

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**БАШИНСЬКА ОЛЬГА ЮРІЇВНА**

УДК 624.04 – 027.28 (043.3)

**СТВОРЕННЯ РОЗРАХУНКОВИХ МОДЕЛЕЙ БУДІВЕЛЬНИХ  
КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ВРАХУВАННІ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ  
ЗАЛІЗОБЕТОНУ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ - 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент  
**Барабаш Марія Сергіївна**,  
Національний авіаційний університет, професор  
кафедри комп'ютерних технологій будівництва.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Голоднов Олександр Іванович**,  
ТОВ «Укрінсталькон імені В.М. Шимановського»,  
Учений секретар.

кандидат технічних наук, доцент  
**Журавський Олександр Дмитрович**,  
Київський національний університет будівництва і  
архітектури,  
завідувач кафедри залізобетонних та кам'яних  
конструкцій.

Захист відбудеться «8» листопада 2019 р. о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.062.12 в Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, проспект Космонавта Комарова, 1, корп. 5, ауд. 303.

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, проспект Космонавта Комарова, 1.

Автореферат розісланий «    » жовтня 2019 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
кандидат технічних наук

О. М. Дубик

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Реологічні властивості бетону, що, в основному, обумовлені його властивістю повзучості, впливають на напружено-деформований стан конструкції в часі, навіть якщо зовнішнє навантаження не зазнає особливих змін. Так, з плином часу відбувається перерозподіл зусиль між сильно та слабо навантаженими елементами, між арматурою і бетоном в перерізах елементів, що в результаті може призвести до руйнування споруди.

Необхідно відзначити, що запроектована споруда (крім надійності, безпеки та економічної доцільності) повинна забезпечити функціональну придатність. Визначення функціональної придатності споруд неможливо без правильного прогнозування перерозподілу напружень між бетоном і арматурою, що відбувається внаслідок повзучості бетону.

Явище текучості твердих тіл, що знаходяться під навантаженням відоме давно. Текучість бетону значно зростає при збільшенні температури, а величина модуля деформації при цьому зменшується. Відповідно, при таких умовах будуть збільшуватися пластичні деформації конструкції. Тому при впливі високих температур на будівлю чи споруду, потрібно враховувати зміну коефіцієнта повзучості в залежності від величини температурного навантаження.

В дисертаційній роботі проводиться дослідження та аналіз саме явища повзучості та текучості бетону при впливі високих температур.

Повзучість впливає на міцність та стійкість будівельних конструкцій. Тому розрахунок будівельних конструкцій на міцність із врахуванням повзучості залізобетону в сучасному проектуванні та будівництві має велике значення.

Серед робіт, присвячених розвитку теорії повзучості, варто відзначити праці Маслова Г.Н., Арутюняна Н.Х., Манжирова А.В., Городецького О.С., Барабаш М.С., Баженова В.А., Барашикова А.Я., Бамбури А.М., Голишева А.Б., Голоднова О.І., Журавського О.Д., Демчини Б.Г., Карпенко Н.І., Савицького М.В., Яковенко І.А., Клименко Є.В., Дорофєєв В.С., Бліхарський З.Я. Великий внесок у розвиток нелінійної теорії повзучості внесли також Васильєв П.І., Работнов Ю.М., Бондаренко В.М., Улицький І.І., Александровський С.В. та багато інших.

Для дослідження напруженого стану бетонних та залізобетонних конструкцій будівель та споруд із врахуванням особливих умов, а також споруд, для яких виникнення та розкриття тріщин є недопустимим із експлуатаційних міркувань, необхідним є дослідження напружень та деформацій із врахуванням повзучості бетону та зміни у часі його модуля деформації. До таких споруд відносяться великопрольотні конструкції, гідротехнічні резервуари, мости, оболонкові перекриття та ін.

Із розвитком будівництва залізобетонних споруд спеціального призначення, що експлуатуються при підвищених температурах, таких як: димові труби, фундаменти під спеціальні печі, бункери для золи та шлаку, автоклави, пропарювальні камери, гарячі цехи, – явище повзучості, що залежить від температури набуло великого значення, та згодом отримало назву термоповзучості. По суті, термоповзучість визначає міцність перерахованих вище споруд.

Забезпечити надійність таких споруд при проектуванні можна лише на основі теорії руху середовища, що знаходиться в стані повзучості.

Також, врахування термоповзучості є необхідним при розрахунку конструкцій на вогнестійкість. Про це сказано, як в українських нормативних документах (ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012), так і в закордонних. Під час вогневого впливу, температура повітря може сягати 1000 °С й вище. В такому випадку, починає виникати миттєва термоповзучість, тобто позучість, що розвивається з такою швидкістю, при якій вплив звичайної повзучості не враховується. На відміну від звичайної повзучості, її тривалість вимірюється хвилинами.

Вивчення зміни напружено-деформованого стану, яка викликана вимушеними температурними деформаціями, вимагає врахування зміни в часі фізико-механічних властивостей бетону, а також його повзучості. Для врахування цього актуальним є створення розрахункових моделей будівельних конструкцій, про що йдеться в дисертаційній роботі.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертації і отримані результати відповідають актуальним напрямкам науково-технічної політики України відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України №409 від 05.05.1997 р «Про забезпечення надійності і безпечної експлуатації будівель споруд і мереж», від 23.05.2011 №547 «Про затвердження Порядку застосування будівельних норм, розроблених на основі національних технологічних традицій, та будівельних норм, гармонізованих з нормативними документами Європейського Союзу».

Дисертаційна робота виконана на кафедрі комп'ютерних технологій будівництва Національного авіаційного університету в рамках наукових досліджень кафедри за держбюджетною темою № 6/10.01.02 «Комп'ютерне моделювання процесів життєвого циклу об'єктів цивільного та транспортного будівництва» та № 36/10.01.02 «Побудова теорії опору складених залізобетонних конструкцій на основі механіки руйнування залізобетону та її комп'ютерне моделювання».

**Мета і завдання дослідження.** *Метою роботи є розробка методики розрахунку залізобетонних конструкцій із врахуванням впливу фізичної нелінійності та реологічних властивостей бетону, створеної на основі подвійного степеневого закону, а також із врахуванням впливу зміни температури оточуючого середовища.*

*Для досягнення мети в роботі були поставлені та вирішені наступні завдання:*

1. Узагальнення результатів дослідження в області визначення характеристик міцності та деформації конструкцій (прогинів та переміщень) із врахуванням впливу реологічних властивостей роботи бетону, обґрунтування необхідності проведення дослідження в цій області, визначення передумов та допущень.
2. Отримання аналітичних залежностей, які дозволять врахувати вплив зміни температури оточуючого середовища конструкції на розвиток деформацій повзучості.

3. Розробка методики визначення напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій будівель та споруд із урахуванням фізичної нелінійності бетону.
4. Створення математичної моделі залізобетонних конструкцій із урахуванням додаткових факторів (вплив високих температур, розвиток пластичних деформацій у результаті впливу реологічних властивостей).
5. Розробка алгоритму, який враховує в'язко-пружно-пластичну поведінку бетону для розрахунку скінченно-елементних моделей будівельних конструкцій, які знаходяться під впливом високих температур, що змінюються у часі.
6. Порівняльний аналіз результатів розрахунків залізобетонних конструкцій за методом скінченних елементів із отриманими експериментальними даними.

**Об'єкт дослідження.** Залізобетонні будівельні конструкції, що знаходяться під впливом силових та температурних навантажень.

**Предмет дослідження.** Характеристики міцності та деформативності будівельних конструкцій при врахуванні реологічних властивостей залізобетону та зміни температури оточуючого середовища.

**Методи дослідження.** Дослідження напружено-деформованого стану конструкцій базується на сучасних методах опору матеріалів, методах механіки твердого деформівного тіла, теорії пружності та пластичності, теорії залізобетону. Використовується чисельне моделювання роботи конструкції за допомогою методу скінченних елементів в програмному комплексі «ЛПРА-САПР».

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному:

1. Вперше розроблено методику чисельного моделювання залізобетонних конструкцій із урахуванням впливу зміни температури оточуючого середовища на зниження механічних та деформаційних властивостей бетону та арматури.

2. Розроблено алгоритм визначення деформацій конструкції із врахуванням виникнення деформацій повзучості на основі подвійного степеневого закону.

3. Вдосконалено алгоритм визначення функції повзучості, що враховує вплив зміни температури оточуючого середовища, гідратації та абсолютної вологості бетону на залізобетонні конструкції.

4. Отримані аналітичні залежності та розроблена методика розрахунку залізобетонних плит перекриття із врахуванням в'язко-пружно-пластичності бетону та впливу температурних факторів.

5. Набула подальшого розвитку математична модель, яка дозволяє врахувати зміну температури в перерізі елемента та її вплив на розвиток нелінійних деформацій, із врахуванням зниження характеристик міцності та деформативності матеріалу.

**Практична цінність отриманих результатів** полягає в наступному:

- запропоновано методику для проектування будівель та споруд, в яких можуть виникати деформації повзучості, що залежать від температури;

- виконані чисельні експерименти дозволяють визначити небезпечні фактори, що характеризують можливу зміну умов експлуатації будівлі (збільшення пластичних деформацій або високотемпературні впливи тощо);

- наведені алгоритми розрахунку конструкції можуть бути використані при повторному розрахунку будівель та споруд, що зазнали вогневого впливу;

- результати дослідження можна використовувати при удосконаленні нормативів у рамках забезпечення конструктивної безпеки будівель та споруд у випадку впливу високих або підвищених температур;
- наведено алгоритм визначення параметрів термонапруженого стану, за яких забезпечується подальша безпечна експлуатація залізобетонної конструкції;
- запропоновані рекомендації щодо прогнозування технічного стану будівель та споруд під час їхньої експлуатації, що дають можливість максимально точно визначити ресурс конструкцій.

**Отримані результати роботи впроваджено та застосовано в діяльності:**

- державного підприємства «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (ДП НДІБК) при розробці зміни №1 національного нормативного документу України ДБН В.2.6-98: «Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення» в частині вимог до розрахунку залізобетонних конструкцій будинків і споруд, з урахуванням реологічних властивостей бетону;
- ТОВ «ЛІРА-САПР» при розробці та реалізації методики розрахунку задач із врахуванням нелінійної роботи бетону та врахуванні ефекту повзучості, а також при реалізації нової підсистеми для вирішення задач теплопровідності, що є складовою частиною програмного комплексу «ЛІРА-САПР»;
- кафедри комп'ютерних технологій будівництва факультету факультету архітектури, будівництва та дизайну Національного авіаційного університету при викладанні дисциплін «Комп'ютерні технології проектування конструкцій будівель та споруд аеропортів», «Інтегровані технології проектування будівель та споруд».

**Особистий внесок здобувача.** Більшість отриманих результатів дисертаційної роботи одержані автором самостійно. Окремі наукові результати отримано у співавторстві з науковим керівником і опубліковані у наукових статтях. Особистий внесок здобувача включає визначення мети та завдань виконаних досліджень, загальне виконання робіт, створення розрахункових моделей споруд, чисельне моделювання скінченних елементів для вирішення задачі теплопровідності, розробку загальної методики розрахунку конструкцій, аналіз експериментальних даних.

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 12 наукових праць, з яких 1 стаття у закордонному науковому періодичному виданні, та 1 стаття у виданні, що включене до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus.

В наукових роботах, опублікованих зі співавторами, здобувачу належать:

- [1] – теоретичне дослідження існуючих гіпотез визначення функції повзучості, побудова графіків порівняння досліджених методик;
- [2] – дослідження процесу реалізації розрахунку пластичних деформацій конструкції при визначенні напруженого стану методом скінченних елементів, побудова графіків порівняння аналітичних та експериментальних даних;
- [4] – дослідження процесу знаходження функціоналу термоповзучості, створення розрахункових моделей для порівняння різних методик розрахунку деформацій повзучості;
- [5] – створення розрахункових схем конструкцій, виконання розрахунку із врахуванням фізичної нелінійності;

[6] – виконання розрахунків в інженерному калькуляторі «ЕСПРІ», виведення алгоритму розрахунку підсилення конструкцій композитними матеріалами із врахуванням пластичності бетону;

[8, 12] – дослідження методик розрахунку пластичних деформацій конструкцій, формування параметрів для розрахунку конструкції моста із врахуванням фізично-нелінійної роботи матеріалу.

**Апробація результатів роботи.** Результати досліджень, практичних розробок та впроваджень висвітлено в 11 (одинадцяти) наукових конференціях: II міжнародний науково-практичний конгрес «Міське середовище XXI ст. Архітектура. Будівництво. Дизайн» (Київ, НАУ, 2016 р.); XIX конференція молодих вчених «Наука – майбутнє Литви. Транспортна інженерія. Менеджмент» (Вільнюс, Вільнюський технічний університет Гедиміна, 2016 р.); науково-практична конференція «Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції» (Київ, КНУБА, 2016 р.); XIV міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні технології життєвого циклу об'єктів житлово-цивільного, промислового і транспортного призначення» (Кам'янець-Подільський, 2016 р.); XII міжнародна науково-технічна конференція «Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація» (Полтава, 2016 р.); I та II міжнародна науково-практична конференція «Сучасні методи і проблемно орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій. Їх застосування у проектуванні і навчальному процесі» (Київ, КНУБА, 2017 р., 2018 р.); науково-практичний семінар щодо підвищення кваліфікації за спеціальністю «Вогнестійкість будівельних конструкцій. Пожежна безпека об'єктів будівництва» (Київ, ДНДІБК, 2018 р.); науково-практична конференція «Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції» (Київ, КНУБА, 2018 р.); XVI міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні технології життєвого циклу об'єктів житлово-цивільного, промислового і транспортного призначення» (с. Брюховичі, Україна, 2018 р.); міжнародна наукова конференція «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» («Золотовские чтения»), (Москва, Російська Академія Архітектурних і Будівельних Наук, 2019 р.).

**Публікації.** Основні наукові результати за темою дисертаційної роботи опубліковані у 12 наукових працях, у тому числі 5 наукових публікацій, у спеціалізованих фахових виданнях, внесених до переліку ВАК України (із них 1 публікація, у виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази Index Scopus), 1 публікація у зарубіжному періодичному виданні, 1 стаття, що додатково відображає результати дисертаційного дослідження та 5 публікацій у збірниках праць за матеріалами конференцій.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається із анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 140 сторінок, із них 112 сторінок – основна частина тексту. У тексті міститься 45 графічних ілюстрацій, 6 таблиць, список використаних джерел обсягом 125 найменувань на 13 сторінках, додатки на 10 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність вибраної теми, її зв'язок з науковими програмами, сформульовані мета і завдання дослідження, наведені основні наукові результати, практичне значення отриманих результатів роботи, особистий внесок здобувача, дані щодо апробації результатів дослідження, публікації, структура та обсяг роботи.

У **першому розділі** проводиться аналіз роботи будівельних конструкцій при розвитку пластичних деформацій та при врахуванні нелінійної роботи матеріалу. Розглянуті відомі роботи фахівців в області дослідження повзучості бетону, будівельної механіки та механіки твердого деформівного тіла.

Проведено аналіз та порівняння існуючих гіпотез та методів визначення температурних деформацій бетону. Розглянуто основні гіпотези та припущення теорії пластичності та повзучості.

Наведено аналіз існуючих методів визначення функцій повзучості, а саме моделі пружно-повзучого тіла та моделі, що описана в європейських нормативних документах та носить назву СЕВ 90.

В класичній теорії пружності вважається, що напружений стан тіла однозначно визначається його деформацією. Для однорідного ізотропного матеріалу залежність між компонентами деформацій та напружень при одновісному напруженому стані виражається за допомогою закону Гука.

Якщо деформації являються функцією, що залежить від часу, то для визначеного моменту – напруження визначаються єдиним чином. Але в реальності, для більшості матеріалів, таких, як бетон, не існує однозначної прямої залежності між напруженнями та деформаціями. Такі тіла характеризуються тим, що здатні деформуватися в часі при незмінному навантаженні. Для таких тіл напруження в певний момент часу визначаються не тільки через величину деформацій, але й в залежності від всієї попередньої історії деформування.

Багаточисленні експериментальні дослідження бетону лежать в основі сучасної теорії повзучості. Як і у всіх феноменологічних теоріях, в основі теорії повзучості бетону лежить ряд робочих гіпотез, що являють собою узагальнення результатів експериментальних даних.

Теорія повзучості, має справу зі значно більш складними явищами, ніж теорія пружності, а також теорія пластичності. Положення теорії повзучості можна порівняти хіба що з положеннями теорії пластичності тіла, що зміцнюється. І в той, і в іншій області є намір описати весь комплекс властивостей реального тіла, охопивши його деякою єдиною системою рівнянь. Як в пластичності, так і в повзучості, виявляється можливим побудувати різні спрощені рівняння, що придатні для описання певного обмеженого кола явищ.

У **другому розділі** наведені основні припущення та передумови врахування пластичних деформацій бетону. Розглянуті основні рівняння та методи вирішення задачі рівноваги пружно-повзучого середовища. Розглянуто гіпотези, що дозволяють розрахувати ядро інтегрального рівняння Вольтерри (1) зі змінною верхньою межею, яке описує повні відносні деформації тіла:



$$\varepsilon(t) = \sigma(t) / E(t) - \int_{\tau_1}^t \sigma(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left[ \frac{1}{E(\tau)} + C(t, \tau) \right] d\tau, \quad (1)$$

де  $\tau$  – вік бетону;  $t$  – розглянутий момент часу визначення деформацій (при цьому  $0 < \tau \leq t$ );  $C(t, \tau)$  – міра повзучості;  $1/E(\tau)$  – пружно-миттєва деформація.

В більшості випадків, при визначенні повних деформацій тіла, використовуючи інтегральне рівняння зі змінною верхньою межею, ядра цього рівняння приймалися залежними від різниці двох аргументів, а саме: часу прикладання навантаження та моменту визначення деформацій. Ця умова виникає із вимоги так званого замкненого контуру, що виражає інваріантність інтегрального співвідношення відносно зміни початку відліку часу.

Основну задачу пружно-повзучого середовища зазвичай формулюють наступним чином. Існує деяке тіло, на його поверхні діють сили або переміщення, або можуть бути задані інші граничні умови. Потрібно визначити деформації або напруження у цьому тілі із врахуванням ефекту повзучості. Виходячи із початкових параметрів, при рішенні такої задачі, відбувається розрахунок функції повзучості, а згодом і пластичних деформацій.

Для аналізу існуючих методів вирішення задачі пружно-повзучого середовища, представлено порівняння між коефіцієнтами повзучості, отриманими за різними методами, а саме: модель СЕВ 90 і модель пружно-пластичного тіла та проведено порівняння із експериментальними даними.

Значення експериментальних даних відносяться до бетону, виготовленого на портландцементі при повітряному зберіганні. Для аналітичного розрахунку за теорією Н. Х. Арутюняна були прийняті наступні значення реологічних параметрів:  $C_0 = 8,67 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}^{-1}$  (при  $t' = 7$  днів) та  $C_0 = 7,2 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}^{-1}$  (при  $t' = 14$  днів);  $A_1 = 5,68 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}^{-1}$ ;  $\gamma = 0,026 \text{ дні}^{-1}$ . Параметри для розрахунку за моделлю СЕВ 90:  $\phi_0 = 3,4$  (при  $t' = 7$  днів) і  $\phi_0 = 2,5$  (при  $t' = 14$  днів);  $E_b = 25 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ ;  $\beta_H = 1000$ . Результати розрахунків наведено у вигляді графіків на рисунках 1 та 2.

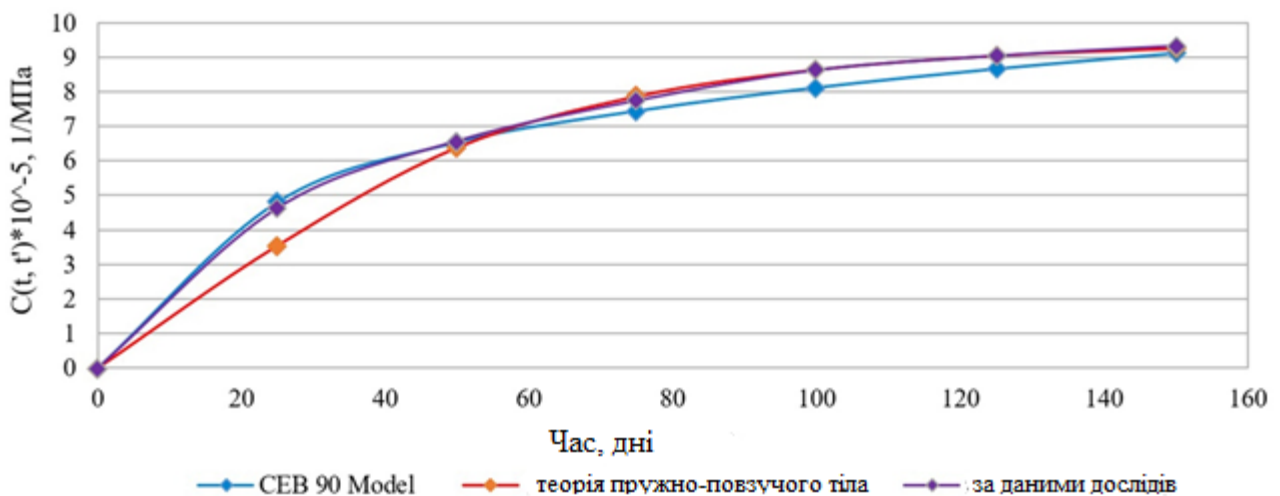


Рис.1. Графік зміни міри повзучості  $C(t, t')$  у часі при  $t' = 7$  днів

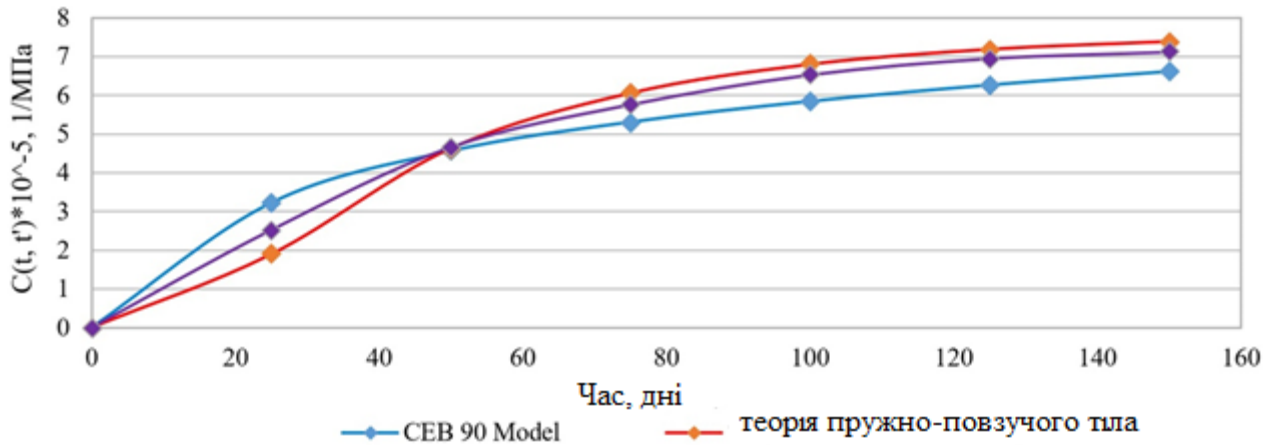


Рис.2. Графік зміни міри повзучості  $C(t, t')$  у часі при  $t' = 14$  днів

З графіків видно, що теорія пружно-повзучого тіла більш наближена до експериментальних даних. А на рисунку 1 ці криві практично збігаються. Це можна пояснити тим, що аналітичне вираження теорії пружно-повзучого тіла було виведено з урахуванням впливу спадковості матеріалу, а також, в ньому приймається до уваги більша кількість параметрів, які впливають на характер деформації бетону. Хоча теорія пружно-повзучого тіла враховує більшу кількість властивостей бетону, вона є однозначно більш складною для практичного використання. В той час, як модель СЕВ 90 є більш простою при розрахунках, її недоліком є те, що вона не залежить від передісторії завантаження конструкції.

Основним недоліком моделі СЕВ 90 є те, що при розрахунку – деформації повзучості практично не залежать від віку матеріалу в момент завантаження, а визначаються, в основному, тривалістю дії зовнішнього навантаження. З цього випливає, що ця теорія краще підходить для опису картини напружено-деформованого стану тіл, що знаходяться в старому віці. Також вона не може повністю описати процес зміни напружень і деформацій в спорудах з урахуванням старіння матеріалу.

У **третьому розділі** наведено методику використання методу скінченних елементів при вирішенні задачі теплопровідності та визначенні термонапруженого стану. Наведено методику розрахунку деформацій повзучості, як частини розрахунку залізобетонної конструкції із врахуванням фізичної нелінійності. Оскільки, для точного визначення пластичних деформацій конструкції, що залежать від зміни температури, потрібно знати розподілення температури по всій конструкції, а також по перерізу елементів конструкції, то використання методу скінченних елементів є невід'ємною частиною даного аналізу.

В рамках дисертаційної роботи в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» реалізовано модуль, що дозволяє вирішувати стаціонарні та нестаціонарні задачі теплопровідності. Реалізовано методику розрахунку на різні види зовнішнього навантаження, а саме: стаціонарний та нестаціонарний теплові потоки, задана температура у вузлі, конвективний теплообмін та променевий теплообмін (радіація).

Для цього було створено скінченні елементи теплопровідності та конвективного теплообміну, які представлені на рисунках 3 та 4.

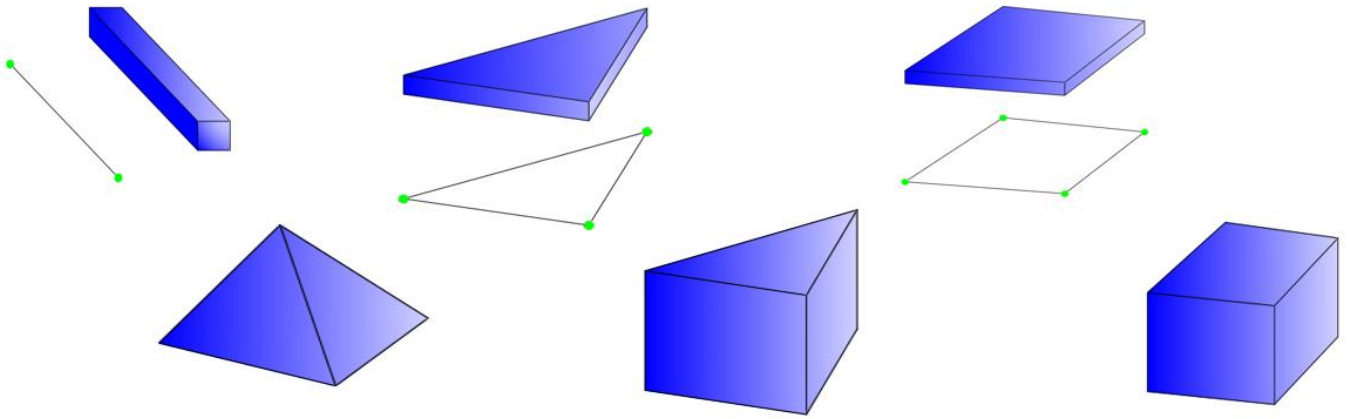


Рис. 3. Реалізовані скінченні елементи теплопровідності

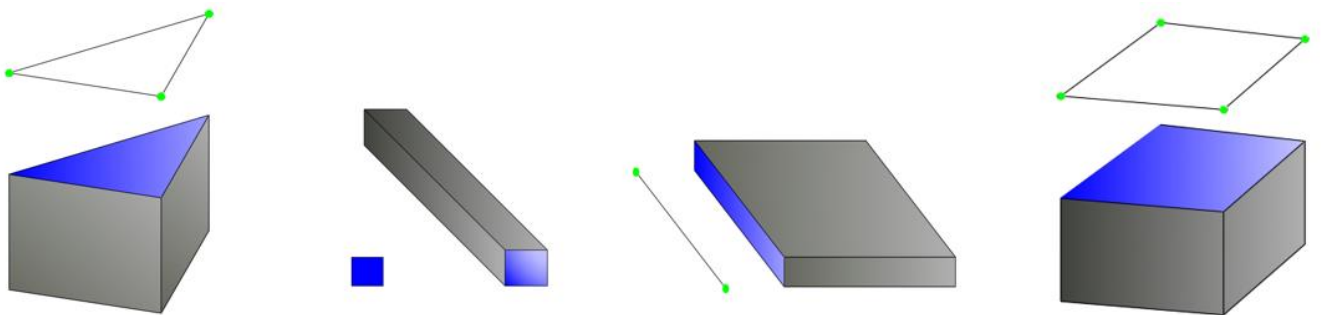


Рис. 4. Реалізовані скінченні елементи конвективного теплообміну

Для тривимірного випадку крайова задача теорії теплопровідності описується наступним диференціальним рівнянням:

$$K_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + w = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2)$$

де  $T = T(x, y, z, t)$  – поле температур в області  $\Omega$ ;  $K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$  – коефіцієнти теплопровідності у напрямках  $x, y, z$ ;  $w = w(x, y, z, t)$  – сила джерела тепла всередині тіла;  $\rho$  – густина матеріалу;  $c$  – питома теплоємність матеріалу тіла.

Для вирішення подібної задачі повинні бути задані граничні умови. Існує три основних різновиди граничних умов:

1. Гранична умова першого роду, коли на частині поверхні тіла задана стала температура  $T$ :

$$T = T(x, y, z, t). \quad (3)$$

2. Гранична умова другого роду, коли на частині поверхні тіла задано тепловий потік:

$$K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} l_y + K_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} l_z = -q. \quad (4)$$

3. Гранична умова третього роду, коли на частині поверхні відбувається конвективний теплообмін:

$$K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} lx + K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} ly + K_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} lz = -h(Ts - Tb). \quad (5)$$

Вирішення такої задачі еквівалентне знаходженню в певний момент часу мінімуму функціоналу. Таким чином, спираючись на варіаційні принципи, потрібно розбити досліджувану область тіла на скінченні елементи, створивши при цьому певну кількість вузлів. Ступенями свободи буде температура у вузлах схеми. Вузлові температури утворюють вектор невідомих.

У розділі розглянуті основні передумови створення скінченних елементів, методи виведення матриць жорсткості, конвекції та теплопоглинання. Наведені основні ідеї та методи апроксимації функції вузлових невідомих.

Температура всередині всіх скінченних елементів теплопровідності апроксимується лінійними поліномами.

Розглянуто виведення функцій форм для стержневих, плоских та об'ємних скінченних елементів з одним ступенем вільності, тобто симплекс-елементів.

У випадку, коли вирішується нестационарна задача теплопровідності, обов'язково потрібно розраховувати матрицю теплоємності. Матриця теплоємності елементів теплопровідності виглядає:

$$[C]_e = \int \rho c [N]^T [N] dV \quad (6)$$

Якщо мова йде про трикутні скінченні елементи, то для вирішення такого рівняння можна робити заміну функцій форми елемента на так звані L-координати.

Перед формуванням системи рівнянь методу скінченних елементів потрібно побудувати функції форми та розрахувати інтеграли від матричних функцій для кожного скінченного елемента. При цьому розрахунки та непотрібні математичні операції відносяться до глобальної системи координат, що викликає багато незручностей. По-перше, для визначення функцій форми потрібно перетворювати функцію переміщень, по-друге, можлива така ситуація, коли деякі інтеграли від матричних функцій доволі важко розрахувати. Особливо це стосується тривимірних елементів.

Введення локальних систем координат дозволяє в значній мірі уникнути вище перерахованих недоліків. Більше того, при використанні локальної системи координат є можливість інтерполювати не лише шукану функцію, але і форму скінченного елемента.

При розрахунку інтегралів по об'єму або поверхні елементів від матричних функцій краще переходити до таких локальних координат. Тоді елементи підінтегральної матричної функції будуть являти собою степеневі поліноми від локальних координат. І можна використовувати стандартні формули інтегрування по площі.

**У четвертому розділі** дисертаційної роботи наведені основні положення визначення деформації термоповзучості. Розглянуті існуючі методики розрахунку залізобетонних конструкцій із врахуванням температурного впливу.

Наведено формули для математичного моделювання пластичних деформацій бетону із врахуванням зміни температурного режиму експлуатації, проведено порівняння аналітичних результатів із експериментальними даними.

Виконано розрахунок математичних моделей тестових споруд в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» із використанням різних методик моделювання та розрахунку пластичних деформацій. Проведено порівняння кінематичних характеристик розрахункових схем при різних методах визначення деформацій повзучості.

У звичайних умовах роботи бетонні та залізобетонні конструкції постійно піддаються впливу зміни температури і вологості, що викликає в них температурні деформації. Швидкість деформації повзучості істотно залежить від температури середовища, особливо в момент прикладання навантаження на тіло.

У розділі запропонована формула, яка дозволяє розрахувати функцію повзучості в залежності від зміни температури навколишнього середовища будівельної конструкції:

$$\Phi(T, t, \tau) = \sum_{\tau_1}^t \phi_T(\tau) f_W f(t'_e) \Delta \tau, \quad (7)$$

де  $\phi_T$  – функція температури;  $f_W$  – функція абсолютної вологості бетону;  $t'_e$  – функція гідратації бетону;  $\tau_1$  – момент прикладання завантаження;  $\tau$  – вік бетону;  $t$  – розглянутий момент часу визначення деформацій (при цьому  $0 < \tau \leq t$ ).

Наведена формула враховує вплив на деформації повзучості таких факторів, як швидкість гідратації цементу, зміни відносної вологості, а також зміни теплових потоків в бетоні в залежності від температури навколишнього середовища.

За результатами порівняння емпіричних і аналітичних даних, що наведені в розділі, можна стверджувати, що запропонована функція повзучості підходить для визначення повних деформацій конструкції.

Наведені основні рівняння, розроблена методика розрахунку залізобетонних конструкцій на основі в'язко-пружно-пластичної моделі бетону і подвійного степеневого закону термоповзучості. Дана методика підходить для будь-якого температурного режиму експлуатації будівель і споруд в умовах підвищених технологічних або кліматичних температур.

Зміна температури зовнішнього середовища значно впливає на зміну фізико-механічних властивостей бетону. Подвійний степеневий закон, який реалізований у програмному комплексі «ЛІРА-САПР» дозволяє враховувати вплив зміни температурного режиму експлуатації на напружено-деформований стан конструкції при розрахунку будь-яких цивільних та промислових будівель і споруд.

В роботі представлено узагальнену формулу для визначення функції гідратації, яка максимально точно враховує вплив кондуктивного та конвективного теплових потоків в бетоні:

$$t'_e = \int_0^{t'} \beta_T \beta_H dt, \quad (8)$$

де  $\beta_T$  – коефіцієнт кореляції температури,  $\beta_H$  – коефіцієнт кореляції відносної вологості бетону.

Також, формула (8) відображає вплив відносної вологості бетону в момент приросту завантаження на швидкість гідратації цементу:

$$\beta_T = \exp\left[\frac{U_h}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right], \quad (9)$$

де  $U_h$  – енергія активації гідратації;  $R$  – газова постійна.

$$\beta_H = \frac{1}{1+(7,5-7,5H)^4}, \quad (10)$$

де  $H$  – відносна вологість бетону.

$$\phi_T = \phi_0 \exp\left[\frac{U}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right], \quad (11)$$

де  $U$  – енергія збільшення швидкості повзучості бетону.

Для верифікації наведеної формули проведено порівняння коефіцієнтів повзучості, обчислених за формулою (7), зі значеннями коефіцієнтів повзучості, отриманих експериментальним шляхом.

При проведенні експерименту досліджувалися бетонні блоки з розмірами 25x25x140 см. Кожен блок рівномірно розігрівався до заданої температури без обмежень деформацій. Розрахункові значення модулів деформації блоків рівні: для блоку №1  $E = 0.35 \cdot 10^5$  МПа, для блоку №2  $E = 0.375 \cdot 10^5$  МПа, для блоку №3  $E = 0.347 \cdot 10^5$  МПа.

На рисунку 5 наведено порівняння емпіричних і аналітичних значень коефіцієнтів повзучості при зміні температури навколишнього середовища бетонних зразків.

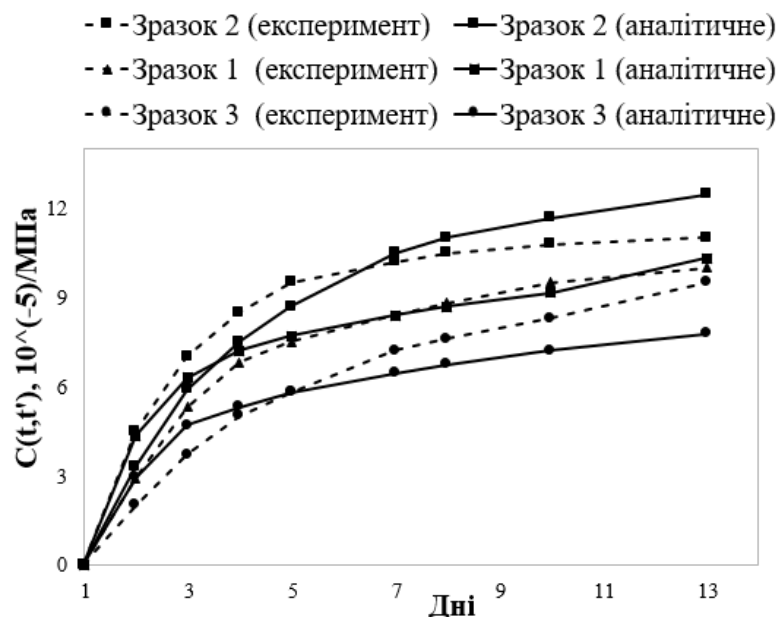


Рис. 5. Порівняння аналітичних коефіцієнтів повзучості з емпіричними даними

Також було проведено порівняння функції повзучості, розрахованої за авторською методикою із експериментальними значеннями при постійному значенні підвищеної температури.

Порівняння отриманих аналітичних рішень з експериментальними даними показано на рисунку 6.

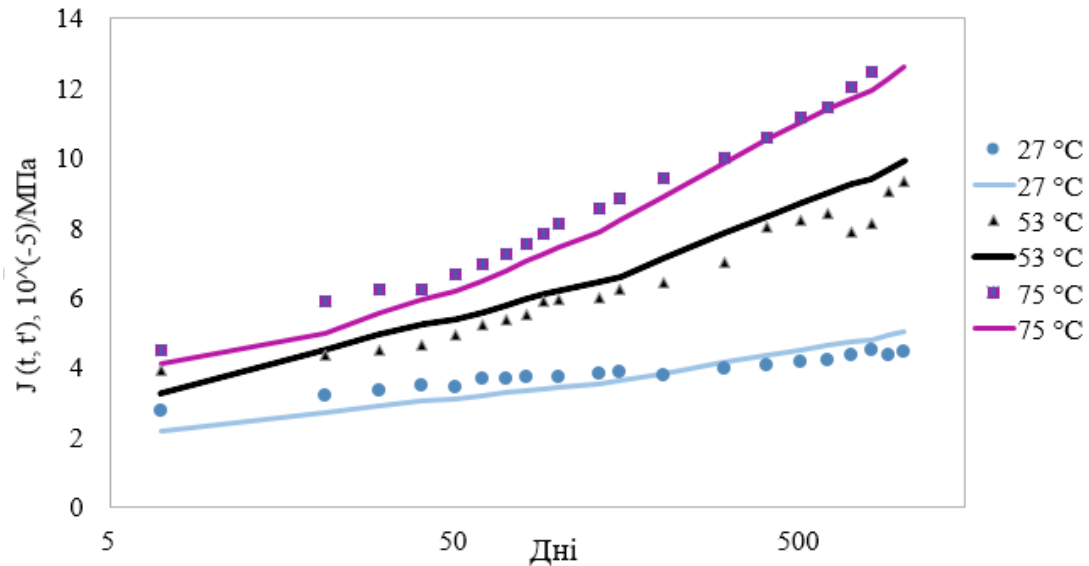


Рис. 6. Порівняння експериментальних і аналітичних значень функції повзучості з урахуванням впливу підвищеної температури

За результатами порівняння емпіричних і аналітичних даних, що наведені на рисунках 5 та 6, можна стверджувати, що запропонована в розділі функція повзучості підходить для визначення повних деформацій при зміні температури експлуатації конструкції.

Також, у розділі розглянуто приклад чисельного моделювання зміни температурного режиму експлуатації будівель. У програмному комплексі «ЛІРА-САПР» були створені три розрахункові схеми однакової конфігурації, але з використанням різних методів обчислення напружень і деформацій, з метою дослідження результатів розрахунку в залежності від виду задання закону деформування і вибору закону повзучості.

Зміна температури зовнішнього середовища значно впливає на зміну фізико-механічних властивостей бетону. Подвійний степеневий закон (формула 7), дозволяє враховувати вплив зміни температурного режиму експлуатації на напружено-деформований стан конструкції при розрахунку будь-яких цивільних і промислових будівель і споруд.

У п'ятому розділі розглянуто приклад моделювання плити перекриття за авторською методикою. Згідно з наведеною методикою елемент конструкції поділяється на характерні ділянки. Далі проводиться теплотехнічний розрахунок конструкції методом скінченних елементів або методом скінченних різниць. В рамках дисертаційної роботи було розглянуто лише перший метод (скінченних елементів).

На першому етапі розрахунку визначаються температурні поля конструкції в певний момент часу, який залежить від ступеня вогнестійкості конструкції. В

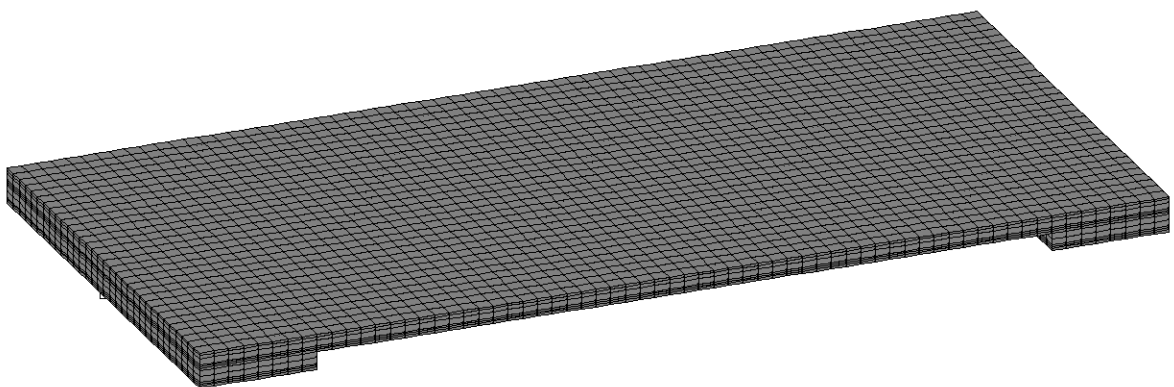
залежності від визначених температурних ізополей розраховуються понижуючі коефіцієнти для міцнісних та деформаційних характеристик бетону та арматури методом інтерполяції. За допомогою понижуючих коефіцієнтів зменшуються відповідні характеристики бетону та арматури у характерних ділянках.

Використовуючи формулу (7) визначається коефіцієнт повзучості, що залежить від зміни температури оточуючого середовища споруди. Останнім етапом є розрахунок споруди на міцність із врахуванням нелінійної роботи арматури та бетону, та впливу деформацій термоповзучості, а також аналіз стійкості та міцності конструкції, в результаті розрахунку.

В розділі розглянуто приклад розрахунку моделі плити перекриття, виконано теплотехнічний розрахунок, визначено зменшені характеристики матеріалів, визначено закон розрахунку деформацій повзучості та проведено статичний розрахунок конструкції на міцність із врахуванням фізично-нелінійної роботи конструкції. Проведено порівняння результатів розрахунку за авторською методикою із розрахунком за методиками, що наведені в нормативних документах, а також порівняння результатів розрахунку із дійсними характеристиками реальної споруди, що зазнала впливу пожежі.

Розміри досліджуваної плити становили: довжина – 16,5 м, ширина – 8 м, висота плити (над колонами) – 600 мм, висота плити в прольоті – 300 мм. Арматура в нижній частині плити –  $\varnothing 16$  і  $\varnothing 20$ , арматура над опорами (верхня) –  $\varnothing 32$ . Бетон було змодельовано об'ємними ізопараметричними скінченними елементами. Арматура була змодельована стержневими скінченними елементами №210. Вся розрахункова схема включає 20390 скінченних елементів. На торцевих вузлах накладені граничні умови симетрії. У місцях приєднання колон до плити, аналогом роботи колони слугували скінченні елементи №56, з жорсткостями, що відповідали роботі колон в розглянутому прольоті. По висоті, плита ділиться на 6 і 12 шарів, в прольоті і на опорах відповідно.

Скінченно-елементна схема плити перекриття показана на рисунку 7.



*Рис. 7. Скінченно-елементна схема плити*

Для виконання теплотехнічного розрахунку і визначення температурних полей, був проведений аналіз перерізу плити перекриття. Оскільки, зміна температури по висоті перерізу відбувається рівномірно, це дає можливість розглядати розподіл температури вздовж частини перерізу однієї висоти.

Для теплотехнічного розрахунку були прийняті наступні теплопровідні властивості бетону: щільність – 2300 кг/м<sup>3</sup>, коефіцієнт теплопровідності – 1.2 Вт / (м



\*с), коефіцієнт теплопоглинання – 710 Вт. Коефіцієнт конвекції згідно з пунктом 3.2.1 Єврокоду був прийнятий рівним 25 Вт / (м<sup>2</sup> \* с). Температурне навантаження було задане за даними стандартного температурного режиму пожежі. Температура зовнішнього середовища в початковий момент часу прийнята 20 °С.

Результати теплотехнічного розрахунку наведено на рисунку 8.

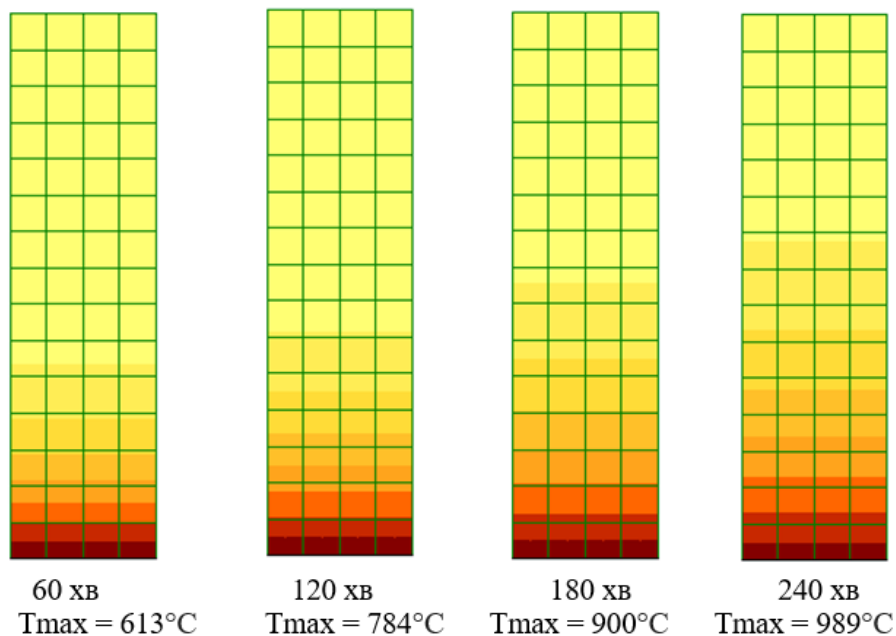


Рис.8. Розподіл температурних полів по фрагменту перерізу плити перекриття в прольоті ( $h = 300\text{мм}$ ) в різні моменти часу

Оскільки при розрахунку конструкцій на вогнестійкість необхідно враховувати деформації повзучості, тому було проведено порівняння напружено-деформованого стану конструкції за фізично нелінійним розрахунком, із урахуванням впливу повзучості (яка залежить від температури) і без врахування повзучості.

Для визначення загальних деформацій конструкції, функцію повзучості розраховували за формулою, яка була отримана в розділі 4.

Наведено результати аналізу роботи плити перекриття в різні моменти часу: на 60, 120, 180 і 240-й хвилини пожежі. На рисунку 9 наведена деформована схема плити перекриття на 240-й хвилині вогневого впливу.

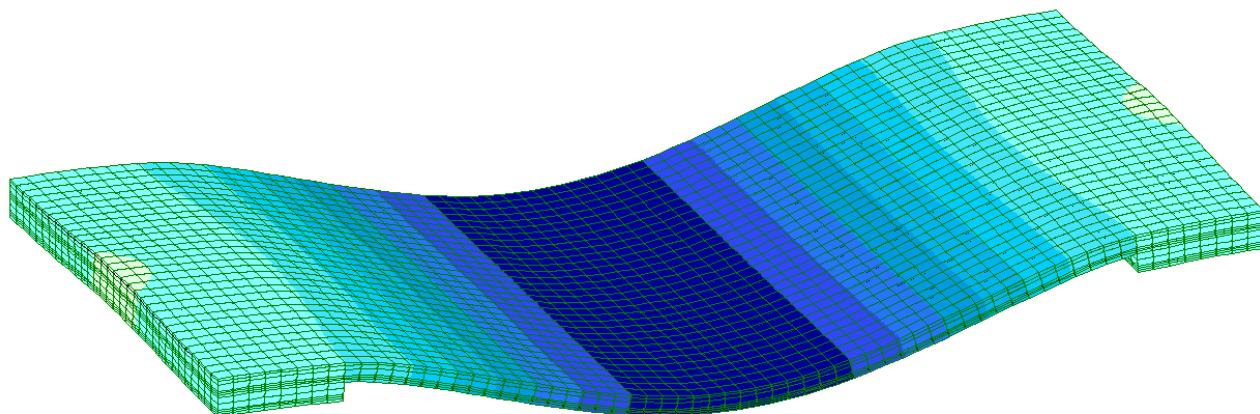


Рис.9. Деформована схема плити перекриття

При статичному лінійному розрахунку максимальні переміщення конструкції по осі Z склали 19,4 мм. Порівняння прогинів конструкції при фізично-нелінійному розрахунку та врахуванні повзучості наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Максимальні переміщення по осі Z, мм

Вид задачі	Момент визначення деформацій			
	60 хв	120 хв	180 хв	240 хв
Фізична нелінійність	16	22	28	28.9
Фізична нелінійність і повзучість	36.1	82.4	156	233

Різні нормативні документи описують різні методики визначення деформацій повзучості. На рисунку 10 показано порівняння прогинів конструкції з використанням різних методик визначення деформацій повзучості: методів, описаних у ДСТУ, СТО, та за авторською методикою.

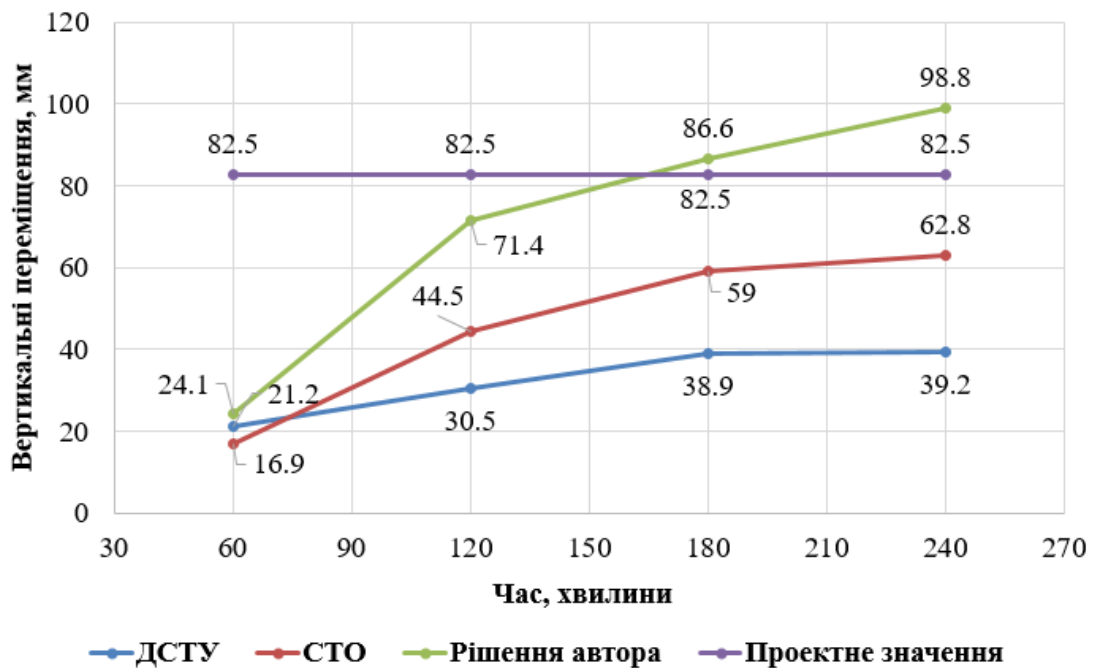


Рис. 10. Порівняння вертикальних переміщень конструкції, розрахованих за різними методами визначення повзучості

Згідно з розрахунками, виконаними за посиланням на нормативні документи, дана конструкція повинна витримувати навантаження від пожежі протягом 240 хвилин. Але за розрахунком, виконаним за авторською методикою, зрозуміло, що міцність конструкції не забезпечується. На 160-й хвилині дії вогню прогини перевищують гранично допустимі значення.

Плита перекриття товщиною 300 мм при дотриманні всіх конструктивних вимог повинна гарантовано витримати вогневий вплив тривалістю 240 хвилин. Але в результаті розрахунків показано, що конструкція втрачає свою цілісність набагато раніше.

В розділі також показано, що в результаті виникнення вогню, нижня частина бетону повністю руйнується вже на 180-й хвилині пожежі і втрачає свою цілісність.

Тому можна стверджувати, що в такій ситуації, нижня арматура буде нагріватися до температури, що перевищує її умовно граничне значення (600 °С) і починає текти. У той час як верхня половина плити перекриття все ще здатна нести навантаження і може уникнути руйнування.

Саме такі наслідки сталися в будівлі магазину «Ашан» торгово-розважального комплексу Sky-Mall (м.Київ) восени 2017 року внаслідок пожежі.

Фотографія реального об'єкта, якому відповідає розрахункова схема досліджуваної плити перекриття, показана на рис. 11.



*Рис. 11. Наслідки пожежі, що виникла в магазині Ашан, ТРЦ «Sky-Mall»*

Із наведених фотографій видно, що нижній захисний шар бетону було повністю зруйновано під час пожежі. Внаслідок чого, температура арматурних стержнів досягла критичного значення, і відповідно – арматура «потекла».

Саме таку картину руйнування отримано при розрахунку плити перекриття за запропонованою методикою із врахування коефіцієнту термоповзучості, що було розраховано за формулою 7.

Тому можна зробити висновок, що аналіз скінченно-елементної моделі за авторською методикою розрахунку конструкцій із врахуванням повзучості та при врахуванні впливу зміни температури оточуючого середовища на міцнісні характеристики бетону – співпадає з даними обстеження будівлі після пожежі. Методику варто використовувати при розрахунках будівель та споруд на вогнестійкість та при впливах високих температур.

Отже, в роботі наведена методика розрахунку залізобетонних конструкцій на вплив високих температур з урахуванням фізичної нелінійності матеріалів і впливу повзучості. Дана методика найбільш точно відображає роботу конструкції при впливі вогню, а також дає можливість максимально точно розраховувати конструкції на вогнестійкість і забезпечувати їх міцність та надійність.

Врахування впливу повзучості дає можливість визначити повні деформації конструкції, і виконати розрахунок будівлі або споруди за уточненою методикою.

За результатами дослідження автором розроблено рекомендації щодо розрахунку елементів конструкцій із врахуванням впливу температурної повзучості.

## ВИСНОВКИ

1. Проведено теоретичне дослідження напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій при врахуванні впливу реологічних властивостей бетону. Показано, що в процесі повзучості, напруження в бетоні зменшуються, а в арматурі, навпаки, зростають. Внаслідок перерозподілу напружень, зусилля, що виникають в арматурі можуть досягати критичних значень.

2. Отримано рівняння, на основі в'язкопружнопластичної моделі та подвійного степеневого закону, що дозволяє розраховувати функцію повзучості із врахуванням зміни температури оточуючого середовища. Проведено порівняння аналітичної функції повзучості із експериментальними даними. Середнє значення похибки складає: при постійній підвищеній температурі оточуючого середовища – 9.2% для 53 °С, 6.47% для 75 °С, 5.37% для 23 °С, 7.47% для 71 °С; при змінному значенні температури – 10.07%, 1.94%, 4.98% для трьох досліджуваних зразків відповідно.

3. Запропоновано методику аналізу залізобетонних конструкцій під впливом високих температур. Дана методика дозволяє враховувати вплив розподілу температури по всьому поперечному перерізу на зменшення міцності та властивостей деформаційних матеріалів будь-якого конструктивного елемента. Достовірність запропонованої методики підтверджується порівнянням із експериментальними даними.

4. Реалізовано 10 спеціальних скінченних елементів, із них 6 елементів теплопровідності, та 4 елементи конвективного теплообміну, а також реалізовано 4 види теплових навантажень у програмному комплексі «ЛІРА-САПР» для виконання теплотехнічного розрахунку. Реалізовано алгоритми, що дозволяють вирішити стаціонарну та нестаціонарну задачі теплопровідності та врахувати основні види теплового навантаження, а саме: тепловий потік, задану температуру у вузлі, конвективний теплообмін із середовищем. Розглянуто процес врахування деформацій повзучості при реалізації методу скінченних елементів, із використанням різних законів визначення функції повзучості.

5. У роботі розроблено алгоритм аналізу залізобетонних конструкцій під впливом високих температур. При розрахунку за даним алгоритмом плити перекриття (товщиною 300 мм) показано, що загальна несуча здатність конструкції зменшується на 35% та 48% при впливі пожежі тривалістю 180 та 240 хвилин відповідно.

6. Проведено порівняння результатів розрахунку скінченно-елементної моделі будівлі за запропонованою методикою із розрахунками, виконаними за нормативними документами. Проведено порівняння аналітичних результатів із дійсними наслідками вогневого впливу на залізобетонну плиту перекриття.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **Публікації у наукових фахових виданнях України**

1. Башинская О.Ю. Сравнительный анализ методов численного моделирования пластических деформаций бетона / О. Ю. Башинская, М. С. Барабаш // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения. – 2016. – Вып. 91. – С. 32–39.
2. Башинская О.Ю. Решение задачи термползучести бетона методом конечных элементов / О. Ю. Башинская, А.В. Пикуль, М.С. Барабаш // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения. – 2017. – Вып. 99. – С. 22-29.
3. Башинская О. Ю. Математическое моделирование пластических деформаций бетона с учётом изменения температурного режима эксплуатации / О. Ю. Башинская // Проблеми розвитку міського середовища. – 2017. – Вип.1 (17) – С. 35–45.
4. Башинская О.Ю. Численное моделирование циклического температурного режима эксплуатации в ПК «ЛИРА-САПР» / Башинская О.Ю., Барабаш М.С., Пикуль А.В.// Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2017. – Вип.67– С. 13-19.
5. Varabash M. Methods of modeling of composite materials and composite structures on «LIRA-SAPR» / Varabash M., Genzerskyi I., Pikul A., Bashynska O.// Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – 2017. – № 1(48) – С. 129–137. (Index Copernicus).

### **Публікації у закордонних наукових періодичних виданнях**

6. Барабаш М.С. Моделирование усиления конструкций композитными материалами в ПК «ЛИРА-САПР» / Барабаш М.С., Пикуль А.В., Башинская О.Ю. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2017. – Vol. 13, Issue 1. – С.34-41.

### **Публікації у збірниках праць за матеріалами конференцій**

7. Башинська О.Ю. Обзор существующих методов решения задачи равновесия упруго-ползучей среды / О.Ю. Башинська // II-й міжнародний науково-практичний конгрес «Міське середовище ХХІ ст. Архітектура. Будівництво. Дизайн»: збірник тез. – Київ, 2016. – С. 137 – 138.
8. Башинська О.Ю. Методика определения деформаций ползучести на примере мостовых конструкций / М.С. Барабаш, О.Ю. Башинська // Робоча програма та тези доповідей науково-практичної конференції «Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції». – Київ, 2016. – С. 24.
9. Башинська О.Ю. Построение и анализ расчетных моделей с учетом влияния ползучести / О.Ю. Башинська // I міжн. наук.-практ. конференція «Сучасні

- методи і проблемно орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій. Їх застосування у проектуванні і навчальному процесі»: збірник тез. – Київ, 2017. – С. 23 – 26.
10. Башинська О.Ю. Создание расчетной модели с учетом воздействия огня и влияния ползучести / О.Ю. Башинська // II міжн. наук.-практ. конференція «Сучасні методи і проблемно орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій. Їх застосування у проектуванні і навчальному процесі»: збірник тез. – Київ, 2018. – С. 26 – 29.
  11. Башинская О.Ю. Учёт деформаций усадки и ползучести в мостовых сооружениях / О.Ю. Башинская // Сборник статей 19-й конференции молодых ученых «Наука - будущее Литвы». Инженерия транспорта и организация перевозок. – С. 120–124.

#### **Публікації в інших наукових виданнях**

12. Барабаш М. С. Методика определения деформаций ползучести на примере мостовых конструкций / М. С. Барабаш, О. Ю. Башинська, Р. М. Запоточний // Містобудування та територіальне планування. – 2016. – №61. – С. 147 – 154.

#### **АНОТАЦІЯ**

**Башинська О.Ю. Створення розрахункових моделей будівельних конструкцій при врахуванні реологічних властивостей залізобетону. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Національний авіаційний університет МОН України. – Київ, 2019 р.

Дисертація присвячена розробці методики розрахунку залізобетонних конструкцій на основі подвійного степеневого закону, із врахуванням впливу фізичної нелінійності та реологічних властивостей бетону, а також, із врахуванням впливу зміни температури оточуючого середовища та при розрахунку на вогнестійкість.

Розроблена універсальна методика для чисельного розрахунку залізобетонних елементів конструкцій, що дозволяє врахувати вплив зміни температури в перерізі елементів на зниження механічних та деформаційних властивостей матеріалів. Також, розроблено алгоритм визначення деформацій конструкції із врахуванням виникнення деформацій повзучості на основі подвійного степеневого закону.

Вдосконалено алгоритм визначення функції повзучості при врахуванні впливу зміни температури оточуючого середовища. Отримані рівняння і розроблена методика розрахунку плит перекриття при впливі температурних факторів, та із врахуванням в'язкопружнопластичності бетону.

Набула подальшого розвитку математична модель, що дозволяє врахувати зміну температури навколишнього середовища та її вплив на розвиток нелінійних деформацій, із врахуванням зниження міцнісних та деформаційних характеристик матеріалу.

Запропоновану методику можна використовувати при проектуванні будівель та споруд, в яких можуть проявлятися деформації повзучості. Виконані чисельні експерименти дозволяють визначити небезпечні фактори, що характеризують можливу зміну умов експлуатації будівлі (збільшення пластичних деформацій або високотемпературні впливи тощо). Наведені алгоритми розрахунку конструкції можуть бути використані при повторному перерахунку будівель та споруд, що зазнали вогневого впливу.

Результати дослідження можна використовувати при удосконаленні стандартів у рамках забезпечення конструктивної безпеки будівель та споруд у випадку впливу високих або підвищених температур.

**Ключові слова:** залізобетонні конструкції, нелінійність, реологічні властивості залізобетону, метод скінчених елементів, вогнестійкість, нестационарна теплопровідність.

## АННОТАЦИЯ

**Башинская О.Ю. Создание расчётных моделей строительных конструкций при учёте реологических свойств железобетона. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. – Национальный авиационный университет МОН Украины. – Киев, 2019.

Диссертация посвящена разработке методики расчета железобетонных конструкций на основе двойного степенного закона, с учетом влияния физической нелинейности и реологических свойств бетона, а также с учетом влияния изменения температуры окружающей среды и при расчете на огнестойкость.

Разработана универсальная методика для численного расчета железобетонных элементов конструкций позволяет учесть влияние изменения температуры в сечении элементов на снижение механических и деформационных свойств. Также, разработан алгоритм определения деформаций конструкции с учетом возникновения деформаций ползучести на основе двойного степенного закона.

Усовершенствован алгоритм определения функции ползучести при учете влияния изменения температуры окружающей среды. Полученные уравнения и разработана методика расчета плит перекрытия при воздействии температурных факторов, и с учетом вязкоупругопластичности бетона.

Получила дальнейшее развитие математическая модель, позволяющая учесть изменение температуры окружающей среды и ее влияние на развитие нелинейных деформаций, с учетом снижения прочностных и деформационных характеристик материала.

Предложенную методику можно использовать при проектировании зданий и сооружений, в которых могут проявляться деформации ползучести. Выполнены многочисленные эксперименты позволяют определить опасные факторы, характеризующие возможную смену условий эксплуатации здания (увеличение пластических деформаций или высокотемпературные воздействия и т.д.). Приведенные алгоритмы расчета конструкции могут быть использованы при повторном пересчете зданий и сооружений, подвергшихся огневому воздействию.

Результаты исследования можно использовать при усовершенствовании стандартов в рамках обеспечения конструктивной безопасности зданий и сооружений в случае воздействия высоких или повышенных температур.

**Ключевые слова:** железобетонные конструкции, нелинейность, реологические свойства железобетона, метод конечных элементов, огнестойкость, нестационарная теплопроводность.

## ABSTRACT

**Bashynska O. Creation of analytical models of constructions taking into consideration the concrete rheological properties. – On the manuscript.**

The dissertation for obtaining a scientific degree of the candidate of technical sciences on the specialty 05.23.01 – Building Constructions. – National Aviation University of the Ministry of Education and Science of Ukraine. – Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the development of a methodology for calculating reinforced concrete structures based on a double power law, taking into account the influence of physical nonlinearity and rheological properties of concrete, as well as taking into account the effect of changes in ambient temperature and when calculating the fire resistance.

A universal technique has been developed for the numerous calculations of reinforced concrete structural elements that allows to take into account the effect of temperature variation in the cross section of elements on the reduction of mechanical and deformation properties. Also, an algorithm has been developed for determining the deformations of a structure, taking into account the occurrence of creep deformations based on a double power law.

It improved an algorithm for determining the function of creep, taking into account the influence of changes in ambient temperature. It obtained the equations and the method of calculating the floor slabs when exposed to temperature factors, and taking into account the viscoelastoplasticity of concrete.

A mathematical model was further developed, allowing to take into account the change in the ambient temperature and its influence on the development of nonlinear deformations, taking into account the reduction of the strength and deformation characteristics of the material.

The proposed technique can be used in the design of buildings and structures in which creep deformations can occur. Completed numerous experiments allow us to determine the dangerous factors that characterize a possible change in the operating conditions of a building (increased plastic deformations or high-temperature effects, etc.). The above design calculation algorithms can be used when recalculating buildings and structures subjected to fire impact.

The results of the study can be used to improve standards in the framework of ensuring the constructive safety of buildings and structures in case of exposure to high or elevated temperatures.

**Keywords:** concrete structures, nonlinearity, rheological properties of reinforced concrete, finite element method, fire resistance, unsteady thermal conductivity.