папір писальний.
Умовн. друк. арк. 5,25. Тираж 55. Замовлення № .

Видавець Український державний університет залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейсрбаха,7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018р.