

УДК 691.32

ЗМІНА ПОВІТРОПРОНИКНОСТІ ВАЖКОГО БЕТОНУ У ЧАСІ**Г.Г. Фаренюк,**

д-р техн. наук,

Ю.І. Немчинов,

д-р техн. наук, проф.,

А.М. Бамбура,

д-р техн. наук, проф.,

Л.О. Шейніч,

д-р техн. наук, проф.,

М.Г. Миколаєць,

канд. техн. наук,

М.С. Мудрик

*Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»,
м. Київ*

DOI: 10.32347/2410-2547.2019.102.25-36

Визначена зміна повітропроникності важкого бетону у часі. Показана актуальність цього показника для забезпечення безпечної експлуатації атомних електростанцій. Проведені порівняльні визначення повітропроникності бетонів однакового складу у віці 28 діб і бетонів у віці більш 35 років, що були відібрані із захисної оболонки атомної електростанції. Встановлено, що повітропроникність бетону змінюється з часом у напрямку її зменшення. Повітропроникність бетонів у віці 28 діб не відповідає вимогам безпечної експлуатації атомних електростанцій. В той же час бетони з захисної оболонки забезпечують вимоги з безпеки експлуатації станцій. Отримані результати пояснюються процесами ущільнення структури бетону у часі при складному напруженому стані, викликаному обтисненням попередньо напруженими канатами на бетон.

Ключові слова: атомна електростанція, бетон

Вступ. Повітропроникність – це здатність матеріалів та конструкцій пропускати повітря під впливом перепаду тиску повітря, тобто різниці тисків на протилежних поверхнях конструкції (матеріалу) [1,2].

Отже повітропроникність або фільтрація повітря крізь матеріал відбувається під впливом різниці загальних тисків на протилежних його поверхнях. Описується за допомогою закону Дарсі, математичний вираз якого формально схожий на закон Фур'є. Але замість коефіцієнта теплопровідності використовується коефіцієнт повітропроникності конструкції, а замість градієнта температур – градієнт тиску. Повітропроникність залежить від кількості і виду пор в матеріалі (замкнуті або відкриті): чим більше відкритих пор, тим більша повітропроникність матеріалу [2,3].

На сьогодні визначення повітропроникності, в основному, проводиться для оздоблювальних та теплоізоляційних матеріалів та майже не виконується для важких бетонів [2]. В той же час повітропроникність важкого бетону є важливим показником і його значення нормується при застосуванні бетонів в захисних оболонках атомних електростанцій [4].

Критичне значення показника повітропроникності бетону визначено з умови допустимої швидкості витoku повітря крізь оболонку при проектній аварії. На сьогодні це значення досягається, в основному, за рахунок конструктивних рішень конструкції захисної оболонки.

Дана робота є частиною науково-дослідних робіт зі встановлення можливості запроєктованої експлуатації АЕС, що виконуються в Державному підприємстві «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій». Її актуальність пов'язана із дослідженням відповідності бетону встановленим вимогам щодо його повітропроникності для комплексного обґрунтування продовження подальшої безпечної експлуатації атомних електростанцій ще на 25 років після досягнення проектного терміну експлуатації (30 років).

1. Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Існує декілька методик визначення повітропроникності.

Одна із методик визначення повітропроникності, що застосовується при випробуваннях теплоізоляційних матеріалів, базується на визначенні кількості повітря в м^3 , яке проходить через 1 м^2 конструкції стіни протягом однієї години, при різниці тисків повітря 50 Па. Принцип дії випробувальної установки базується на вимірюванні герметичності змодельованої кімнати, де за допомогою вентилятора в приміщенні створюється розрідження 50 Па, яке імітує дію вітру на будівлю.

У цьому випадку максимальні допустимі значення повітропроникності становлять: в житлових приміщеннях - $3 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{год}$, в інших приміщеннях - $6 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{год}$ [5].

Також повітропроникність теплоізоляційних матеріалів визначають за методом, який полягає в тому, що через конструкцію пропускають потік повітря і, після встановлення стаціонарного потоку, вимірюють витрати повітря та перепад тиску між протилежними поверхнями конструкції. За допомогою компресора створюють стаціонарну різницю тиску по обидві сторони зразка від 10 Па до 250 Па ступенями по 10 Па. Кінцеве значення різниці тисків повинно відповідати розрахунковому значенню для об'єкта випробувань. Число ступенів тиску повинно бути не менше 5.

За результатами вимірювань обчислюють характеристики повітропроникності конструкції або опір повітропроникності.

Існує також достатньо робіт по дослідженню повітропроникності бетону [6, 7, 8, 9]. Проведеними дослідженнями показано, що повітропроникність бетону залежить від його складу та технології його ущільнення [4].

Для визначення повітропроникності важких бетонів, що застосовуються в захисних оболонках атомних електростанцій, в Державному підприємстві «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» в 80-х-90-х роках ХХ ст. була розроблена відповідна методика [4]. В результаті проведених досліджень було встановлено, що бетони звичайних складів не відповідають вимогам по повітропроникності. Тому були розроблені спеціальні бетони, повітропроникність яких відповідає встановленим вимогам.

2. Мета та задачі досліджень. Метою даної роботи є дослідження зміни повітропроникності бетонів у часі.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- підібрати модельний склад бетону, який відповідав би реальному бетону захисних оболонок АЕС;

- провести порівняльні дослідження повітропроникності бетонів різного віку: бетону у віці 28 діб, що імітує склад бетону, який застосовувався при будівництві станції, і бетону у віці 35 років з конструкції захисної оболонки.

3. Суть методики визначення повітропроникності конструкцій АЕС. Методика визначення повітропроникності бетону створена згідно з «Указания по подбору составов и контролю качества газонепроницаемых бетонов для защиты сооружений атомных электростанций» [4].

Згідно з вимогами, що висуваються до захисних оболонок АЕС, повітронепроникними можна вважати бетони, повітропроникність яких при тиску повітря 0,4 МПа не перевищує $G_n=1,0 \cdot 10^{-16}$ кг/м·с·Па (тобто, не більше $50 \frac{\text{см}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot 0,4 \text{ МПа}}$) [4]. Це значення розраховано виходячи з

умови допустимого значення швидкості витоку газу 0,3% на добу від об'єму захисної оболонки при проектній аварії, а також частки, що займають стіни в загальному значенні проникності поверхонь захисної оболонки атомної електростанції з реактором ВВЕР-1000.

Випробування проводили на зразках кубах, виготовлених в лабораторних умовах, та на кернах, вибурених із конструкції захисної оболонки.

Розмір зразків кубів – 100×100×100 мм. Зразки, після виготовлення, витримували 28 діб у камері нормального тверднення при температурі 20±2°C та відносній вологості повітря 96...100 %.

Зразки-керни були вибурені із досліджуваної конструкції. Вони мали наступні розміри: діаметр та висота 100 мм. Зразки були відторцьовані з обох боків.

Повітропроникність бетону визначали при рівноважній вологості досліджуваних зразків.

Зразки встановлювали у спеціальні обойми, де вільні грані фіксувалися металевими кришками, які мали отвори для подачі та відбору повітря (рис. 1). Бічні поверхні зразків герметизували парафіном, який закривав пори зовнішніх граней бетонних зразків. Крізь вільну грань зразка здійснювали подачу повітря (рис. 1), при постійному значенні тиску, доки воно не починало виходити з протилежної вільної грані зразка. Необхідний тиск встановлювали за допомогою компресора та редуктора подачі повітря. Під час випробування підйом надлишкового тиску відбувався до необхідної величини (0,4 МПа) протягом 10 хв з витриманням не менше 1 год [4]. Під час дослідів проводили заміри повітря, що пройшло крізь зразок, а також час за який крізь зразок пройшов певний об'єм повітря.



Рис. 1. Зразки обтиснуті в обоймі

Повітропроникність зразка при тиску повітря 0,4МПа обчислювали за формулою (1):

$$G = \frac{V \cdot 3600}{t \cdot S_{zp}}, \text{ см}^3 / \text{год} \cdot \text{м}^2, \quad (1)$$

де V – вимірний об'єм повітря, що пройшов крізь зразок, см^3 ; t – час, за який крізь зразок пройшов об'єм повітря V ; S_{zp} – площа вільної поверхні грані, через яку проходить повітря, м^2 .

Повітропроникність визначали як середнє арифметичне ($X_{\text{сер}}$) для шести вимірювань об'єму повітря. Крім того, обчислювали коефіцієнт варіації досліду (V) та довірчі границі ε випадкової похибки вимірювань об'єму повітря, що пройшло крізь зразок.

4. Експериментальна частина. Оскільки з моменту будівництва оболонки минуло багато часу, а якість і показники властивостей щебеню, піску, цементу та добавок змінилися, то було зроблено підбір кількох складів бетону, що імітували склад реального бетону. Запропоновані склади бетону відрізнялися витратою цементу в менший і більший бік від реального складу ($\Pi=520 \text{ кг/м}^3$). Витрату компонентів на 1 м^3 бетону наведено в таблиці 1 (модельні склади бетону, які були використані для виготовлення зразків-імітантів).

Таблиця 1

№ п/п	Витрата компонентів на 1 м^3 бетону, кг			
	цемент М400 (клас 32,5 N)	пісок	щебінь фр.5-20	вода
1	500	654	1042	193
2	520	642	1034	200
3	550	570	1060	180

В якості сировинних матеріалів використовували портландцемент СЕМ II/A-S 32,5R виробництва Волинь-цемент, кварцовий пісок Дніпровського кар'єру з модулем крупності 1,29, гранітний щебінь Малинського кар'єру фракції 5-20 мм (5-10 мм ÷ 5-20 мм = 33% ÷ 67%) з маркою за дробильністю – 1200. В якості добавки використовували пластифікатор на основі лігносульфонатів.

Результати випробувань на міцність при стиску зразків модельних складів у віці 28 діб наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

№ складу бетону (таблиця 1)	Витрата цементу, кг	Осадка конуса, см	Міцність на стиск зразків, МПа	Середня міцність на стиск, МПа
1	500	9	37,65	37,9
			36,86	
			39,02	
2	520	13	51,67	50,76
			52,26	
			48,35	
3	550	11	52,28	53,35
			59,14	
			48,63	

Для подальших експериментів було обрано склад №2, оскільки він відповідав складу бетону, що застосовувався при будівництві захисної оболонки. Коефіцієнт варіації міцності для складу №2 складав 4,1%.

Аналіз даних журналів контролю міцності при бетонуванні захисних споруд атомної електростанції показують, що реальний склад бетону був запроєктований з перевищенням необхідної міцності М400 (клас бетону С25/30) і реальна марка бетону була практично М500 (С32/40). Таку ж міцність мають і бетони, що імітували реальний бетон. Таким чином, не дивлячись на використання різних сировинних матеріалів при виготовленні бетону в 1980-х роках і 2018 р., міцності при стиску зразків модельного складу відповідають міцності реального бетону, що був використаний при будівництві захисних оболонок АЕС.

Результати визначення повітропроникності бетону, склад якого імітував склад реального бетону, наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

№ зразка	Час проходження 1 см ³ повітря через зразок, с	Статистичні характеристики часу проходження 1 см ³ повітря крізь зразок
1	24,6; 27,9; 28,6; 25,8; 27,0; 26,2	$X_{сер} = 28,93с$
2	37,2; 36,8; 37,6; 36,2; 38,0; 24,5	$S = 4,77$ $\epsilon = 9,73$
3	25,0; 23,5; 23,0; 24,3; 25,9; 26,1	$X_{сер} = 28,93 \pm 9,73с$
4	29,2; 30,2; 28,0; 30,2; 28,8; 29,6	$V = 16,5\%$

Значне перевищення отриманого показника повітропроникності бетону від необхідного пояснюється тим, що бетон є капілярно-пористим тілом із великою кількістю дефектів, мікротріщин, які змінюються в часі

[10, 11, 12, 13, 14, 15] і підтверджується раніш отриманими даними [5, 16]. Слід відмітити, що метод визначення повітропроникності бетону заснований на проходженні повітря крізь бетон по його дефектах. Таким чином, методика визначення повітропроникності бетону може служити методом дослідження процесів структуроутворення бетону та визначення ступеню його дефектності. Про значну дефектність структури бетону свідчить високе значення коефіцієнта варіації його повітропроникності, який складає 16,5%. В той час як коефіцієнт варіації міцності при стиску бетону - 4,1%, що свідчить про хорошу якість виготовленого бетону.

З зовнішнього боку захисної оболонки АЕС було вибурено один kern, який потім розрізаний на 3 зразка-керн. Під час експлуатації залізобетонна конструкція, з якої були вибурені керни, знаходилась в напруженому стані, а відповідно і бетон був стиснутий. Зразок-кern 1 – kern, що розташований на глибині стіни оболонки до 10 см і піддається дії атмосферних впливів. Зразок-кern 2-1 – знаходиться більш глибоко в захисній оболонці, а зразок-кern 2-2 – на глибині до 30 см від зовнішньої поверхні захисної оболонки.

Результати визначення повітропроникності бетону зразків-кernів із конструкцій АЕС наведені в таблиці 4.

Таблиця 4

№ зразка	Час проходження 1 см ³ повітря через зразок, с	Середній час проходження 1 см ³ повітря через зразок, с
Кern 1	457; 381; 360; 360; 360; 340	376 S= 37,97 ε =93,03 Xсер = 376±93,03 V≈10%
Кern 2-1	3900; 3360; 3360; 3600; 3580; 3480;	3547 S=201,47 ε =201,47*2,45=493,6 V=5,7%
Кern 2-2	> 18000 (5 годин)	> 18000

В результаті проведених робіт встановлено, що повітропроникність керн №1 висотою 101,5 мм становить: $1886,6 \pm 511,3 \text{ см}^3$. Експериментально отримана величина більш ніж у 37 разів перевищує допустимий $(50 \frac{\text{см}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{год}}; 0,4 \text{ МПа})$. Коефіцієнт варіації показників

повітропроникності приблизно складає 10 %.

Повітропроникність керн №2-1 висотою 92,9 мм становить: $218,5 \pm 30,37 \text{ см}^3$. При похибці досліду 13,9 % і коефіцієнті варіації 5,7%. Експериментально отримана величина більш ніж у 4 рази перевищує допустиме значення.

Повітропроникність керн №2-2 висотою 103,5 мм становить: $38,6 \text{ см}^3$, що менше допустимого значення в 1,3 рази.

5. Результати досліджень повітропроникності. Аналізуючи отримані результати, можна прийти до висновку, що тривалий напружений

стиснутий стан бетону позитивно впливає на ущільнення його структури і призводить до зменшення коефіцієнта повітропроникності бетону. Напружений стан бетону створюється як стискаючою дією канатів, які створюють об'ємне напруження, так і стискаючою дією експлуатаційних навантажень. Інтенсивність процесів ущільнення структури бетону залежить від умов експлуатації конструкції: у поверхневому шарі такі навантаження менші та інтенсивність ущільнення менша. Крім того, зовнішній шар піддається впливу навколишнього середовища. По мірі просування глиби конструкції навантаження збільшуються, збільшується ступінь ущільнення структури бетону. Ці процеси і знайшли відображення в значеннях коефіцієнтів повітропроникності бетону в поперечному розрізі конструкції. Такий ефект підтверджено відомостями з літератури [17, 18, 19, 20].

На вирівнювання структури бетону в результаті тривалого тверднення в напруженому стиснутому стані свідчить і зменшення величини коефіцієнтів варіації повітропроникності бетону.

Потрібно відзначити, що бетон захисної оболонки з внутрішньої сторони захищений металевим листом, а умови тверднення його глибинних шарів відрізняються від поверхневих. В першу чергу це пов'язано зі збереженням вологи всередині бетону, оскільки у неї не було можливості випаровуватися. Наявність вологи у внутрішніх шарах бетону створювала сприятливі умови для його тверднення. Наявність сприятливих умов тверднення бетону в його глибинних шарах підтверджено і результатами випробувань цих бетонних кернів на міцність при стиску. Результати випробувань показали, що міцність бетону при стиску в глибинних шарах зросла більш ніж в 1,5 рази в порівнянні з міцністю зовнішнього шару.

Отже, аналізуючи отримані експериментальним шляхом дані, можна припустити, що бетон на глибині більше 30 см, у напрямку від зовнішньої поверхні захисної оболонки атомної електростанції, має не більшу повітропроникність, ніж бетон керну №2-2 (таблиця 4). Це пояснюється умовами експлуатації, оскільки ступінь обтиснення бетону на глибині від 30 см до 120 см не менший, ніж ступінь обтиснення керну №2-2. Таким чином, бетон захисної оболонки має необхідну повітропроникність за виключенням поверхневого шару глибиною до 30 см.

Висновки.

1. Встановлено, що метод визначення повітропроникності бетону є дуже чутливим до наявності дефектів бетону і може слугувати самостійним методом дослідження процесів структуроутворення бетонів. Повітропроникність бетону коливається в значних межах і залежить від технології виготовлення зразків і умов їх тверднення. З часом, в результаті тверднення бетону, його повітропроникність зменшується.

2. Визначення повітропроникності бетону кернів, вибурених із захисної оболонки АЕС, показало, що повітропроникність бетону реальних конструкцій значно менше, ніж зразків з бетону ідентичного модельного складу. Величина коефіцієнта повітропроникності бетону зразків модельного складу в 240 разів більше нормованої, а для бетону з реальної конструкції значно менше. Його величина, для бетону поверхневого шару,

більше нормованої величини тільки в 37 разів, а для глибинних шарів конструкції коефіцієнт повітропроникності бетону вже менше нормованого в 1,3 рази. Різниця коефіцієнтів повітропроникності бетону для зразків-кубів модельного-складу і бетонних кернів з реальної конструкції пояснюється тим, що з часом протікають процеси впорядкування структури бетону, її ущільнення. Інтенсивність процесів ущільнення структури бетону залежать від умов експлуатації конструкції: в поверхневому шарі протікають процеси корозії під дією зовнішніх впливів і тому інтенсивність ущільнення менша. По мірі просування вглиб конструкції збільшується ступінь ущільнення структури бетону. Ці процеси і знайшли відображення в значеннях коефіцієнтах повітропроникності бетону в поперечному перерізі конструкції.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Кривенко П.В., Пушкарьова К.К.* та ін. Будівельне матеріалознавство: Підручник для студ. вищ. навч. закл. Київ, 2008. 690 с.
2. *Osman Wasfi, Mohammed Imbadi.* Experimental evolution of the properties of lightweight breathable concretes // *Journal Advances in Applied Ceramics*. Volume 116, 2017 – Issue 4: *Cement Concrete Science*, p.p. 225-229.
3. *Рунова Р.Ф., Шейніч Л.О.* та ін. Основи виробництва стінових та оздоблювальних матеріалів. - Київ, 2002. - 368 с.
4. Указания по подбору составов и контролю качества газонепроницаемых бетонов для защиты сооружений атомных электростанций. - К: НИИСК, 1991. - 48 с.
5. *Фаренюк Є.Г., Постол А.С.* Експериментальний аналіз повітропроникності фасадних систем з повітряним прошарком // *Наука та будівництво*, №1 (11), 2017. - С. 10-14.
6. *J.M. Wong, Fredrik Glasser, Mohammed Imbabi.* Breathable concrete for low energy buildings. // Conference: WREC 2005, At Aberdeen, Scotland (UK). URL: https://www.researchgate.net/publication/270282868_Breathable_concrete_for_low_energy_buildings.
7. *R.K. Dhir, P.C. Hewlett, Y.N. Chan.* Near surface characteristics of concrete: intrinsic permeability // *Magazine of Concrete Research*. ISSN 0024-9831. E-ISSN 1751-763X Volume 41 Issue 147, June 1989. - P.p. 87-97.
8. *Luis Ebensperger, Roberto Torren.* Concrete air permeability "in situ" test status quo // *Revista Ingeniería de Construcción* Vol. 25 N°3, Diciembre de 2010. - P.p. 371-382.
9. АТТМА. Air permeability testing. 2015. Дата оновлення: 21.02.18. https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Air_permeability_testing (Дата звернення: 04.01.19).
10. *Дорофеев В.С., Выровой В.Н.* Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций. – Одесса: Город мастеров, 1998. - 168 с.
11. *Сонов В.П., Решетняк Л.Н., Жданюк Н.И.* Активные и неактивные поры в бетоне // Сб. трудов IX Международная научно-практическая конференция ООО «Будиндустрия ЛТД», Запорожье, 2007. - С. 163-168.
12. *Шейніч Л.А., Пушкарева Е.К.* Процессы самоорганизации структуры строительных композитов. Киев, Гамма-Принт, 2009. 146 с.
13. *Md. Safiuddin.* Concrete Damage in Field Conditions and Protective Sealer and Coating Systems // *Coatings* 2017, 7(7), 90; doi:10.3390/coatings7070090
14. *Hornbostel K.* Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review / *K. Hornbostel, C. K. Larsen, M. R. Geiker* // *Cement and Concrete Composites*. Vol. 39 – 2013. - P. 60–72. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019
15. *Celik K.* Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder / *K. Celik, C. Meral, A. Petek Gursel, P.K. Mehta, A. Horvath, P.J.M. Monteiro* // *Cement and Concrete Composites*. Vol. 56 – 2015. P. 59–72. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.11.003

16. *Tongji Daxue Xuebao*. Effect of permeability of concrete and air entrainment on durability of concrete // Journal of Tongji university 37(6). JUNE 2009. - P.P. 744-748.
17. *Берг О.Я.* Физические основы теории прочности бетона и железобетона. – М.: Стройиздат, 1974. - 95 с.
18. *Стефанов Б.В., Русанова Н.Г., Волянський А.А.* Технологія бетонних і железобетонних изделий. Киев, «Вища школа», 1982. - 406 с.
19. *Hailong Wang, Xiaoyan Sun, Junjie Wang & Paulo J.M. Monteiro*. Permeability of Concrete with Recycled Concrete Aggregate and Pozzolanic Materials under Stress // Journal List Materials (Basel) v.9(4); 2016 Apr PMC5502916.
20. *Nikolova B., Taucer F., Mazars J.* Control of cracking and durability of reinforced concrete structures // 4th ConCrack workshop “Engineering and Standard issues. 2014. - 80 p. doi:10.2788/1999.

REFERENCES

1. *Krivenko P.V., Pushkarova K.K.* and other. (2008) Budivne materialoznavstvo (Building Material Science): Pidruchnyk dla studentiv vyshchikh navchalnykh zakladiv. Kyiv. 690.
2. *Osman Wasfi, Mohammed Imbadi.* (2017). Experimental evolution of the properties of lightweight breathable concretes. Journal Advances in Applied Ceramics. Volume 116. Issue 4: Cement Concrete Science. – P. 225-229.
3. *Runova R.F., Sheinich L.O.* and other. (2002). Osnovy vyrobnystva stinovykh ta ozdobiuvalnykh materialiv (Basis of production the materials for wall and finishing). - Kyiv. - 368 p.
4. Ukazaniya po podboru sostavov i kontroliu kachestva gazonepronicaemykh betonov dla zashchity sooruzhenii atomnykh elektrostancii (Uidelines for the selection of compositions and quality control of gas-tight concretes to protect the structures of nuclear power plants). (1991). Kyiv. NIISK. – 48 p.
5. *Farennyuk E.G., Postol A.S.* (2017). Eksperymentalnyi analiz povitropronyknosti fasadnykh system z povitrianyom prosharkom (Experimental analysis of air permeability of air-layer facade systems). - Nauka i budivnytstvo, №1 (11). – P. 10-14.
6. *Wong J.M., Glasser F., Imbabi M.* (2005). Breathable concrete for low energy buildings, Conference: WREC, At Aberdeen, Scotland (UK). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/270282868_Breathable_concrete_for_low_energy_buildings.
7. *Dhir R.K., Hewlett P.C., Chan Y.N.* (1989). Near surface characteristics of concrete: intrinsic permeability. Magazine of Concrete Research. ISSN 0024-9831. E-ISSN 1751-763X Volume 41 Issue 147, 87-97.
8. *Luis Ebersperger, Roberto Torren.* (2010). Concrete air permeability "in situ" test status quo. Revista Ingeniería de Construcción Vol. 25 N°3, 371-382.
9. ATTMA. (2015). Air permeability testing. Retrieved from https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Air_permeability_testing.
10. *Dorofeev V.S., Vyrovoy V.N.* (1998). Tekhnologicheskaia povrezhdennost stroitelnykh materialov i konstruktсии (Technological damage to building materials and structures). – Odessa: Gorod masterov. – 168 p.
11. *Sopov V.P., Reshetniak L.N., Zhvaniuk N.I.* (2007). Aktivnye i neaktivnye pory v betone (Active and inactive pores in concrete). Sbornik trudov IX Mezhdunarodnaia nauchno-prakticheskaiia konferentsiia “Budindustriia LTD”, Zaporizhzhia. – P. 163-168.
12. *Sheinich L.O., Pushkarova K.K.* (2009). Protseesi samoorganizatsii struktury stroitelnykh kompozitov (The processes of self-organization of the structure of building composites). – K.: Gamma-Print. - 146 p.
13. *Md. Safiuddin.* (2017). Concrete Damage in Field Conditions and Protective Sealer and Coating Systems. 7(7), 90. doi:10.3390/coatings7070090
14. *K. Hornbostel, C. K. Larsen, M. R. Geiker.* (2013). Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review. Cement and Concrete Composites. Vol. 39. 60–72. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019
15. *K. Celik, C. Meral, A. Petek Gursel, P.K. Mehta, A. Horvath, P.J.M. Monteiro* (2015). Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder. Cement and Concrete Composites. Vol. 56. 59–72. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.11.003

16. *Tongji Daxue Xuebao*. (2009). Effect of permeability of concrete and air entrainment on durability of concrete. // Journal of Tongji university 37(6). – P. 744-748.
17. *Berg O.Ia.* (1974). Fizicheskie osnovy teorii prochnosti betona I zhelezobetona (Physical basis of the theory of strength of concrete and reinforced concrete). Moskva, Stroizdat. - 95 p.
18. *Stefanov B.V., Rusanova N.G., Volianskii A.A.* (1982). Tekhnologiya betonnykh I zhelezobetonnykh izdelii (Concrete and reinforced concrete products technology). Kyiv, «Vyscha shkola». - 406 p.
19. *Hailong Wang, Xiaoyan Sun, Junjie Wang & Paulo J.M. Monteiro.* (2016). Permeability of Concrete with Recycled Concrete Aggregate and Pozzolan Materials under Stress. Journal List Materials (Basel) v.9(4); Apr PMC5502916.
20. *Nikolova B., Taucer F., Mazars J.* (2014). Control of cracking and durability of reinforced concrete structures. 4th ConCrack workshop “Engineering and Standard issues, 80. doi:10.2788/1999.

Стаття надійшла до редакції 18.03.2019 р.

Farenjuk G.G., Nemchinov Iu.I., Bambura A.N., Sheinich L.A., Mykolalets M.G., Mudryk M.S.

THE CHANGE OF AIR PERMEABILITY OF CONCRETE IN TIME

The air permeability of heavy concrete is an important indicator and its value is normalized with the application of concrete in protective shells of nuclear power plants. The critical value of the air permeability index of concrete is determined from the condition of the permissible velocity of air flowing through the shell in the design basis accident. Today, this value is achieved mainly due to constructive solutions in the design of the protective shell.

The article presents the results of research on the compliance of concrete with the established requirements for its air permeability for a comprehensive justification for further safe operation of nuclear power plants for 25 years after the achievement of the project life (30 years).

To obtain the necessary indicators for calculations, a model composition of concrete was designed so that it corresponded to real concrete of nuclear power plant protective shells from which the specimens were made. A comparative study of air permeability of concrete at different age were made, such as concrete at the age of 28 days simulating the composition of concrete used in the construction of the nuclear power plant, and concrete at the age of 35 years selected from the protective shell of the nuclear power plant.

The air permeability of concrete at the age of 28 days does not meet the requirements of safe operation of nuclear power plants. At the same time, it was established that concrete selected from the protective shell, meets the requirements for the safety of operation of the nuclear power plants. The obtained results are explained by the processes of compacting the concrete in time.

Key words: nuclear power plant, concrete, air permeability, structure, cement stone.

Фаренюк Г.Г., Немчинов Ю.И., Бамбура А.М., Шейнич Л.А., Миколаец М.Г., Мудрик Н.С.

ИЗМЕНЕНИЕ ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТИ БЕТОНА ВО ВРЕМЕНИ

Определено изменение воздухопроницаемости тяжелого бетона во времени. Показана актуальность этого показателя для обеспечения безопасной эксплуатации атомных электростанций. Проведены сравнительные испытания по определению воздухопроницаемости бетонов одинакового состава в возрасте 28 суток и бетонов в возрасте более 35 лет, которые были выбурены с защитной оболочки атомной электростанции. Установлено, что воздухопроницаемость бетона меняется со временем в направлении ее уменьшения. Воздухопроницаемость бетонов в возрасте 28 суток не соответствует требованиям безопасной эксплуатации атомных электростанций. В то же время бетон с защитной оболочки обеспечивает требования по безопасности эксплуатации станций. Полученные результаты объясняются процессами уплотнения структуры бетона во времени, вызванного обжатием предварительно напряженными канатами на бетон.

Ключевые слова: атомная электростанция, бетон, воздухопроницаемость, структура, цементный камень.

УДК 691.32

Фаренюк Г.Г., Немчинов Ю.І., Бамбура А.М., Шейніч Л.О., Миколаєць М.Г., Мудрик М.С. **Зміна повітропроницності важкого бетону у часі** // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірн. – К.: КНУБА, 2019. – Вип. 102. – С. 25-36.

Досліджено зміну повітропроницності важкого бетону у часі.

Табл. 4. Іл. 1. Бібліогр. 20 назв.

UDC 691.32

Farenjuk G.G., Nemchinov Yu.I., Bambura A.N., Sheinich L.A., Mykolaiets M.G., Mudryk M.S. **The change of air permeability of concrete in time** // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific and technical collected articles. - Kyiv: KNUBA, 2019. - Issue 102. - P. 25-36. – Ukr.

The air permeability of heavy concrete in time is studied.

Tabl. 4. Fig. 1. Ref. 20.

УДК 691.32

Фаренюк Г.Г., Немчинов Ю.И., Бамбура А.М., Шейнич Л.А., Миколаец М.Г., Мудрик Н.С. **Изменение воздухопроницаемости бетона во времени** // Сопротивление материалов и теория сооружений: науч.-техн. сборн. - К.: КНУСА, 2019. - Вип. 102. - С. 25-36.

Исследовано изменение воздухопроницаемости тяжелого бетона во времени.

Табл. 4. Ил. 1. Библиогр. 20 назв.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, директор інституту ФАРЕНЮК Геннадій Григорович

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, вул. Преображенська, 5/2, Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Мінрегіон України

E-mail: farenjuk@ndibk.gov.ua

Контактний тел.: +38044-249-72-34

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5703-3976>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, перший заступник директора інституту НЕМЧИНОВ Юрій Іванович

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, вул. Преображенська, 5/2, Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Мінрегіон України

E-mail: yu.nemch@ndibk.gov.ua

Контактний тел.: +38044-249-37-97

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6618-12X>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, завідувач відділу надійності конструкцій будівель і споруд БАМБУРА Андрій Миколайович

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, вул. Преображенська, 5/2, Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Мінрегіон України

E-mail: abamdura@gmail.com

Контактний тел.: +38067-238-22-34

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1402-3345>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, завідувач відділу технології виробництва залізобетонних конструкцій ШЕЙНІЧ Леонід Олександрович

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, вул. Преображенська, 5/2, Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Мінрегіон України

E-mail: lenid312@gmail.com, schein@ndibk.gov.ua

Контактний тел.: +38067-70-88-319

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7684-9495>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, завідувач лабораторії корозії та захисту будівельних конструкцій МИКОЛАСЦЬ Максим Григорович
Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, вул. Преображенська, 5/2, Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Мінрегіон України
Адреса домашня: 03118 Україна, м. Київ, пр-т В. Лобановського, 126, кв. 74.
E-mail: mykolayets@ndibk.gov.ua
Контактний тел. +38096-224-78-79
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8823-3401>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): провідний технолог Мудрик Микола Степанович
Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, вул. Преображенська, 5/2, Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Мінрегіон України
E-mail: otradny1961@bigmir.net
Контактний тел. +38044-249-38-41
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7391-7723>