УДК 691.32 doi.org/10.31717/2311–8253.21.1.3

Я. А. Жигалов[1], В. В. Інюшев[1], В. О. Посох[1], С. А. Вижва[2], І. І. Онищук[2]

[1] ДП «Державний науково-інженерний центр систем контролю та аварійного реагування», просп. Героїв Сталинграда, 64/56, Київ, 04213, Україна
[2] Науково-дослідна лабораторія теоретичної і прикладної геофізики Навчально-наукового інституту «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка, вул. Васильківська, 90, Київ, 03022, Україна

Експериментальні дослідження повітропроникності бетону стиснутої зони захисної оболонки енергоблоків № 1 і 2 ВП «Южно-Українська АЕС»

Ключові слова:
повітропроникність,
бетон,
керн,
захисна оболонка,
атомна електростанція,
продовження терміну
експлуатації.

Розглянуто підходи до визначення локалізуючої здатності (повітропроникності) бетону стиснутої зони захисної оболонки (ЗО) енергоблоків АЕС з реакторами типу ВВЕР-1000 в умовах впливу надлишкового тиску повітря за максимальної проектної аварії. Описано створену випробувальну установку для експериментальних досліджень повітропроникності бетону методом стаціонарної радіальної фільтрації та наведено результати експериментальних досліджень повітропроникності бетону на цій установці для зразків-імітаторів, що моделюють за складом бетон, який використовувався під час будівництва ЗО енергоблоків № 1 і 2 (серії В-302 і В-338 відповідно) ВП «Южно-Українська АЕС» (ВП «ЮУАЕС»). Виконано порівняльний аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень із результатами експериментально-теоретичних робіт з дослідження повітропроникності аналогічних зразків-імітаторів бетону методом стаціонарної лінійної фільтрації, а також зразків бетону, відібраних безпосередньо зі стиснутої зони ЗО енергоблока № 2 ВП «ЮУАЕС». Отримані результати обумовлені процесами ущільнення структури бетону в умовах складного напруженого стану, що виникає за специфічних умов тверднення і тривалого стиснення попередньо напруженими арматурними канатами, що має місце в умовах реальної експлуатації ЗО енергоблоків АЕС. Зроблено висновок, що виготовлені за прийнятою наразі технологією зразки-імітатори не можуть забезпечити коректне визначення локалізуючої здатності ЗО, оскільки умови та час твердіння бетону ЗО енергоблоків АЕС, а також тривала постійна стискуюча дія армоканатів не можуть бути коректно змодельовані в повному обсязі під час формування зразків. Питання створення зразків-імітаторів бетону ЗО енергоблоків АЕС у лабораторних умовах вимагає додаткового вивчення, удосконалення технології та розробки нових підходів з максимальним фізичним моделюванням умов, характерних для експлуатації ЗО.

Вступ

Визначення повітропроникності бетону стиснутої зони захисної оболонки (ЗО) енергоблоків № 1 і 2 ВП «Южно-Українська АЕС» (ЮУАЕС) в умовах впливу силових факторів максимальної проектної аварії — МПА (надлишковий тиск повітря в підоболонковому просторі реакторного відділення, рів-

© Я. А. Жигалов, В. В. Інюшев, В. О. Посох, С. А. Вижва, І. І. Онищук, 2021

не 0,4 МПа [1]) є одним із завдань, виконання якого необхідне для підтвердження локалізуючих функцій ЗО, що є обов'язковою умовою продовження терміну експлуатації енергоблоків.

Згідно з вимогами, що пред'являються до ЗО енергоблоків АЕС, повітронепроникними можна вважати бетони, повітропроникність $G_н$ яких не перевищує величини [1]

$$G_н = 1{,}0 \cdot 10^{-16} \text{ кг/м} \cdot \text{с} \cdot \text{Па}$$

або

$$50 \cdot \frac{\text{см}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{ год} \cdot 0{,}4 \text{ МПа}} \cdot \quad (1)$$

Ця величина, розрахована за умови допустимого значення швидкості витоку газу 0,3 % на добу від обсягу ЗО за умов МПА, визначається за тиску повітря 0,4 МПа і, відповідно до [1], повинна бути прийнята як критерій порівняння для визначення допустимої величини повітропроникності бетону стиснутої зони ЗО з реакторами типу ВВЕР-1000.

Таким чином, для обґрунтування безпечної експлуатації енергоблоків № 1 і 2 ВП «ЮУАЕС» у понадпроектний період виникла необхідність визначення локалізуючої здатності бетону ЗО експериментальними дослідженнями за умов, що моделюють силові фактори впливу МПА.

Визначення повітропроникності бетону, згідно з ДСТУ Б В.2.6–37:2008 [2] та ГОСТ 26450.2–85 [3], можна здійснювати двома рівноцінними методами — стаціонарної лінійної фільтрації та стаціонарної радіальної фільтрації повітря через досліджуваний зразок.

Для проведення досліджень в обсязі, достатньому для виконання коректного аналізу, було вирішено кілька складних і взаємопов'язаних завдань, а саме:

виготовлення обладнання та зразків для проведення досліджень локалізуючої здатності бетону, що моделює за складом бетон стиснутої зони ЗО енергоблоків № 1 і 2 ВП «ЮУАЕС» (зразків-імітаторів) методом стаціонарної радіальної фільтрації;

відбір зразків-кернів бетону стиснутої зони ЗО енергоблоків ВП «ЮУАЕС»;

визначення двома вищенаведеними методами повітропроникності вимірювальних зразків бетону, виготовлених зі зразків-імітаторів та зразків-кернів у декількох лабораторіях;

аналіз результатів досліджень локалізуючої здатності бетону ЗО енергоблоків № 1 і 2 ВП «ЮУАЕС».

Дослідження проводилися в рамках виконання договору з ВП «ЮУАЕС».

Вибір складу бетону та виготовлення зразків-імітаторів для проведення експериментальних досліджень

Для проведення експериментальних досліджень повітропроникності бетону необхідно було виготовити зразки, що максимально відповідають складу бетону, фактично вкладеному в ЗО енергоблоків № 1 і 2 ВП «ЮУАЕС» у період будівництва.

З цією метою фахівцями ДП «Державний науково-інженерний центр систем контролю та аварійного реагування» (ДП «ДНІЦ СКАР») на майданчику ВП «ЮУАЕС» були зібрані, проаналізовані та систематизовані документи, що містять вихідні дані про фактичний склад і характеристику бетону ЗО енергоблоків № 1 і 2. Аналіз документації показав, що фактичний склад бетону був спроектований із перевищенням нормативної міцності М400, тобто фактично марка бетону відповідала М500 (С32/40).

Оскільки з моменту будівництва енергоблоків пройшло близько 30 років і якість та показники властивостей цементу й добавок змінилися, на підставі зібраних даних у ДП «Науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (ДП «НДІБК») були підібрані три найбільш консервативні склади бетону, що моделюють бетон, укладений у ЗО енергоблоків ВП «ЮУАЕС» № 1 і 2 з найбільшою витратою цементу марки М400 [4]. Слід зазначити, що запропоновані склади бетону, згідно з [4], розрізнялися як меншими, так більшими витратами цементу від фактичного складу (Ц = 520 кг/м^3), але їхня міцність на стиск відповідає міцності бетону ЗО (табл. 1).

Таблиця 1. Склади бетону для виготовлення зразків-імітаторів

№ складу	Витрата компонентів на 1 м^3 бетону, кг			
	Цемент М400	Пісок	Щебінь фр. 5–20	Вода
1	500	654	1 042	193
2	520	642	1 034	200
3	550	570	1 060	180

Примітки. 1. Бетонна суміш мала рухливість 10–12 см. 2. Витрата добавки лігносульфат (ЛСТ, Centrament N3) 0,2 % від маси цементу (ЛСТ — очищена добавка сульфітно-дріжджової бражки (СДБ), виробляється під торговою маркою Centrament N3). 3. Щебінь фр. 5–20 мм отримували змішуванням 30 % щебеню фр. 5–10 мм з 70 % щебеню фр. 10–20 мм.

Через 28 діб зразки-імітатори (по 4 зразки з кожного складу бетону) було випробувано на міцність під час стиснення. За результатами випробувань і розрахунку міцності за формулою Боломея — Скрамтаєва [5], що зв'язує міцність бетону з його цементно-водним співвідношенням, маркою цементу і якістю наповнювачів, а також згідно з вимогами до міцності бетону марки М400, для проведення досліджень було прийнято склад бетону № 2, для якого коефіцієнт варіації міцності становив 4,1 % [4].

Відповідно до Технічного рішення ТР.1.3812.4141 [6] із цього складу для досліджень повітропроникності було відібрано:

чотири кубічні зразки-імітатори розміром 100×100×100 мм — для випробувань повітропроникності методом лінійної стаціонарної фільтрації;

п'ять кубічних зразків-імітаторів розміром 150×150×150 мм — для випробувань повітропроникності методом радіальної стаціонарної фільтрації.

Згідно з [4], під час виготовлення зразків-імітаторів розміром 100×100×100 мм у форму укладалася бетонна суміш, яка заповнювала її повністю. Під час виготовлення зразків-імітаторів розміром 150×150×150 мм бетонна суміш у форму вкладалася двома шарами: спочатку формувався шар товщиною близько 75 мм, а потім укладалася інша суміш і виконувалося ущільнення. Такий підхід відповідає вимогам [7].

Відбір зразків-кернів бетону зі стиснутої зони ЗО енергоблока № 2 ВП «ЮУАЕС»

На підставі аналізу проектної документації на енергоблоки № 1 і 2 ВП «ЮУАЕС» було встановлено, що з зовнішньої сторони ЗО енергоблоків № 1 і 2 є місця потовщення ЗО, які межують на висотній позначці +16,500 м із приміщеннями ВС 603/1, 2 (трубопровідний коридор 1), ВС 604/1, 2 (трубопровідний коридор 2) і ВС 608/1, 2 (хол перед основним саншлюзом). Товщина стіни ЗО в цих місцях становить 2 200 мм, що на 1 000 мм більше, ніж для інших стін циліндричної частини ЗО, включаючи систему попереднього напруження ЗО. Таким чином, наявність цього потовщення виключає пошкодження поліетиленових каналоутоворювачів під час вибурювання зразків-кернів бетону діаметром 100 мм і висотою від 0,8 до 2 діаметрів.

На підставі Технічного рішення [8] було виконано відбір двох кернів ЗО енергоблока № 2 в місцях із найбільшими відстанями між арматурою діаметром 36 мм. Діаметр кернів 100 мм, висота кернів 120 мм (з урахуванням необхідного доопрацювання після вирізки).

Перед виконанням відбору зразків-кернів у приміщеннях ВС 603/2, ВС 604/2, ВС 608/2 співробітниками ДП «ДНІЦ СКАР» було проведено візуальне обстеження, а також інструментальне визначення місць у ЗО, вільних від арматурних стержнів, і товщини захисного шару бетону методом неруйнівного контролю за допомогою ультразвукового вихрострумового структуроскопа Profometr 4.

Оскільки під час проведення візуального обстеження було встановлено, що в приміщенні ВС 608/2 встановлення обладнання та проведення вибурювання кернів утруднене внаслідок того, що значний простір стіни займає сталевий саншлюз та його база, а також допоміжне обладнання й кабелі, закріплені на стінах на різних висотах, відбір зразків із ЗО проводився у приміщеннях ВС 603/2, ВС 604/2. Відбір кернів здійснювався бурильною установкою з алмазної коронкою, що має внутрішній діаметр 100 мм. Відібрані зразки-керни були промарковані, виміряні, прив'язані до умовних координат і передані в ДП «НДІБК» для виконання лабораторних вимірювань повітропроникності бетону ЗО (рис. 1, табл. 2).

Рис. 1. Зразки-керни захисної оболонки енергоблока № 2 ВП «ЮУАЕС»

Таблиця 2. Характеристики відібраних зразків-кернів бетону ЗО енергоблока № 2

№ з. п.	Шифр (маркер) зразка	Геометричні розміри (діаметр×довжина), мм	Умовні координати
1	ВС 604/2(1)	95×100	Висота від підлоги приміщення ВС 604/2 — 101 см Відстань від стіни приміщення ВС 608/2 (яке примикає) — 173 см
2, 3	ВС 603/2 (1, 2)*	95×250	Висота від підлоги приміщення ВС 603/2 — 85 см Відстань від стіни приміщення ВС 608/2 (яке примикає) — 163 см

* Зразок подвоєної довжини

Створення експериментальної випробувальної установки для визначення повітропроникності бетону методом стаціонарної радіальної фільтрації

На першому етапі проведення досліджень на базі прототипу, наявного в Науково-дослідній лабораторії теоретичної і прикладної геофізики Навчально-наукового інституту «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка, було створено випробувальну установку для проведення вимірювань повітропроникності циліндричних зразків бетону [9]. Під час створення установки було враховано вимоги [1, 5]. Установка має модульну конструкцію, складається з оптимального набору обладнання та вимірювальних приладів, адаптованих для вирішення проблеми оцінки проникності бетону, консолідованих будівельних матеріалів і гірських порід, у ненапружених умовах та в умоовах їхнього розтягування в широкому діапазоні навантажень.

Випробувальна установка конструктивно складається з:

вимірювальної камери, в яку встановлюється циліндричний випробувальний зразок бетону;

керноутримувача, в якому за допомогою епоксидного клею закріплюється випробувальний зразок бетону;

гідравлічного циліндра, за допомогою якого здійснюється герметизація вимірювальної камери і створюється розтягувальне навантаження у зразку (під час випробувань в умовах розтягування, що імітують МПА);

балона зі стисненим газом;

повітряного редуктора;

гідравлічного преса;

кранів та сполучних трубок високого тиску.

Вимірювальна частина випробувальної установки складається з:

цифрового датчика тиску (0–2,5 МПа) для контролю тиску повітря, що подається на зразок;

цифрового датчика тиску (0–6 МПа) для контролю тиску масла в гідравлічному циліндрі;

лабораторного газового лічильника типу ДСБ-400 (або спеціальних тарованих за об'ємом посудин);

секундоміра.

Схему та зовнішній вигляд установки наведено на рис. 2 та 3.

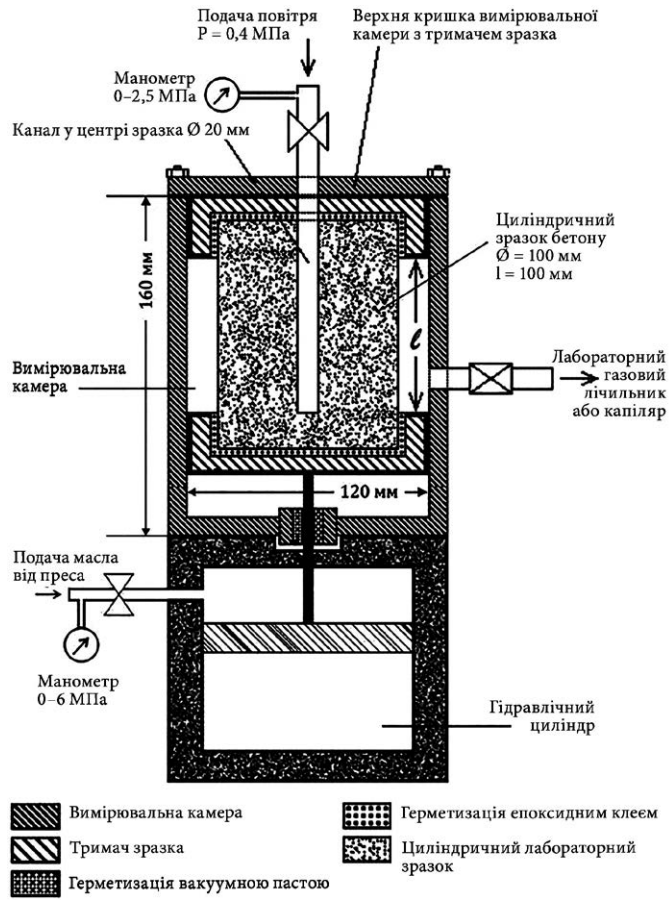

Рис. 2. Схема випробувальної камери (з гідроциліндром) для визначення повітропроникності бетону

Рис. 3. Зовнішній вигляд установки

Підготовка циліндричних вимірювальних зразків для досліджень методом стаціонарної радіальної фільтрації

Для проведення вимірювань бетону зразків-імітаторів кубічної форми розміром 150×150×150 мм вибурюванням, відповідно до вимог [10], алмазною буровою коронкою з внутрішнім діаметром 100 мм було виготовлено циліндричні вимірювальні зразки діаметром 100 мм і висотою 140 мм. Для подачі повітря під тиском 0,4 МПа в центрі вимірювальних зразків вибурювалися отвори діаметром 20 мм. Після відповідної обробки зразки витримували за кімнатної температури 8 діб, періодично зважували у процесі витримки до отримання незмінною маси (рис. 4, табл. 3).

Рис. 4. Циліндричні вимірювальні зразки при зважуванні

Визначення повітропроникності циліндричних вимірювальних зразків методом стаціонарної радіальної фільтрації

Вимірювання проводилися відповідно до вимог [3, 5] і з урахуванням рекомендацій [11–13].

Таблиця 3. Розміри вимірювальних циліндричних зразків, см

Шифр зразка	Зовнішній діаметр	Діаметр отвору	l^*
1 ГНИЦ	9,971	2,047	10,671
2 ГНИЦ	9,972	2,042	10,660
3 ГНИЦ	9,971	2,048	10,759
4 ГНИЦ	9,958	2,065	10,721
5 ГНИЦ	9,961	2,044	10,472

* l — робоча довжина (довжина фільтрації) зразків (див. рис. 2)

Проникність пористих середовищ (у тому числі бетону) кількісно характеризується коефіцієнтом проникності ($K_{пр}$). Визначення $K_{пр}$ бетону виконувалося за формулою, наведеною в [3, 11–13], у двох станах — «вільному» (ненавантаженому) та за розтяжного зусилля 2 кН, що накладається на площу зразка (яке виникає за надлишкового тиску 0,4 МПа в умовах МПА):

$$K_{пр} = \left(\frac{367 \cdot Q \cdot \mu \cdot P_{бар}}{\Delta P \cdot \left(\frac{\Delta P}{2} + P_{бар} \right)} \right) \cdot \frac{\lg \frac{D}{d}}{l}, \qquad (2)$$

де $K_{пр}$ — коефіцієнт проникності в умовах заданого перепаду тиску в зразку, у 10^{-3} мкм^2 (міллідарсі) або в фм^2; D — зовнішній діаметр зразка, см; d — діаметр центрального отвору, см; l — довжина досліджуваного зразка керна, см; $Q = V/T$ — витрата повітря, виміряна на виході зі зразка, см^3/с; V — об'єм повітря, що пройшло через зразок, см^3; T — час фільтрації, с; μ — в'язкість газу за умов фільтрації ($P_{ср}$, t °С), МПа·с; ΔP — перепад тиску на зразку між входом та виходом, у 0,1 МПа; $P_{бар}$ — барометричний тиск, у 0,1 МПа.

Коефіцієнт $K_{пр}$ для кожного вимірювального зразка визначався як середнє арифметичне з ряду вимірювань.

Розрахунок повітропроникності бетону здійснювався на підставі закону Дарсі з використанням $K_{пр}$ для кожного зразка бетону за заданими умовами визначення повітропроникності під час МПА.

Лінійний закон фільтрації Дарсі, згідно з [3, 11–13], описується рівнянням

$$\frac{Q}{F} = K_{пр} \cdot \frac{\Delta P}{\mu \cdot \Delta L}. \qquad (3)$$

Об'єм повітря, який профільтрується через ЗО енергоблоків № 1 і 2 ВП «ЮУАЕС» за умов МПА, розраховувався за формулою

$$V = K_{\text{пр}} \cdot \frac{\Delta P \cdot F \cdot T}{\mu \cdot \Delta L}, \quad (4)$$

де $Q = V/T$ — витрата повітря через площину F, см³/с; V — об'єм повітря, який пройшов через площину F (1 м²); T — час фільтрації (3600 с); μ — в'язкість повітря; ΔP — перепад тиску між входом і виходом для умов МПА (0,4 МПа); ΔL — довжина фільтрації, яка відповідає товщині ЗО енергоблоків № 1 і 2 ВП «ЮУАЕС» (1,2 м).

Середнє арифметичне значення об'єму повітря, що пройшло крізь бетон ЗО, розраховувалося за формулою

$$\bar{V} = \left(\frac{1}{n}\right)\sum_{i=1}^{n} V, \quad (5)$$

де, n — число вимірювань.

Середньоквадратичне відхилення об'єму повітря, що пройшло крізь бетон ЗО, розраховувалося за формулою

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(V_i - \bar{V})^2}{n-1}}, \quad (6)$$

де V_i — значення об'єму повітря, що пройшло крізь бетон ЗО в i-му вимірюванні; n — число вимірювань.

Довірчі границі ε (без урахування знака) випадкової похибки визначень об'єму повітря, що пройшло крізь бетон ЗО, розраховувалися за формулою

$$\varepsilon = t \cdot S, \quad (7)$$

де t — коефіцієнт Стьюдента для довірчого інтервалу $p = 0{,}95$ і числа вимірювань n, визначається за [14].

Відповідність фактичного значення повітропроникності бетону нормованому значенню визначалося, виходячи з умови

$$V \le G_{н}, \quad (8)$$

де $G_{н}$ — нормоване значення повітропроникності бетону огороджувальних конструкцій ЗО енергоблоків АЕС із реакторами типу ВВЕР-1000, наведене у формулі (1).

Результати визначення $K_{\text{пр}}$ для зразків-імітаторів, розрахунків повітропроникності бетону ЗО (для температури 20 °С і $\Delta P = 0{,}4$ МПа без навантаження і під час навантаження, що моделює розтягування ЗО в умовах МПА), а також статистичного і кореляційного аналізів даних наведено в табл. 4.

Результати визначення повітропроникності бетону кубічних вимірювальних зразків-імітаторів та зразків-кернів ЗО енергоблока № 2 ВП «ЮУАЕС» методом стаціонарної лінійної фільтрації

Визначення повітропроникності бетону вимірювальних зразків-імітаторів кубічної форми (розміром 100 ×100 ×100 мм) складу № 2, наведеного в табл. 1, і зразків-кернів, відібраних із ЗО енергоблока № 2 ВП «ЮУАЕС», було виконане у випробувальній лабораторії ДП «НДІБК» відповідно до методики, наведеної в [4]. У цій статті на підставі експериментально визначеного в [4] часу проходження повітря через зразки-імітатори за формулою (1) із роботи [4] розраховано значення повітропроникності бетону цих зразків за тиску повітря 0,4 МПа (табл. 5).

Слід зауважити, що згідно з [4] коефіцієнт варіації повітропроникності бетону кубічних вимірювальних зразків-імітаторів досить високий (16,5 %), що свідчить про дефектність структури бетону. У той же час коефіцієнт варіації міцності зразків-імітаторів бетону в умовах стиснення становить 4,1 %, що свідчить про його хорошу якість.

Перед проведенням досліджень повітропроникності циліндричних зразків-кернів, відібраних зі стиснутої зони ЗО енергоблока № 2 ВП «ЮУАЕС», керн більшої довжини ВС 603/2 (1, 2) був розрізаний на два вимірювальні зразки приблизно однакової довжини. Зразки було пронумеровано в такий спосіб:

керн 1, шифр ВС 604/2 (1) — відповідає глибині 10 см від поверхні ЗО (зона можливого впливу зовнішніх факторів);

керн 2–1, шифр ВС 603/2 (1, 2) — відповідає глибині від 10 до 20 см;

керн 2–2, шифр ВС 603/2 (1, 2) — відповідає глибині від 20 до 30 см.

Визначення ступеня карбонізації бетону за методикою, наведеною в [5], показало, що вона не перевищує 2 мм і, отже, не може мати значного впливу на повітропроникність бетону.

Дослідження проводилися в умовах подачі повітря під тиском 0,4 МПа.

Значення повітропроникності бетону зразків-кернів визначено на підставі наведеного в [4] експериментально виміряного часу проходження повітря через них (табл. 6).

Аналіз результатів досліджень повітропроникності бетону

Як випливає з результатів експериментальних досліджень повітропроникності бетону зразків-імітаторів, виготовлених у лабораторії ДП «НДІБК», обидва методи показали значне перевищення допу-

Таблиця 4. Результати визначення повітропроникності бетону циліндричних зразків

Параметр	Значення параметра	1 ГНИЦ	2 ГНИЦ	3 ГНИЦ	4 ГНИЦ	5 ГНИЦ
Коефіцієнт проникності, $K_{пр}$, фм^2 (без навантаження)	Кількість вимірювань	18	26	31	25	18
	середнє	0,01762	0,05402	0,02224	0,05277	0,04079
	максимальне	0,01902	0,05809	0,02783	0,05735	0,04462
	мінімальне	0,01687	0,04602	0,01820	0,05037	0,03696
Коефіцієнт проникності, $K_{пр}$, фм^2 (з навантаженням)*	Кількість вимірювань	14	20	9	10	11
	середнє	0,01787	0,05789	0,02436	0,05624	0,04482
	максимальне	0,01843	0,06053	0,02499	0,05697	0,04822
	мінімальне	0,01762	0,05334	0,02361	0,05561	0,04307
Розрахунковий об'єм повітря, який профільтрується крізь бетон ЗО при заданих умовах МПА (без навантаження)	Кількість вимірювань	18	26	31	25	18
	середнє	1 166,7	3 577,6	1 472,9	3 494,6	2 701,2
	максимальне	1 259,8	3 847,0	1 843,3	3 798,0	2 955,0
	мінімальне	1 117,0	3 047,4	1 205,6	3 335,6	2 447,7
Розрахунковий об'єм повітря, який профільтрується крізь бетон ЗО при заданих умовах МПА (з навантаженням)*	Кількість вимірювань	14	20	9	10	11
	середнє	1 183,3	3 833,9	1 613,0	3 724,7	2 968,4
	максимальне	1 220,8	4 008,7	1 655,1	3 773,1	3 193,3
	мінімальне	1 167,1	3 532,2	1 563,3	3 682,5	2 852,6
Середня відносна похибка визначення об'єму повітря (без навантаження)	%	2,3	3,8	6,6	2,6	4,2
Середня відносна похибка визначення об'єму повітря (з навантаженням)*	%	0,9	2,1	1,8	0,9	2,3
Середньоквадратичне відхилення об'єму повітря (без навантаження)	см^3/(м^2 · год · 0,4 МПа)	35,9	183,0	135,2	116,7	146,9
Середньоквадратичне відхилення об'єму повітря (з навантаженням)*	см^3/(м^2 · год · 0,4 МПа)	14,5	122,4	35,0	37,3	96,2
Довірчий інтервал для p = 0,95 (без навантаження)	см^3/(м^2 · год · 0,4 МПа)	75,5	376,7	275,6	240,4	308,6
Довірчий інтервалдля p = 0,95 (з навантаженням)*	см^3/(м^2 · год · 0,4 МПа)	31,1	254,5	79,2	84,3	211,8
$V/G_н$ (без навантаження)	середнє	23,3	71,6	29,5	69,9	54,0
	максимальне	25,2	76,9	36,9	76,0	59,1
	мінімальне	22,3	60,9	24,1	66,7	49,0
$V/G_н$ (з навантаженням)*	середнє	23,7	76,7	32,3	74,5	59,4
	максимальне	24,4	80,2	33,1	75,5	63,9
	мінімальне	23,3	70,6	31,3	74,5	57,1

* В умовах розтягувального навантаження на зразок 2 кН

Таблиця 5. Розраховані значення повітропроникності бетону кубічних вимірювальних зразків-імітаторів

№ зразка-імітатора	Час проходження 1 см³ повітря крізь зразок, с [4]	Повітропроникність бетону, см³/(м²·год·0,4 МПа)
1	24,6	14 634
	27,9	12 903
	28,6	12 587
	25,8	13 954
	27,0	13 333
	26,2	13 741
2	37,2	9 677
	36,8	9 783
	37,6	9 575
	36,2	9 948
	38,0	9 474
	24,5	14 694
3	25,0	14 400
	23,5	15 319
	23,0	15 652
	24,3	14 815
	25,9	13 900
	26,1	13 793
4	29,2	12 329
	30,2	11 921
	28,0	12 857
	30,2	11 921
	28,8	12 500
	29,6	12 162

стимої величини $G_н$ для ЗО енергоблока АЕС з реактором ВВЕР-1000, наведеного в [1].

Так, для методу стаціонарної радіальної фільтрації на циліндричних вимірювальних зразках середнє перевищення $G_н$ змінюється в межах:

від 23,3 до 71,6 раза (від 1 117 до 3 847 см³/(м²·год·0,4 МПа)) — без розтягувального зусилля на зразок;

від 23,7 до 76,7 раза (від 1 167,1 до 4 008,7 см³/(м²·год·0,4 МПа)) — з докладанням розтягувального зусилля, що моделює розширення ЗО за надмірного тиску всередині неї за умов МПА.

Середнє значення повітропроникності бетону кубічних вимірювальних зразків-імітаторів без стискувального навантаження для методу стаціонарної лінійної фільтрації, згідно з [4], становить 12 443,83 ± 4 181,13 см³/(м²·год·0,4 МПа), тобто перевищують величину $G_н$ у 240 разів.

Таким чином, отримані різними методами значення повітропроникності бетону зразків-імітаторів демонструють тенденцію значного перевищення значення $G_н$. Це перевищення може бути пояснено тим, що бетон є капілярно-пористим тілом, що має

Таблиця 6. Значення повітропроникності зразків-кернів бетону стиснутої зони ЗО енергоблока № 2 ВП «ЮУАЕС»

№ зразка-керна	Шифр зразка (дата відбору)	Час проходження 1 см³ повітря крізь зразок, с	Середній час проходження 1 см³ повітря через зразок, с	Значення повітропроникності бетону, см³/(м²·год·0,4 МПа)
1	ВС 604/2 (1) (13.09.2018)	457; 381; 360; 360; 360; 340	376 ± 93	1886,6 ± 511,3
2–1	ВС 603/2 (1, 2) (14.09.2018)	3 900; 3 360; 3 360; 3 600; 3 580; 3 480	3 547 ± 494	218,5 ± 30,37
2–2	ВС 603/2 (1, 2) (14.09.2018)	> 18 000	> 18 000	38,6

значну кількість дефектів і мікротріщин, які змінюються в часі і суттєво залежать від умов твердіння, часу та умов експлуатації [15–18]. Така тенденція підтверджується даними, отриманими раніше в інших дослідженнях [19, 20].

Збільшення повітропроникності бетону зразків-імітаторів під навантаженням пояснюється в [21, 22] тим, що за навантажень, що становлять 25–30 % від руйнівних, починаються інтенсивні процеси утворення мікротріщин у цементній матриці та навколо заповнювача бетону.

Різниця даних, отриманих методами стаціонарної радіальної та лінійної фільтрації, пояснюється високою неоднорідністю й дефектністю структури бетону (коефіцієнт варіації повітропроникності досягає 16,5 %), що є значущим у разі використання чутливих методів визначення повітропроникності. Крім того, на повітропроникність значний вплив мають умови формування зразків бетону різного розміру. Як було зазначено раніше, відповідно до вимог [7], під час виготовлення кубічних вимірювальних зразків-імітаторів розміром 100×100×100 мм бетонна суміш укладалася в форму одним шаром, а під час виготовлення циліндричних вимірювальних зразків-імітаторів розміром 150×150×150 мм — двома шарами.

Результати досліджень зразків-кернів, відібраних зі стиснутої зони ЗО енергоблока № 2 ВП «ЮУАЕС», показали, що значення повітропроникності для кернів, відібраних з різної глибини, не однакові й мають помітну тенденцію до зменшення зі збільшенням глибини [4]. Експериментально отримане значення повітропро-

никності для зразка «керн 1», відібраного з поверхневого шару бетону ЗО (з глибини до 10 см), приблизно в 37 разів перевищує нормативне значення $G_н$, у той час як для зразка «керн 2–2», відібраного з глибини близько 30 см, воно нижче значення $G_н$ в 1,3 раза. Таку відмінність у значеннях повітропроникності бетону ЗО, відібраного з різної глибини, можна пояснити так:

внутрішній шар бетону захищений сталевими листами гермооблицювання товщиною 8 мм, і умови тверднення його глибинних шарів істотно відрізняються від поверхневих;

на зовнішній поверхні ЗО буде утворюватися більше мікротріщин через постійні розтягуючі навантаження армоканатів і, навпаки, менша кількість мікротріщин буде утворюватися в масиві бетону із заглибленням у товщу ЗО;

волога у внутрішніх шарах зберігається значно довше, створюючи більш сприятливі умови для тверднення бетону, що підтверджується літературними даними [21, 22].

Таким чином, на підставі отриманих експериментальних даних у роботі [4] зроблено висновок, що бетон, фактично вкладений у ЗО на глибині від 30 до 120 см, буде мати не більшу повітропроникність, ніж для зразка «керн 2–2», тобто, буде відповідати нормативним вимогам, установленим в [1] для енергоблоків з реакторами типу ВВЕР-1000.

Відмінність значень повітропроникності бетону вимірювальних зразків-імітаторів і кернів, відібраних з конструкції ЗО, пояснюється тим, що на відміну від зразків-імітаторів, упорядкування структури бетону та її ущільнення в реальних умовах експлуатації енергоблоків відбувається під час тривалого твердіння в специфічних умовах, які супроводжуються тривалою безперервною стискаючою дією армоканатів (які створюють зростаюче об'ємне напруження, більш високе у глибинних шарах конструкції ЗО) і дією стискаючого експлуатаційного навантаження (власна вага конструкції ЗО). Моделювання вищевказаних параметрів експлуатації та створення експериментальних зразків, які повністю відповідають їм, у лабораторних умовах вимагає додаткового вивчення і, у першу чергу, удосконалення та розробки технології виготовлення зразків-імітаторів бетону з максимальним дотриманням умов, що існують у ЗО енергоблоків АЕС.

Висновки

1. Описано створену випробувальну установку для експериментальних досліджень повітропроникності бетону на циліндричних зразках діаметром до 100 мм і висотою до 140 мм методом стаціонарної радіальної фільтрації. Наведено та проаналізовано результати експериментальних досліджень повітропроникності бетону на цій установці для зразків бетону, що моделюють за складом бетон ЗО енергоблоків № 1 і 2 (В-302 та В-338) ВП «ЮУАЕС».

2. Виконано порівняльний аналіз результатів експериментальних досліджень повітропроникності бетону двома методами — стаціонарної радіальної фільтрації і стаціонарної лінійної фільтрації.

3. Установлено, що обидва методи визначення повітропроникності бетону є дуже чутливими до наявності дефектів бетону й можуть рівноцінно використовуватися для дослідження процесів структуроутворення бетонів.

4. Порівняльний аналіз результатів випробувань, виконаних обома методами, показав, що значення повітропроникності бетону зразків, які моделюють проектний склад бетону ЗО енергоблоків № 1 і 2 ВП «ЮУАЕС», перевищують установлене нормативне значення в середньому в 50 разів (для методу радіальної фільтрації) і в 240 разів (для методу лінійної фільтрації). У той же час результати досліджень на зразках-кернах, відібраних з бетону ЗО енергоблока № 2 ВП «ЮУАЕС» [4], демонструють значно нижчі значення повітропроникності, які мають тенденцію до зменшення зі збільшенням глибини розташування в товщі бетону — від перевищення нормативного значення у 37 разів (для поверхневого шару) до величини, яка менша за нормативне значення в 1,3 раза (для керна, розташованого на глибині 30 см від поверхні).

Таким чином, можна констатувати, що використання зразків-імітаторів для оцінювання локалізуючої здатності бетону ЗО енергоблоків АЕС з реакторами типу ВВЕР-1000 вимагає додаткового вивчення, що передбачає вдосконалення технології та розробку нових підходів виготовлення зразків-імітаторів бетону ЗО в лабораторних умовах із максимальним фізичним моделюванням умов, характерних для експлуатації ЗО.

Список використаної літератури

1. Указания по подбору составов и контролю качества газонепроницаемых бетонов для защиты сооружений атомных электростанций. — Киев : НИИСК, 1991. — 48 с.
2. ДСТУ Б В.2.6–37:2008. Конструкції будинків і споруд. Методи визначення показників повітропроникності огороджувальних конструкцій і їх елементів у лабораторних умовах. — Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. — 13 с.

3. ГОСТ 26450.2–85. Породы горные. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации. — Москва : Изд-во стандартов, 1986. — 16 с.
4. Зміна повітропроникності важкого бетону у часі / Г. Г. Фаренюк, Ю. І. Немчинов, А. М. Бамбура та ін. // Опір матеріалів і теорія споруд. — 2019. — № 102. — С. 25–36.
5. Рекомендации по оценке состояния железобетонных конструкций при эксплуатации в агрессивных средах. — Москва : НИИЖБ Госстроя СССР, 1984.
6. ТР.1.3812.4141. Техническое решение «Об изготовлении экспериментальных образцов для исследования локализующей способности бетона сжатой зоны защитной оболочки энергоблоков № 1, № 2 ОП ЮУАЭС» от 02.07.2018. — Южноукраинск : ОП ЮУАЭС, 2018. — 12 с.
7. ДСТУ Б В.2.7–214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразкам. — Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. — 43 с.
8. ТР.2.0001–1703. Техническое решение «Об отборе образцов бетона из ЗО энергоблока № 2», согласовано письмом ГИЯРУ № 15–14/4–3/3890 от 15.06.2018–6 с.
9. A method of the permeability determination of protective structures of man-made objects / S. Vyzhva, V. Onyshchuk, I. Onyshchuk et al. // XIV International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment» (Kyiv, Ukraine, November 10–13, 2020). — Vol. 2020. — P. 1–5. —Available at: https://doi.org/10.3997/2214–4609.202056075
10. ДСТУ Б В.2.7–223:2009 Бетони. Методи визначення міцності за зразками, відібраними з конструкцій / ДП «Укрархбудінформ». — Київ, 2010. — 12 с.
11. Добрынин В. М. Петрофизика / В. М. Добрынин, Б. Ю. Вендельштейн, Д. А. Кожевников. — Москва : Недра, 1991. — 368 с.
12. Определение петрофизических характеристик по образцам / под ред. проф. В. Н. Дахнова. — Москва : Недра, 1977. — 432 с.
13. Джеббар Тиаб. Петрофизика: теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов / Джеббар Тиаб, Эрл Ч. Доналдсон. — Москва : Премиум Инжиниринг, 2009. — 868 с.
14. ДСТУ ГОСТ 8.207:2008. Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положення. — Киев : Госпотребстандарт Украины, 2008. — 11 с.
15. Дорофеев В. С. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкцій / В. С. Дорофеев, В. Н. Выровой. — Одесса : Город мастеров, 1998. — 168 с.
16. Сопов В. П. Активные и неактивные поры в бетоне / В. П. Сопов, Л. Н. Решетняк, Н. И. Жданюк // Сб. тр. IX Междунар. науч.-практ. конф. — Запорожье : ООО «Будиндустрия ЛТД», 2007. — С. 163–168.
17. Шейнич Л. А. Процессы самоорганизации структуры строительных композитов / Л. А. Шейнич, Е. К. Пушкарева. — Киев : Гамма-Принт, 2009. — 146 с.
18. Safiuddin Md. Concrete Damage in Field Conditions and Protective Sealer and Coating Systems / Md. Safiuddin // Coatings. — 2017. — Vol. 7 (7). — P. 90. —Available at: https://doi.org/10.3390/coatings7070090
19. Фаренюк Є. Г. Експериментальний аналіз повітропроникності фасадних систем з повітряним прошарком / Є. Г. Фаренюк, А. С. Постол // Наука та будівництво. — 2017. — № 1 (11). — С. 10–14.
20. Xuebao T. D. Effect of Permeability of Concrete and Air Entrainment on Durability Of Concrete / T. D. Xuebao // Journal of Tongji University. — 2009. — Vol. 37 (6). — P. 744–748.
21. Берг О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. — Москва : Стройиздат, 1974. — 95 с.
22. Стефанов Б. В. Технология бетонных и железобетонных изделий / Б. В. Стефанов, Н. Г. Русанова, А. А. Волянский. — Киев : Вища шк., 1982. — С. 406.

Ia. A. Zhygalov[1], V. V. Inyushev[1], V. O. Posokh[1], S. A. Vyzhva[2], I. I. Onyshchuk[2]

[1] SE "State Scientific and Engineering Center for Control Systems and Emergency Response", Heroiv Stalingrada ave, 64/56, Kyiv, 04213, Ukraine
[2] Research Laboratory of Theoretical and Applied Geophysics of the Educational and Scientific Institute "Institute of Geology" of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Vasylkivska st., 90, Kyiv, 03022, Ukraine

Experimental Research of the Air Permeability of Concrete in the Compressed Zone of the Containment for Power Units No. 1, 2 of the South-Ukrainian NPP

The determination of the air permeability of concrete in the compressed zone of NPP's containment under conditions of excessive air pressure in the subshell space of the reactor compartment under a maximum design basis accident is necessary to confirm the localizing functions of the containment when extending the lifetime of power units.

Approaches to determining the localizing ability (air permeability) of concrete in the compressed zone of the containment of NPPs with WWER-1000 type reactors under the impact of excessive air pressure under conditions of maximum design basis accident are discussed in the article.

The designed testing installation for experimental studies of the air permeability of concrete by the method of stationary radial filtration is described and the results of experimental researches of the air permeability on the installation are presented for samples simulating the composition of concrete used under construction of the containment for Power Units No. 1, 2 (series B-302 and B-338, respectively) SD "South-Ukrainian NPP".

A comparative analysis of the results of abovementioned experimental researches with the results of experimental and theoretical work on the study of air permeability of the similar samples-imitators of concrete by the method of stationary linear filtration, as well as the results of measurements for samples of concrete sampled directly from the compressed zone of containment for Power Unit No. 2 of SD "South-Ukrainian NPP" was fulfilled.

The results are explained by processes of compaction of the concrete structure under a complex stress state that occurs under specific hardening conditions and during long-time compression by pre-stressed reinforcing ropes, which takes place under conditions of real containment operation.

It was concluded that the simulators made according to the currently accepted technology cannot provide a correct determination of the localizing ability of the NPP's containment, since the conditions and time of containment concrete hardening, as well as the long-time constant compressive action of reinforcing ropes, cannot be correctly modeled in full under the formation of samples-imitators.

The issue of the containment concrete samples-imitators creating in laboratory conditions requires additional study, improvement of technology and the development of new approaches with maximum physical modeling of the conditions characteristic of the operation of the NPP containment.

Keywords: air permeability, concrete, core, containment, nuclear power plant, lifetime extension.

References

1. *Ukazaniya po podboru sostavov i kontrolyu kachestva gazonepronitsaemych betonov dlya zaschity sooruzheniy atomnych electrostantsiy* [Guidelines for the selection of compositions and quality control of gas-tight concrete for the protection of structures of nuclear power plants]. Kyiv: SE "State Research Institute of Building Constrictions", 1991. 48 p (in Russ.)
2. DSTU B V.2.6–37:2008. *Constructions of buildings and structures. Determination methods of air permeability factors of building envelopes and their elements in laboratory conditions*. Kyiv: Minregionbud of Ukraine, 2009, 13 p. (in Ukr.)
3. GOST 26450.2–85. *Rocks. Method for determination of absolutely gas permeability coefficient by stationary and non-stationary filtration*. Moscow: Publishing house of standards, 1986, 16 p. (in Russ.)
4. Farenyuk G. G., Nemchinov Iu. I., Bambura A. N., Sheinich L. A., Mykolaiets M. G., Mudryk M. S. (2019). Zmina povitryapronyknosti vazhkogo betonu u chasi [The change of air permeability of concrete in time]. *Opir materialiv i teoriya sporud* [Strength of Materials and Theory of Structures], vol. 102, pp. 25–36 (in Ukr.)
5. *Rekomendatsii po otsenke sostoyaniya zhelezobetonnych konstruktsiy pri ekspluatatsii v agressivnych sredah* [Recommendations for assessing the state of reinforced concrete structures during operation in aggressive environments]. Moscow: NII ZHB Gosstroy USSR, 1984 (in Russ.)
6. TR.1.3812.4141. Technical solution *"On the manufacture of experimental samples for the study of the localizing ability of concrete in the compressed zone of the containment for power units no. 1, no. 2 of SD 'South-Ukraine NPP'"* dated 02.07.2018, Yuzhnoukrainsk: SD "South-Ukraine NPP", 2018, 12 p. (in Ukr.)
7. DSTU B V.2.7–214:2009. *Building materials. Concretes methods for strength determination using reference specimens*. Kyiv: Minregionbud of Ukraine, 2010, 43 p. (in Ukr.)
8. TR.2.0001–1703. Technical solution *"On the sampling of concrete samples from the containment of power unit no. 2"*, approved by the letter of the State Inspectorate for Nuclear Regulation of Ukraine no. 15–14/4–3/3890 dated 15.06.2018. Kyiv, 2018, 6 p. (in Ukr.)
9. Vyzhva S., Onyshchuk V., Onyshchuk I., Reva M., Tsuman V. (2020). A method of the permeability determination of protective st7ructures of man-made objects. Proceedings of the *XIV International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment" (Kyiv, Ukraine, November 10–13, 2020)*, pp. 1–5. Available at: https://doi.org/10.3997/2214–4609.202056075.
10. DSTU B V.2.7–223:2009. *Building materials. Concretes methods for strength determination using reference specimens*. Kyiv: Ukrarkhbudinform, 2010, 12 p. (in Ukr.).
11. Dobrynin V. M., Vendel'shteyn B. Yu., Kozhevnikov D. A. (1991). *Petrofizika* [Petrophysics], Moscow: Nedra, 368 p. (in Russ.)

12. Dakhnova V. N. (ed.) (1977). *Opredeleniye petrofizicheskikh kharakteristik po obraztsam* [Determination of petrophysical characteristics by samples]. Moscow: Nedra, 432 p. (in Russ.)
13. Tiab D., Donaldson E. Ch. (2009). *Petrofizika: teoriya i praktika izucheniya kollektorskikh svoystv gornykh porod i dvizheniya plastovykh flyuidov* [Petrophysics: theory and practice of studying the reservoir properties of rocks and the movement of reservoir fluids]. Moscow.: Premium Engineering, 868 p. (in Russ.)
14. DSTU GOST 8.207:2008. *State system for ensuring uniformity of measurements. Direct measurements with multiple observations. Methods of processing the results of observation. Basic principles*. Kyiv: Gospotrebstandart of Ukraine, 2008, 11 p. (in Russ.)
15. Dorofeev V. S., Vyrovoy V. N. (1998). *Tekhnologicheskaya povrezhdennost' stroitel'nykh materialov i konstruktsiy* [Technological damage to building materials and structures]. Odesa: Gorod masterov, 168 p. (in Russ.)
16. Sopov V. P., Reshetnyak L. N., Zhdanyuk N. I. (2007). Aktivnyye i neaktivnyye pory v betone [Active and inactive pores in concrete]. Proceedings of the *IX International Scientific and Practical Conference*. Zaporizhzhya: Budindustria LTD, pp. 163–168. (in Russ.)
17. Sheinich L. A, Pushkareva E. K. (2009). *Protsessy samoorganizatsii struktury stroitel'nykh kompozitov* [Self-organization processes of the structure of building composites]. Kyiv: Gamma-Print, 146 p. (in Russ.)
18. Safiuddin Md. (2017). Concrete Damage in Field Conditions and Protective Sealer and Coating Systems. *Coatings*, vol. 7, no. 7, pp. 90. Available at: https://doi.org/10.3390/coatings7070090.
19. Farenyuk G. G., Postol A. S. (2017). Eksperymental′nyy analiz povitropronyknosti fasadnykh system z povitryanym prosharkom [Experimental analysis of air permeability of facade systems with an air layer]. *Nauka ta budivnytstvo* [Science and construction], vol. 11, no. 1, pp. 10–14. (in Ukr.)
20. Tongji Daxue Xuebao (2009). Effect of permeability of concrete and air entrainment on durability of concrete. *Journal of Tongji University*, vol. 37, no. 6, pp. 744–748.
21. Berg O. Ya. (1974). *Fizicheskiye osnovy teorii prochnosti betona i zhelezobetona* [Physical foundations of the theory of strength of concrete and reinforced concrete]. Moscow: Stroyizdat, 95 p. (in Russ.)
22. Stefanov B. V., Rusanova N. G., Volyanskii A. A. (1982) *Tekhnologiya betonnykh i zhelezobetonnykh izdeliy* [Technology of concrete and reinforced concrete products]. Kyiv: Vyshcha shkola, 406 p.

Надійшла 27.01.2020
Received 27.01.2020