

¹ **В.Б. Крицький**, к.т.н., начальник відділу, orcid: 0000 0002 67244 5884;

² **Ю.В. Гензерський**, к.т.н., заступник директора, orcid: 0000 0003 1957 1236;

³ **В.П. Максименко**, к.т.н., завідувач лабораторією, orcid: 0000 0002 7684 9495;

⁴ **Н.І. Крицька**, молодший науковий співробітник, orcid: 0000-0002-6550-6980.

¹ АТ «Київський науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут «Енергопроект»» (АТ КІЕП), м. Київ, Україна;

² ТОВ «ЛІРА САПР», м. Київ, Україна;

³ ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельного виробництва» (ДП ДНДІБВ), м. Київ, Україна;

⁴ ДП «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки» (ДП ДНТЦ ЯРБ), м. Київ, Україна

РОЗРАХУНКОВО-МОДЕЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ПРОГНОЗОВАНИХ ДЕСТРУКЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В БЕТОНІ НА НЕСУЧУ СПРОМОЖНІСТЬ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Анотація: *Виявлення в останні роки в США деструкційних процесів в бетоні гідротехнічних споруд (гребель) і залізобетонних захисних оболонок (ЗО) – контайнментів – реакторних відділень (РО) АЕС обумовило велику зацікавленість і увагу до відповідних процесів, як до явищ/факторів, що здатні суттєво погіршити безпеку експлуатації відповідальних об'єктів, зокрема призвести до недотримання вимог з ядерної та радіаційної безпеки до експлуатації ядерних установок в умовах технологічних аварійних впливів і сейсмічних подій. Означене питання актуальне і для України, де функціонують (експлуатуються) 15 енергоблоків АЕС, а ще два енергоблоки вже тривалий час перебувають в стадії добудови.*

Слід зазначити, що відомі на поточний час технології моніторингу технічного стану будівельних конструкцій (БК) не мають інструментальних засобів неруйнівного контролю БК, які дозволяють достовірно визначити належність бетону внутрішнього об'єму БК до деградованого стану, а тим більше коректно ідентифікувати межі зон деградації, фізико-хімічний механізм виникнення і прогресування деградації, стадію розвитку (еволюції) процесу деструкції матеріалу тощо.

Окрім того, в науково-технічній літературі з будівельного матеріалознавства практично відсутня придатна для застосування інженерами-практиками інформація щодо фізико-механічних властивостей деградованого бетону залежно від притаманних йому фізико-хімічного механізму деградації і стадії розвитку (еволюції) процесу його деструкції.

Зважаючи на наявність вищезначеної проблеми – практичну відсутність інструментальних засобів і технологій виявлення і оцінки впливу внутрішніх масивів пошкодженого бетону на загальну працездатність БК групою фахівців – авторами статті – в рамках пошукового дослідження був розроблений і апробований розрахунково-модельний підхід щодо визначення рівня втрати працездатності (несучої спроможності) досліджуваної конструкції у випадку і в умовах постульованої – найбільш імовірної і небезпечної конфігурації геометричних і фізико-хімічних параметрів, притаманних структурно пошкодженому бетону в зоні його локалізації в БК. Вказаний підхід – формалізований як розрахунково-модельна технологія/процедура – передбачає реалізацію певного обчислювального алгоритму, опис і результати практичної апробації якого наведені в публікації.

Ключові слова: *бетон, будівельні конструкції, корозія, деградація, деструкція бетону, зона деградації, працездатність, несуча спроможність, розрахунково-модельна технологія.*

Вступ

Виявлення в останні роки в США деструкційних процесів в бетоні гідротехнічних споруд (гребель) і залізобетонних захисних оболонок (ЗО) – контайнментів – реакторних відділень (РО) АЕС [1] обумовило велику зацікавленість і увагу до відповідних процесів, як до явищ/факторів, що здатні суттєво погіршити безпеку експлуатації відповідальних об'єктів, зокрема призвести до недотримання вимог з ядерної та радіаційної безпеки до експлуатації ядерних установок в умовах технологічних аварійних впливів і сейсмічних подій. Означене питання актуальне і для України, де функціонують (експлуатуються) 15 енергоблоків АЕС, а будівельні кон-

струкції ще двох енергоблоків вже тривалий час (кілька десятиліть) перебувають в стадії добудови і протягом означеного періоду залишаються незахищеними від безпосереднього впливу усієї сукупності несприятливих кліматичних факторів.

Фізико-хімічні особливості застосованого при виготовленні БК бетону (види цементу, домішок, заповнювачів, питомих співвідношення компонентів в бетонній суміші, прийняте водоцементного співвідношення тощо), умови бетонування і твердіння (зокрема, інтенсивність тепловиділення, можливість або обмеження температурного деформування, усадки тощо), вплив зовнішніх температурно-вологісних факторів та інших кліматичних та технологічних

впливів здатні при певному сполученні стати передумовами виникнення і розвитку в бетоні таких процесів деструкції цементного каменю, як:

- реакція внутрішнього набухання;
- лужно-силікатна реакція;
- відкладена формація еtringіту;
- магнезіальна корозія;
- сульфатна корозія з участю таумаситу;
- вуглекисла корозія (корозія карбонізації)

тощо.

Слід зазначити, що відомі на поточний час технології моніторингу технічного стану будівельних конструкцій (БК) не мають інструментальних засобів неруйнівного контролю БК, які дозволяють достовірно визначити належність бетону внутрішнього об'єму БК до деградованого стану, а тим більше коректно ідентифікувати межі зон деградації, фізико-хімічний механізм виникнення і прогресування деградації, стадію розвитку (еволюції) процесу деструкції матеріалу тощо.

В означених умовах, як уявляється, єдиним доступним засобом оцінки впливу очікуваних деструкційних процесів в бетоні на безпеку експлуатації будівельних конструкцій є постулювання наявності в БК певних зон деструкції бетону, який деградував за одним з вищезначених механізмів, і оцінити вплив наявності цих зон на несучу спроможність досліджуваної БК. Можливі варіанти розташування таких постульованих зон деградації в найбільш поширених конструкціях-прототипах «балка», «плита», «оболонка» наведені на Рис. 1

Мета, основні зміст і результати досліджень

Зважаючи на наявність вищевикладеної проблеми метою виконаної роботи є розробка і апробація концепції розрахункової технології оцінки впливу прогнозованих деградаційних процесів в бетоні на

несучу спроможність будівельних конструкцій. Вказана концепція – розрахункова технологія/процедура передбачає реалізацію наступного алгоритму:

1) постулювання в об'ємі БК зони/зон деградації з заданими (найбільш очікуваними/імовірними) положенням, габаритами (просторовою геометрією), механізмом деградації і стадією розвитку (еволюції) процесу деструкції;

2) розробка в програмному засобі (ПЗ), призначеному для механіко-міцнісних розрахунків БК методом скінчених елементів (МСЕ) – в нашому випадку ПЗ «ЛІРА САПР» [2] – МСЕ-моделі БК, зокрема, МСЕ-моделі постульованої в об'ємі БК зони деградації;

3) призначення фізико-механічних характеристик (ФМХ) для матеріалу основного («здорового») бетону БК і для матеріалу ЗД; для ЗД – характеристик, притаманних обраній для розгляду стадії (етапу) розвитку (еволюції) процесу деструкції;

4) виконання механіко-міцнісних розрахунків МСЕ-моделі і визначення дефіциту або запасу несучої спроможності БК для випадків призначення зони деградації:

«4) а» ФМХ основного («здорового») бетону БК;

«4) б» ФМХ матеріалу ЗД, притаманних обраній для розгляду стадії (етапу) розвитку (еволюції) процесу деструкції

5) порівняння розрахованого запасу або дефіциту несучої спроможності БК для випадків «4) а» і «4) б» і складання висновку про вплив постульованої ЗД на несучу спроможність об'єкту для обраних до розгляду етапу експлуатації БК і еволюційного стану матеріалу ЗД.

Результати апробації вищезначеної концепції (розрахункової технології) на тестовій БК – бетонній балці в умовах чистого згину з зоною деградації

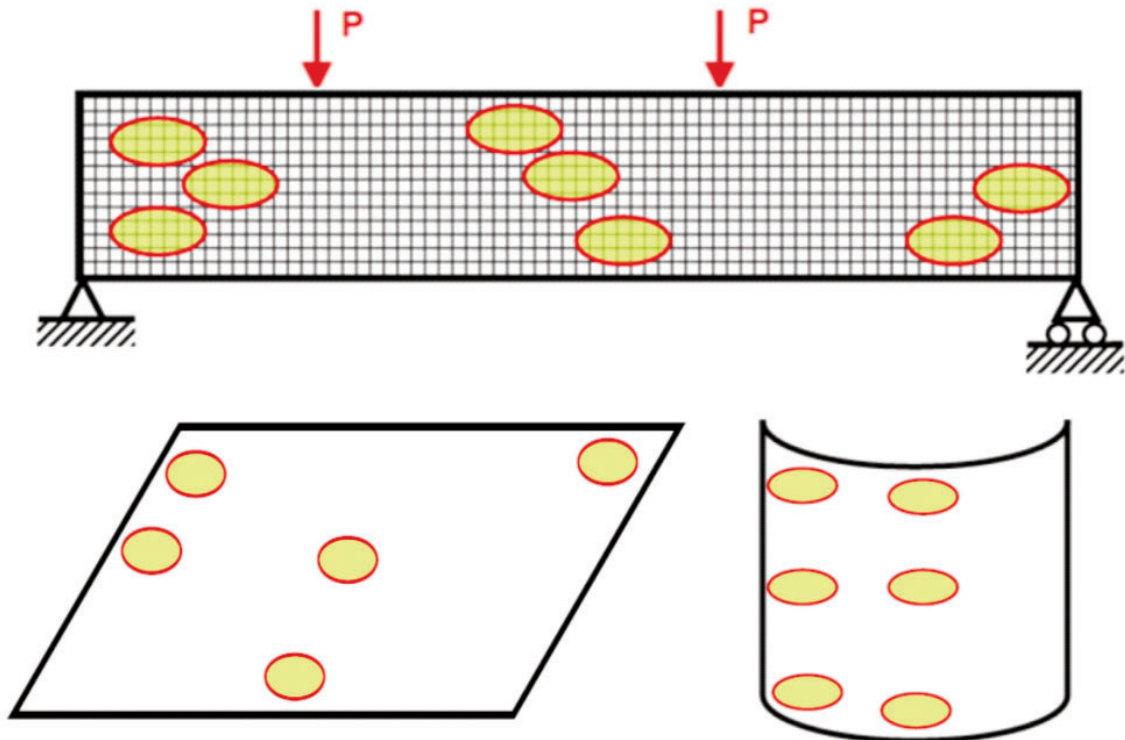


Рис. 1. Можливі варіанти локалізації постульованих зон деградації в конструкціях-прототипах «балка», «плита», «оболонка»

тривимірної еліпсоїдної конфігурації в середині прогону для механізму деградації «сульфатна корозія» згідно [3-5] продемонстровані нижче:

1) Крок 1 алгоритму. Створена в інтегрованому середовищі ПЗ «ЛІРА САПР» [2] скінченоелементна модель (МСЕ-модель) конструкції-прототипу «Балка», діючі на конструкцію навантаження і постульоване розрахункове положення потенційних зон деградації бетону наведені на Рис. 2 нижче.

Для забезпечення прийнятної гладкості функцій розподілу параметрів напружено-деформованого стану (НДС) бетону при моделюванні описаних деградаційних зон, моделювання балки здійснювалось достатньо густою сіткою скінчених елементів (СЕ). Параметри МСЕ-моделі конструкції-прототипу «Балка» наступні:

кількість СЕ – 60000 шт.;

кількість вузлів – 68541 шт.;

кількість невідомих розв'язуючої системи рівнянь МСЕ – 205623 шт.;

астрономічний час розрахунку однієї постановки задачі – від 5-ти до 8-ми хвилин залежно від ступеню завантаження процесора комп'ютера іншими задачами.

2) Крок 2 алгоритму. Конфігурація зони деградації бетону в складі МСЕ-моделі досліджуваної конструкції-прототипу «Балка» була прийнята типової «пухлинної» форми – у вигляді тривимірної еліпсоїду повністю прихованого в середині габаритів «Балки» під поверхневим шаром «здорового» бетону. Просторове зображення реалізованої МСЕ-моделі зони деградації в складі МСЕ-моделі наведено на Рис. 3 нижче.

3) Крок 3 алгоритму. Оскільки, як вказано вище, на поточний час відсутні систематизовані або нормативно затверджені відомості щодо фізико-механічних властивостей деградованого бетону, залежність механічних властивостей – опору (пружності, жорсткості, міцності) деградованого бетону –

прийнята для досліджуваного випадку залежно від терміну (кількості років) експлуатації БК на підставі результатів досліджень, викладених в джерелах [3-5], і має для випадку сульфатної корозії конфігурацію, наведену на Рис. 4 нижче.

4) Крок 4 алгоритму. За результатами виконання механіко-міцнісних розрахунків досліджуваної конструкції-прототипу «Балка» були отримані (див. Рис. 5, Рис. 6) функції зміни максимальних значень параметрів НДС неуразеного бетону залежно від ступеню залишкового опору (пружності, жорсткості, міцності) деградованого бетону.

Результати апробації вищезначеної концепції на тестовій БК – конструкції-прототипі «Балка» в умовах чистого згину з ЗД тривимірної еліпсоїдної конфігурації в середині прогону для механізму деградації «сульфатна корозія» згідно [3-5] засвідчили наступне:

1 На початковому – умовно першому, безпечному (зелена зона) етапі еволюція деградаційного процесу – протягом перших 15 ти років експлуатації БК – може призвести до втрати 25-30% опору (пружності, жорсткості) бетону в ЗД і збільшення значення максимального прогину БК на 1%. Таке збільшення максимального прогину знаходиться в межах похибки вимірювання і не може бути зафіксовано візуально. Відповідне зменшення несучої спроможності БК становитиме 10 12%, компенсується типовими проектними коефіцієнтами запасу і, відповідно, можна стверджувати, що в зазначений період еволюція деградаційного процесу практично не впливає на несучу спроможність БК і не вимагає обов'язкового призначення спеціальних заходів з моніторингу можливого негативного впливу наявних ЗД.

2 На середньому – умовно другому, передкритичному (жовта зона) етапі еволюція деградаційного процесу – протягом 15 20 років експлуатації БК – може призвести до втрати 70 75% опору (пружності, жорсткості) бетону в ЗД і збільшення значення мак-

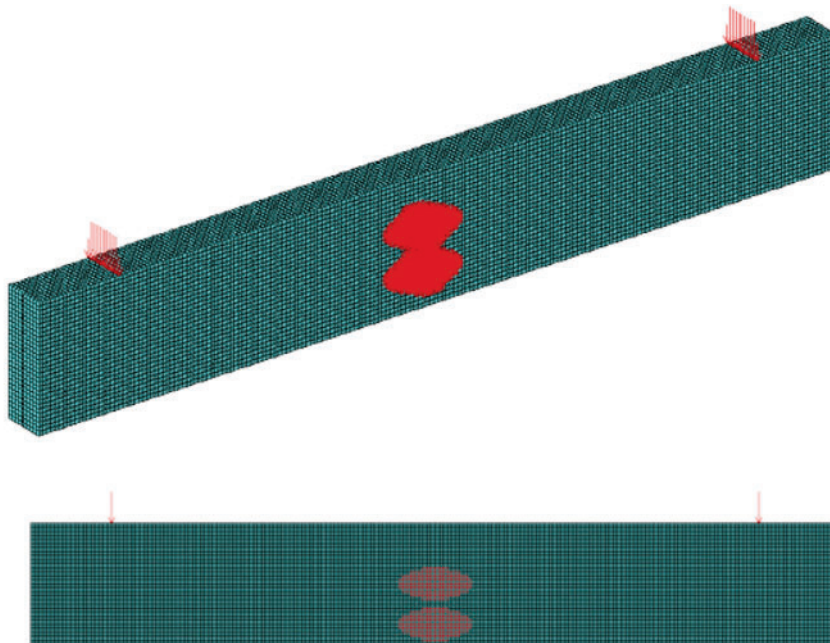


Рис. 2. Досліджена МСЕ-модель конструкції-прототипу «Балка», діючі на конструкцію навантаження і постульоване розрахункове положення потенційних зон деградації бетону

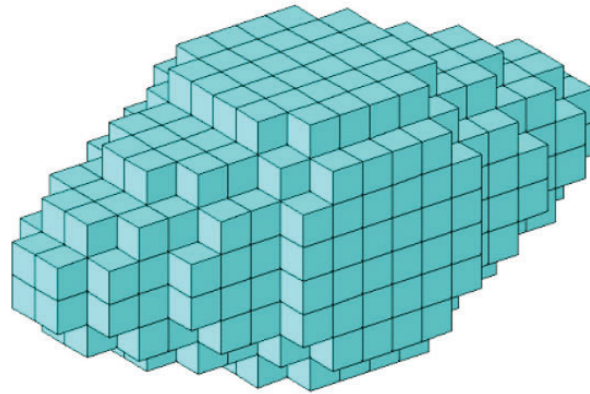


Рис. 3.Просторова MSE-модель зони деградації бетону – у вигляді тривимірного еліпсоїду – в складі MSE-моделі досліджуваної конструкції-прототипу «Балка»

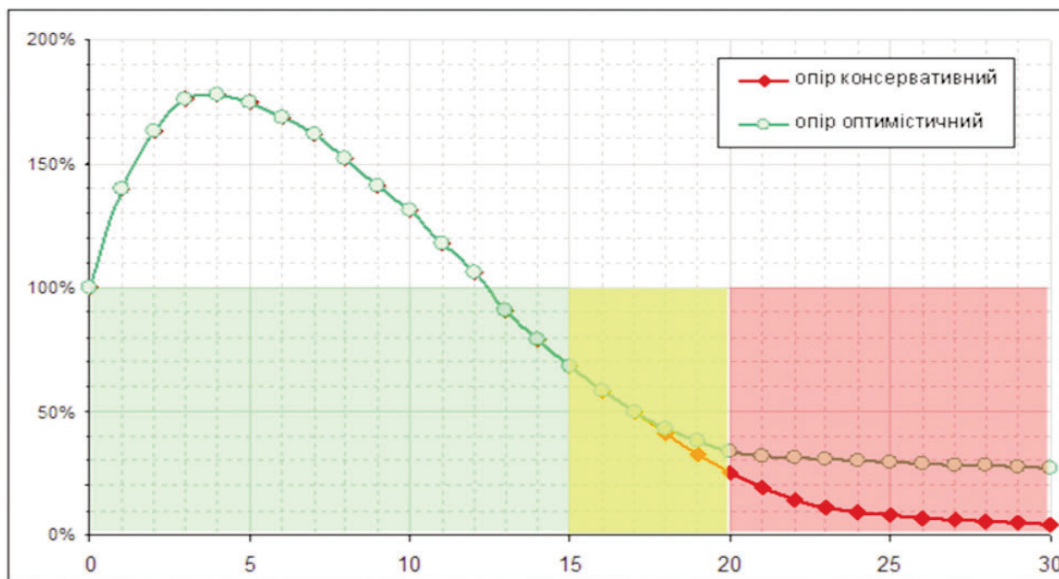


Рис. 4. Прийнята в дослідженні залежність (від кількості років експлуатації БК) зміни (зниження) механічних властивостей – опору (пружності, жорсткості, міцності) – ураженого бетону для випадку сульфатної корозії

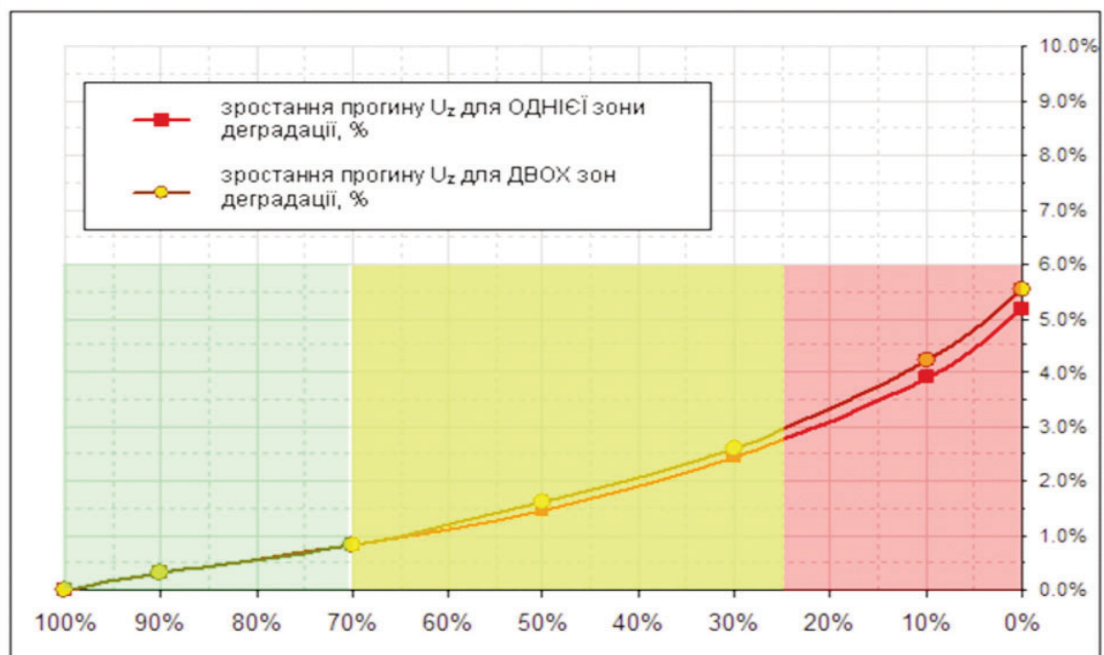


Рис. 5. Визначені за результатами розрахунків функції зміни (зростання) максимальних значень параметрів НДС (прогину) конструкції-прототипу «Балка» залежно від ступеню зміни (зниження) механічних властивостей – втрати опору (пружності, жорсткості, міцності) – ураженого бетону для випадку сульфатної корозії

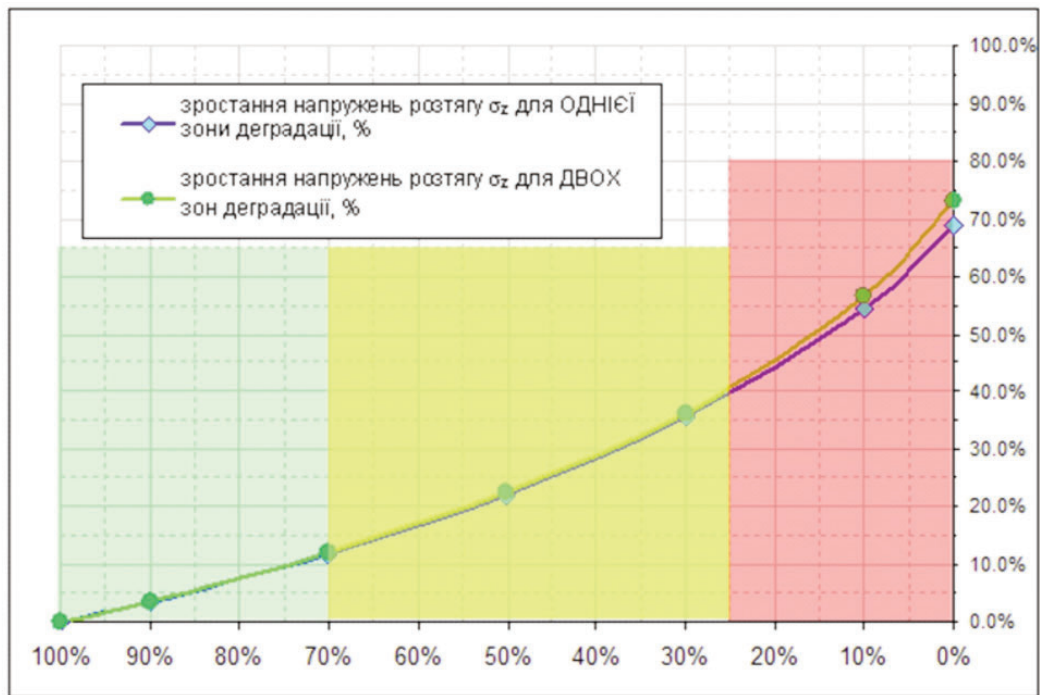


Рис. 6. Визначені за результатами розрахунків функції зміни (зростання) максимальних значень параметрів НДС (напружень розтягу) конструкції-прототипу «Балка» залежно від ступеня зміни (зниження) механічних властивостей – втрати опору (пружності, жорсткості, міцності) – ураженого бетону для випадку сульфатної корозії

симального прогину БК на 3-4%. Таке збільшення максимального прогину вже може бути зафіксовано візуально і є ознакою необхідності проведення інструментального обстеження БК. Відповідне зменшення несучої спроможності БК становить 35-40% може перевищити позитивний вплив проектних коефіцієнтів запасу. Таким чином, в зазначений період еволюція деградаційного процесу може суттєво негативно вплинути на несучу спроможність БК і вимагає впровадження спеціальних заходів з моніторингу можливого негативного впливу наявних ЗД інструментальними засобами.

3 На фінальному (заключному) – умовно третьому, критичному (червона зона) етапі еволюція деградаційного процесу – протягом 20-30 років експлуатації БК – може призвести до втрати 90-100% опору (пружності, жорсткості) бетону в ЗД і збільшення значення максимального прогину БК до 5.5%. Таке збільшення максимального прогину вже може бути зафіксовано візуально і є ознакою необхідності проведення інструментального обстеження БК. Відповідне зменшення несучої спроможності БК становитиме 70-75%. В зазначений період еволюція деградаційного процесу практично гарантовано негативно вплине на несучу спроможність БК і вимагає реалізації спеціальних заходів з підсилення БК.

Висновки і рекомендації

1 Аналіз науково-технічної літератури з будівництва свідчить, що на поточний час в Україні практично відсутні дослідження щодо впливу деградаційних процесів в бетоні на несучу спроможність відповідальних БК і споруд.

2 Відомі на поточний час технології моніторингу технічного стану будівельних конструкцій не

мають інструментальних засобів неруйнівного контролю БК, які дозволяють достовірно визначити належність бетону внутрішнього об'єму БК до деградованого стану, а тим більше коректно ідентифікувати межі зон деградації, фізико-хімічний механізм виникнення і прогресування деградації, стадію розвитку (еволюції) процесу деструкції матеріалу тощо.

3 Отримані результати свідчать про актуальність виявлення деградаційних процесів у бетоні в рамках зеленої зони та суміжної із зеленою частині жовтої зони з метою завчасного визначення наявності, меж локалізації та ступеня еволюції зон деградації, а також з метою вчасної розробки комплексу заходів щодо забезпечення несучої здатності конструкції у зазначених умовах – особливо у правій частині жовтої зони та у червоній зоні.

4 В означених вище в пп. 1, 2, 3 умовах запропонована в цій публікації і апробована розрахунково-модельна технологія оцінки впливу прогнозованих деструкційних процесів в бетоні на несучу спроможність будівельних конструкцій імовірно є єдиним практично реалізованим підходом щодо виконання коректної оцінки безпеки експлуатації відповідальних БК і споруд підвищеної небезпеки.

5 Доцільно продовжити викладені в публікації дослідження для інших, ніж розглянута конструкція-прототип «Балка», типових залізобетонних конструкцій, а також реальних відповідальних споруд, що тривалий час перебувають в експлуатації.

6 За результатами означених досліджень уявляється перспективною розробка галузевих рекомендацій стосовно розрахункової оцінки впливу прогнозованих деструкційних процесів в бетоні на несучу спроможність відповідальних будівельних конструкцій і споруд.

Література

- 1 Victor E. Saouma, Mohammad Amin Hariri-Ardebili. *Seismic capacity and fragility analysis of an ASR-affected nuclear containment vessel structure // Nuclear Engineering and Design.* – № 346 (2019), 2019. – pp. 140-156.
- 2 Программный комплекс ЛИРА-САПР®. Версия «ЛИРА САПР 2018». Паспорт программного комплекса. – К.: ООО «ЛИРА САПР», 2018. – 13 с.
- 3 Москвин В.М. и др. *Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты.* – М.: «Стройиздат», 1980. – 536 с.
- 4 Иванов Ф.М. и др. *Долговечность железобетона в агрессивных средах.* – М.: «Стройиздат», 1990. – 320 с.
- 5 Бардах О.Ю. *Довговічність бетону в умовах дії сульфатних розчинів і температури // Автореферат дис. на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.* – Дніпро, 2021. – 23 с.

Reference

- 1 Victor E. Saouma, Mohammad Amin Hariri-Ardebili. *Seismic capacity and fragility analysis of an ASR-affected nuclear containment vessel structure // Nuclear Engineering and Design.* – № 346 (2019), 2019. – pp. 140-156.
- 2 Программный комплекс LYRA-SAPR®. Версия «LYRA SAPR 2018». Паспорт программного комплекса. – К.: ООО «LYRA SAPR», 2018. – 13 с.
- 3 Moskvyn V.M. y dr. *Korroziya betona y zhelezobetona, metody ykh zashchyty.* – M.: «Stroiizdat», 1980. – 536 s.
- 4 Ivanov F.M. y dr. *Dolhovечnost zhelezobetona v ahressyvnnykh sredakh.* – M.: «Stroiizdat», 1990. – 320 s.
- 5 Bardakh O.Yu. *Dozhovіchnіst betonu v umovakh діi sulfatnykh rozchyniv i temperatury // Avtoreferat dys. na zdobuttia naukovoho stupenia kandydata tekhnichnykh nauk.* – Dnipro, 2021. – 23 s.

¹ V.B.Krytskyi, PhD, Chief of Department of JSV, orcid: 0000 0002 67244 5884;

² I.V.Genzerskyi, PhD, Deputy of Director, orcid: 0000 0003 1957 1236;

³ V.P.Maksimenko, PhD, Chief of Laboratory, orcid: 0000 0002 7684 9495;

⁴ N.I. Krytska, junior researcher, orcid: 0000-0002-6550-6980

¹ «Kyiv Scientific-Research and Design Institute «Energoproject»» (JSV KIEP), Kyiv, Ukraine

² «LIRA SAPR» Ltd., Kyiv, Ukraine

³ SE «The State Scientific-Research Institute of Building Production» (SE SSRIBP), Kyiv, Ukraine

⁴ SE «The State Scientific Technical Center for Nuclear and Radiation Safety» (SE SSTC NRS), Kyiv, Ukraine

COMPUTATIONAL-MODELING TECHNOLOGY FOR ASSESSING THE IMPACT OF PREDICTED DESTRUCTIVE PROCESSES IN CONCRETE ON THE BEARING CAPACITY OF BUILDING STRUCTURES

Abstract: *The discovery in recent years in the United States of the destructive processes in concrete of hydraulic structures (dams) and reinforced concrete contaminants of reactor halls of NPPs has led to great interest and attention to relevant processes as phenomena / factors that can significantly impair operational safety of facilities, in particular to lead to non-compliance with the requirements of nuclear and radiation safety for the operation of nuclear installations under the event of technological emergencies as well as under seismic influences. This issue is also relevant for Ukraine, where there are 15 NPP units under operation, and also more two units during a long time are under construction.*

It should be noted that currently known technologies for monitoring the technical state of building structures (BS) do not have tools for non-destructive testing of BS, which allow to reliably determine the belonging of the concrete of internal volume of BS to the degraded state and even more identify correctly the boundaries of degradation zones, the physical-chemical mechanism of occurrence and progression of degradation, the stage of development (evolution) of the process of the material destruction, etc.

Taking into account the above mentioned problem - the practical lack of tools and technologies to detect and assess the impact of internal massifs of damaged concrete on the overall serviceability of BS - the authors of article (in frames of the search study) have elaborated and approbated the calculative-model approach of determining of the degree of loss of serviceability (bearing capacity) of investigated structure for the case of the postulated conditions - the most probable and dangerous totality of geometric and physicochemical parameters inherent in structurally damaged concrete in the area of its localization in the BS. This approach - formalized as a computational-modeling technology / procedure - involves the implementation of a certain computational algorithm, the description and results of practical approbation of which are presented in the publication.

Key words: *concrete, building structures, corrosion, degradation, destruction of concrete, zone of degradation, serviceability, bearing capacity, computational-modeling technology.*