

**КОЛОЇДНА-ХІМІЯ ТА ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА ЯК ОСНОВА ВИРОБНИЦТВА РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ МІНЕРАЛЬНИХ В'ЯЖУЧИХ РЕЧОВИН ТА ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЇХ ОСНОВІ.УПРАВЛІННЯ ВОДОПРОНИКНІСТЮ**

**КОЛЛОИДНАЯ-ХИМИЯ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА КАК ОСНОВА ПРОИЗВОДСТВА РЕСУРСОЗБЕРЕГАЮЩИХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ И ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИХ ОСНОВЕ. УПРАВЛЕНИЕ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬЮ**

**COLLOIDAL CHEMISTRY AND PHYSICS-CHEMICAL MECHANIC AS THE BASIS OF MINERAL RESOURCE-BINDERS AND HIGH COMPOSITE MATERIALS ON THE IR BASIS. MANAGEMENT PERMEABILITY**

Плугін А. А. д-р техн. наук, Плугін А. М. д-р хім. наук (УкрДАЗТ), Кагановський О.С., канд. хім. наук (ТОВ «Капітал Менеджмент», м. Харків), Градобоев О.В. інж. (ТОВ «БШК», Харківська обл.)

Плугин А.А. д-р техн. наук, Плугин А.М. д-р хим. наук (УкрГАЖТ), Кагановский А.С., канд. хим. наук (ООО «Капитал Менеджмент», г. Харьков), Градобоев А.В., инж. (ООО «БШК», Харьковская обл.)

Plugin A. A. Doctor of technical sciences, Plugin A. M. Doctor of Science (UkrDAZT) Kaganovsky O. S., candidate of chemical sciences (LLC "Capital Management", Kharkiv), Hradoboyev O. V., engineer, (LLC "BSHK" Kharkivregion).

Викладені положення колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки щодо впливу поверхневого заряду та електроповерхневого потенціалу дисперсної фази капілярно-пористих матеріалів на процес фільтрації в них, зокрема, безнапірну водопроникність бетону. Наведені відповідні рівняння та експериментальні методики, які дозволяють ефективно керувати водопроникністю бетону, його довговічністю при вилугуванні.

Приведены положения коллоидной химии физико-химической механики относительно влияния поверхностного заряда и электроповерхностного потенциала дисперсной фазы капиллярно-

пористых материалов на процесс фильтрации в них, в частности, безнапорную водопроницаемость бетона. Приведены соответствующие уравнения и экспериментальные методики, позволяющие эффективно управлять водопроницаемостью бетона, его долговечностью при выщелачивании

Given position colloid chemistry and physical and chemical mechanics under the influence of surface charge and surface electrical potential of the dispersed phase of capillary-porous materials in the process of filtration in them, in particular, non pressure water permeability of concrete. The corresponding equations and experimental techniques to effectively manage the water permeability of concrete, its durability during leaching

**Ключові слова:**

Цемент, бетон, фільтрація, довговічність.

Цемент, бетон, фільтрація, долговечность.

Cement, concrete, filtration, durability.

**Постановка проблеми.** Стаття є продовженням [1], де показано, що технологія бетону в теперішній час переживає науково-технічну революцію завдяки інтенсивному розвитку бетонознавства – науки про бетон і подібні йому композиційні матеріали. Бетонознавство є міждисциплінарною галуззю знань, що вивчає процеси твердіння і руйнування в'язучих матеріалів і бетону з позицій фундаментальних наук – фізики, хімії, фізикохімії в цілому або її розділах, в основному термодинаміки, математики, геології. Проте колоїдна хімія в бетонознавстві дотепер застосовувалася недостатньо ефективно і лише останніми роками з'явилися праці, де системно викладена колоїдна хімія для цементів, бетонів і конструкцій із них [2–6]. В [1] наведено історичний нарис розвитку колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки, а також у концентрованому вигляді викладено найбільш важливі положення колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки цементів, бетонів і конструкцій із них. Цими положеннями є такі:

1. Тверднучі й затверділі неорганічні в'язучі і бетони є полідисперсними матеріалами, а продукти гідратації в'язучих – водно-дисперсними системами з дисперсною фазою – частками продуктів гідратації, дисперсійним середовищем – розчином електроліту.

2. Частки неорганічної дисперсної фази у водно-дисперсних системах мають поверхневий заряд і електроповерхневий потенціал.

3. Між різнойменно зарядженими частками дисперсної фази у тверднучих неорганічних в'язучих і композиційних матеріалах на їх основі виникають електрогетерогенні контакти, які визначають їх міцність (колоїдно-хімічна теорія міцності бетону).

4. Поверхневий заряд та електроповерхневий потенціал дисперсної фази впливають на процес фільтрації в капілярно-пористих матеріалах (безнапірна водопроникність бетону).

5. Поверхневий заряд й електроповерхневий потенціал дисперсної фази впливають на процес дифузії в капілярно-пористих матеріалах, зокрема, на проникнення агресивних речовин у бетон і винесення із нього продуктів корозії. Дифузія визначає швидкість корозії термін служби бетонних і залізобетонних конструкцій.

6. Характер полідисперсної структури бетону визначає фізичні та фізико-механічні властивості бетону, в особливості його безнапірну водопроникність і понаднормативну довготривалу повзучість.

7. Понаднормативна довготривала повзучість цементного бетону визначає понаднормативні деформації довгомірних і тонкостінних залізобетонних конструкцій із них.

Основоположні, первинні положення 1–3 викладені у [1]. Похідні від них положення 4–7 було передбачено викласти у серії наступних публікацій.

**Метою роботи** є викладення положення 4 [1] щодо впливу поверхневого заряду та електроповерхневого потенціалу дисперсної фази капілярно-пористих матеріалів на процес фільтрації, зокрема, безнапірну водопроникність бетону.

**Безнапірна водопроникність (безнапірна фільтрація)** – рух води в капілярно-пористому матеріалі, зокрема, бетоні, під дією не тільки відомих гідростатичного тиску (згідно закону фільтрації Дарсі) або капілярного підняття, а суми зовнішнього гідростатичного  $p_h$  і внутрішніх тисків [3; 7; 8]. При зіткненні води з поверхнею сухого або вологого бетону починається її проникнення в нього під спільною дією вказаних тисків. Спочатку проникнення відбувається інтенсивно, потім по мірі водонасичення бетону уповільнюється до встановлення стаціонарного потоку. Дослідити цей процес дозволяють аналіз роботи однобічно або частково обводнених конструкцій, наприклад, обробки тунелів у обводнених ґрунтах, а також нескладні пристосування і дослід, які моделюють цю роботу (рис. 1).

На рис. 1, з стаціонарному потоку відповідає права пряма ділянка інтегральної залежності кількості поглиненої води від часу. Величина безнапірної водопроникності бетону  $W_{об}$  може бути визначена за цією ділянкою таким чином:

$$W_{об} = \frac{1}{dS} \times \frac{dV}{d\tau} = \left[ \frac{1}{m^2} \times \frac{m^3}{c} = \frac{m}{c} \right], \quad (1)$$

де  $dV/d\tau$  – об'єм поглиненої за одиницю часу води на прямій ділянці інтегральної залежності  $V = f(\tau)$ ;  $dS$  – площа входження потоку води в бетон.

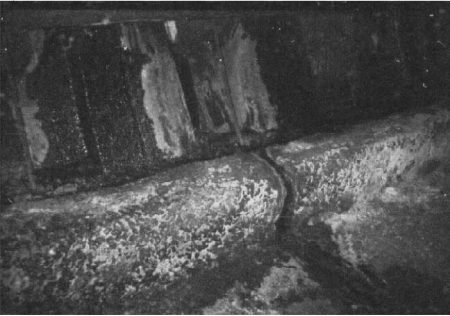
Для бетону W2 (рис. 1, з, 2) безнапірна водопроникність складе

$$W_{об} = \frac{1}{S} \times \frac{dV}{d\tau} \times 1,157 \times 10^{-7} = \frac{0,512}{50} \times 1,157 \times 10^{-7} = 3,5 \times 10^{-10}, \text{ м/с,}$$

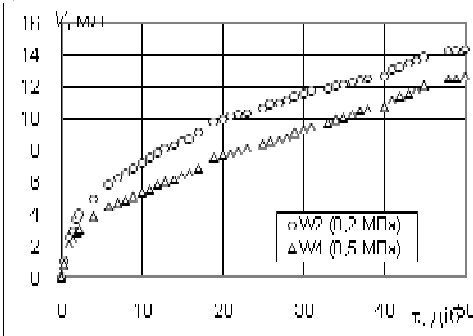
де  $S = 50 \text{ см}^2$ ;  $dV/d\tau$  – у мл/добу;  $1,057 \times 10^{-7}$  – коефіцієнт перерахунку см/добу у м/с.

Потік крізь бетон і цементний камінь визначається переважно гідросилікатним гелем ГСГ цементного каменю як складовою найбільшої дисперсності. Аналіз електронно-мікроскопічних знімків, наведених на рис. 3, 4, дозволив встановити, що ГСГ складається із глобул, утворених із окремих часток різної форми, розмір яких в середньому можна прийняти рівним 25 і 5 нм, відповідно.

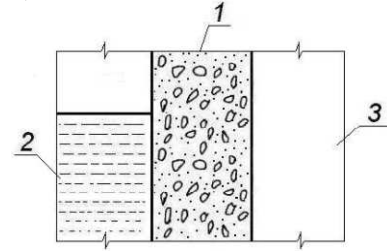
а)



г)



б)



в)

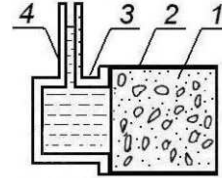


Рис. 1. Дослідження безнапірної водопроникності бетону: а– патьоки і висоли на поверхні бетону обробки тунелю метрополітену, розташованого в обводнених ґрунтах;

б– модель умов, при яких відбувається безнапірна фільтрація (водопроникність) крізь конструкцію із бетону: 1– конструкція; 2– вода у ємності, водоймищі, ґрунті і т.п.; 3– повітряне середовище; в– пристосування для дослідження безнапірної водопроникності: 1– зразок бетону; 2– водонепроникне покриття; 3– чарунка з водою; 4– вимірювальна трубка; г– експериментальні криві безнапірної водопроникності (водопоглинання)–інтегральні залежності від часу  $\tau$  кількості поглиненої води зразком бетону марок з водонепроникності W2 і W4

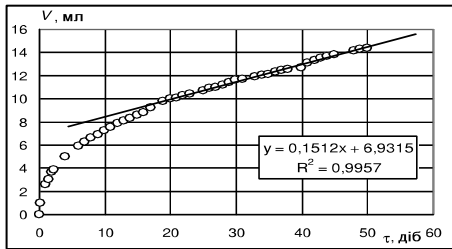


Рис. 2. Визначення останньої прямої ділянки (після 20 діб) графіку безнапірної водопроникності – інтегральної залежності від часу  $\tau$  кількості поглиненої води зразком бетону марки з водонепроникності W2, яка відповідає встановленню стаціонарного потоку

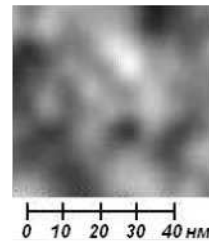
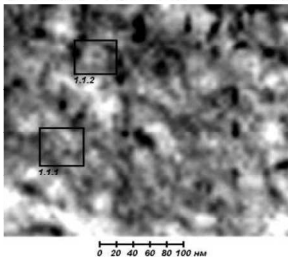
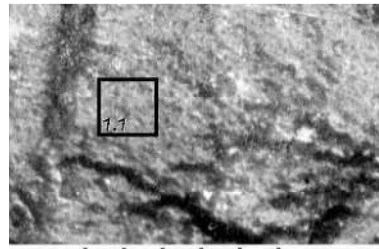
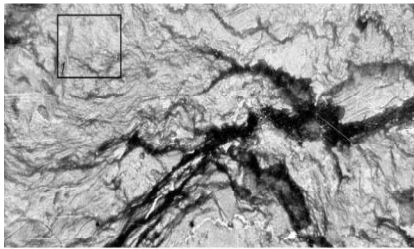


Рис. 3. Продукти гідратації портландцементу. Електронно-мікроскопічний знімок (ЕМЗ) вугільної репліки з відколу з послідовно збільшеними фрагментами поверхні гідро силікатного гелю

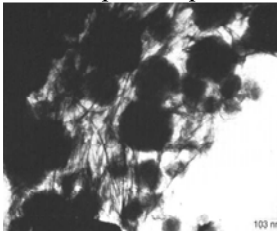


Рис. 4. Гідросилікатний гел: фіброгель з утвореними в ньому глобулами. Електронно-мікроскопічний знімок відколу (СЕМ) (R.Trettin, S.Wild)

Стаціонарний потік встановлюється при рівності нулю суми зовнішнього тиску  $p_h$  і внутрішніх тисків, що спричиняють фільтрацію – осмотичного  $p_{ос}$ , капілярно-осмотичного  $p_{ко}$ , капілярного підняття  $p_{кп}$ , електрокапілярного  $p_{ек}$  та перешкоджають їй – внутрішнього тертя (в'язкісного опору)  $p_{тр}$ , потенціалу течії  $p_{нт}$ . Рівняння стаціонарного потоку безнапірної водопроникності має вигляд [3; 8]:

$$p_h + p_{oc} + p_{ko} + p_{kn} + p_{ek} - p_{mp} - p_{nm} = 0, \quad (2)$$

де внутрішні тиски визначаються виразами [3; 8]:

$$p_{oc} = \Delta cRT = RT \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \psi_p^0}{2 \pi d_1 r F}; \quad (3)$$

$$p_{ko} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta \psi_p^0 \delta}{r (1 - d/r)^2}; \quad (4)$$

$$p_{kn} = \frac{2 \sigma}{r} \cos \theta; \quad (5)$$

$$p_{ek} = \frac{c \psi_p^0}{2} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 (\psi_p^0)^2 d_1}{\delta_{ac} \pi r^2}; \quad (6)$$

$$p_{mp} = \frac{2 l \eta V}{r \delta_{oc}}; \quad (7)$$

$$p_{nm} = \frac{\varepsilon^2 \varepsilon_0^2 \psi_p^0 \zeta p}{4 \pi^2 dr \eta \chi}, \quad (8)$$

$\Delta c$ – різниця концентрацій електроліту у воді і поровому електроліті цементного каменю бетону (в подвійних електричних шарах ПЕШ на границі розподілу фаз);  $R$ – універсальна газова стала, 8,31 Дж/К·моль;  $T$ – абсолютна температура, К;  $\varepsilon$ –діелектрична проникність середовища (вакууму між контактуючими потенціалвизначальними іонами ПВІ і протиіонами ПІ у ПЕШ), 1;  $\varepsilon_0$ –електрична стала,  $8,81 \times 10^{-12}$  Ф/м;  $\psi_p^0$ –рівноважний електроповерхевий потенціал стенок капілярів, В;  $d_1$  – товщина щільної частини ПЕШ (відстань між ПВІ і ПІ), м;  $r$  – радіус капілярів, м;  $F$ – число Фарадея,  $9,65 \times 10^4$  Кл/моль;  $\zeta$ – електрокінетичний потенціал стінок капілярів, В;  $\delta, \delta_{oc}$ – товщина дифузної частини ПЕШ, м;  $d$ – розмір часток, що складають стінку капіляру в цементному камені, м;  $\sigma$ –поверхневий натяг границі розподілу вода – повітря, 0,073 Н/м (при 20 °С);  $\theta$ – крайовий кутзмочування стінок капіляру;  $c$ – концентрація електроліту;  $l$ – довжина капіляру;  $\eta$ – в'язкість води, 0,001 Па·с;  $V$ – потік (витрата) води в капілярі, м<sup>3</sup>/год;  $P$ – гідростатичний тиск, Па;  $\chi$ – питома електропровідність мембрани (обводненого цементного каменю), 1/Ом·м.

Підставляючи (3–8) у (2) отримаємо:

$$p_h + RT \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \psi_p^0}{2 \pi d_1 r F} + \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta \psi_p^0 \delta}{r \cdot (1 - d/r)^2} + \frac{2 \sigma}{R} + \frac{\varepsilon \varepsilon_0 (\psi_p^0)^2 d_1}{\delta_{ac} \pi r^2} = \frac{2 l \eta V}{r \delta_{oc}} + \frac{\varepsilon^2 \varepsilon_0^2 \psi_p^0 \zeta p}{4 \pi^2 dr \eta \chi}, \quad (9)$$

При незначному зовнішньому тиску і достатньо щільному цементному камені можна прийняти  $p_h = 0$  і  $p_{nm} = 0$ , при цьому водопроникність стає безнапірною та її режим відповідають рівняння:

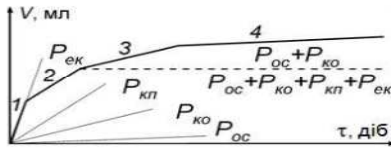
$$p_{oc} + p_{ko} + p_{kn} + p_{ek} - p_{mp} = 0, \quad (10)$$

$$RT \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \psi_p^0}{2 \pi d_1 r F} + \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta \psi_p^0 \delta}{r \cdot (1 - d/r)^2} + \frac{2 \sigma}{R} + \frac{\varepsilon \varepsilon_0 (\psi_p^0)^2 d_1}{\delta_{ac} \pi r^2} - \frac{2 l \eta V}{r \delta_{oc}} = 0. \quad (11)$$

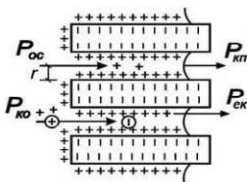
В результаті багаторазово виконуваних досліджень, таких, як вказано на рис.1, б–2, встановлено, що характерну кривубезнапірної водопроникності цементного каменю можна уявити такою, що складається із 4 розділених переламками ділянок, дві останні з яких практично лінійні (рис. 5, дві перші ділянки показані лінійними умовно).

При зіткненні води з поверхнею бетону її проникнення здійснюється під дією вказаних складових внутрішнього тиску таким чином, що кут нахилу кривою на її 1-й ділянці є максимальним і на кожній з наступних ділянок зменшується (рис.5, а). Електрокапілярний тиск  $p_{ек}$ , тиск капілярного підняття  $p_{кп}$  і капілярного осмосу  $p_{ко}$  діють лише в період водонасичення зразка водою і, відповідно, визначають 1, 2 і 3 ділянки графіку безнапірної водопроникності, а осмотичний  $p_{ос}$  – при проходженні (фільтрації) води крізь зразок. Швидкість  $dV/d\tau$  постійна, якщо потік є стаціонарним.

а)



б)



в)

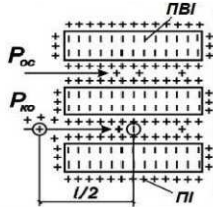


Рис. 5. Безнапірна водопроникність цементного каменю або бетону: а – загальний вигляд кривої водопоглинання – інтегральної залежності від часу  $\tau$  кількості поглиненої води зразком бетону  $V$ ; б, в – схеми утворення внутрішніх тисків

Електрокапілярний тиск  $p_{ек}$  є результатом прояву електрокапілярного ефекту [9; 10], який виявляється у сухому зразку і обумовлений утворенням ПЕШ на стінках капілярів і латеральним (бічним) відштовхуванням протиіонів ньому [2]. Це латеральне відштовхування просуває поверхневі шари води всередину капілярів, формуючи відповідний електрокапілярний потік води (рис.5,б). Дія  $p_{ек}$  припиняється при повному змочуванні водою стінок капілярів і утворенням ПЕШ із зовнішнього боку зразка (рис. 5,в).

Тиск капілярного підняття  $p_{кп}$  діє на границі меніску водозповітрям і також зникає при водонасиченні зразка. При цьому у (5)  $\theta \rightarrow 90^\circ$ ,  $\cos \theta \rightarrow 0$ .

Тиск капілярного осмосу  $p_{ко}$  [9] проявляється за рахунок поляризації ПЕШ при їх розбавленні водою, що поступає у зразок, зміни концентрації протиіонів і виникнення різниці потенціалів вздовж капілярів. Внесок цієї складової найбільш вагомий при проходженні водикрізь пористу структуру контактуючих глобул гелю. При повному насиченні водою глобул концентрація протиіонів ПЕШ і різниця потенціалів вздовж капілярів практично виникають, а тиск  $p_{кп}$  і відповідний потік води стають

малозначними.

Осмотичний тиск  $p_{oc}$  обумовлений різницею концентрацій електроліту  $\Delta c$  у воді, що поступає у зразок, і воді, що заповнює пористі гідросилікатного гелю. При цьому вода, що заповнює пористі, розчиняє електроліт у них, знижуючи відповідним чином його концентрацію  $\Delta c$ . В найбільшому ступені розчинення відбувається в пористостях між глобулами. При середньому радіусі часток гелю  $r^2 = 5$  нм, а глобул гелю  $r^{21} = 25$  нм, кількість води в пористостях між глобулами у 125 раз більше, чим в пористостях між частками, що складають ці глобули, а ступінь розчинення ще більша. У зв'язку з цим різниця концентрацій електроліту в пористостях між глобулами  $\Delta c^{21}$  і осмотичний тиск всередині глобул  $p_{oc} = \Delta c^{21} R T$  одразу після насичення зразка водою стають незначними у порівнянні з відповідними величинами в пористостях між глобулами.

З урахуванням викладеного механізму безнапірної водонепроникності (фільтрації) полягає у встановленні стаціонарного потоку рідини крізь капілярно-пористу систему цементного каменю під дією сил осмотичного тиску води  $p_{oc}$  і сил тертя води о стінки капілярів:

$$p_{oc} S_{ex} \Pi_{uc}^{чк} = \eta S_{кан} W_{\phi\phi} / \delta_{ac}, \quad (12)$$

де  $S_{ex}$  – площа поперечного перерізу, крізь яке вода потрапляє у глобулу гелю;  $S_{кан}$  – площа поверхні капілярів, утворених глобулами.

Із (12) витікає:

$$W_{\phi\phi} = \frac{p_{oc} S_{ex} \Pi_{uc}^{чк} \delta_{ac}}{\eta S_{кан}} = \frac{p_{oc} S_{ex} \Pi_{uc}^{чк} \delta_{ac}}{\eta \Pi \alpha^u \gamma^2 s^2}. \quad (13)$$

Ці визначимо за об'ємом цементного каменю  $V^{чк}$ :

$$V^{чк} = \frac{\Pi}{\rho^u} + \frac{B}{\rho^e} = \Pi \cdot \left( \frac{1}{\rho^u} + \frac{1}{\rho^e} \cdot \frac{B}{\Pi} \right); \quad \Pi = \frac{V^{чк}}{\left( \frac{1}{\rho^u} + \frac{B}{\Pi} \right)} = \frac{S_{ex} l_{\phi}}{\left( \frac{1}{\rho^u} + \frac{1}{\rho^e} \cdot \frac{B}{\Pi} \right)}. \quad (14)$$

Підставляючи (14) у (13) отримаємо:

$$W_{\phi\phi} = \frac{p_{oc} \Pi_{uc}^{чк} \delta_{ac} \cdot \left( \frac{1}{\rho^u} + \frac{1}{\rho^e} \cdot \frac{B}{\Pi} \right)}{\eta l_{\phi} \alpha^u \gamma^2 s^2}, \quad (15)$$

де  $S_{ex}$  – площа перерізу зразка, нормального потоку;  $l_{\phi}$  – довжина шляху фільтрації води, рівна товщині зразка;  $\delta_{ac}$  визначається виразом:

$$\delta_{ac} = \frac{B - B_{xc}}{\rho^e \Pi \alpha^u \gamma^2 s^2} = \frac{B / \Pi - 0,5 \cdot 0,227}{\rho^e \alpha^u \gamma^2 s^2} = \frac{B / \Pi - 0,114}{\rho^e \alpha^u \gamma^2 s^2}. \quad (16)$$

У зв'язку з високою питомою поверхнею гідросилікатного гелю пористість цементного каменю можна визначити за його часткою  $\gamma^2$  в цементному камені і ступенем обводнення. Структура гідросилікатного гелю, що складається з більш крупних глобул, що складаються у свою чергу з гелевих частинок, обумовлює більш високу обводненість частинок гелю  $Obv^2$



і меншувобводненість глобул  $Обв^{2л}$  відповідно до загального для них вираження:

$$Обв^{2л, з} = \frac{V^{обв, з}}{V^{обв, об}} = \frac{4\pi(r^{2л, з})^2 \delta_{ac}}{\frac{4}{3}\pi(r^{2л, з})^3 + 4\pi(r^{2л, з})^2 \delta_{ac}} = \frac{\delta_{ac}}{\frac{r^{2л, з}}{3} + \delta_{ac}}. \quad (17)$$

Відповідно, вираздля пустотності цементного каменюнабуде вигляд:

$$Пус^{ук} = \frac{Ц \alpha^4 \gamma^2 Обв^{2л}}{\rho^6 \cdot \left( \frac{Ц}{\rho^4} + \frac{B}{\rho^6} \right)} = \frac{\alpha^4 \gamma^2 Обв^{2л}}{\rho^6 \cdot \left( \frac{1}{\rho^4} + \frac{1}{\rho^4} \cdot \frac{B}{Ц} \right)}. \quad (18)$$

Виконаємо відповідні розрахунки. Врахуємо при цьому, що концентрації електроліту в цементному камені чи бетоні  $c^{ук}$  і в контактуючій з бетоном воді  $c^6$  визначаються їх показниками рН = 12 і 7, відповідно. Відповідно,  $c^{ук} = 1 \times 10^{-(14-12)} = 1 \times 10^{-2} = 0,02$  моль/л,  $c^6 = 1 \times 10^{-7}$  моль/л,  $\Delta c \approx 0,02$  моль/л.

З урахуванням цієї величини  $p_{oc}$  всередині цементного каменю складе:

$$p_{oc} = 0,02 \times 1000 \times 8,31 \times 293 = 4,89 \times 10^4 \text{ Па.}$$

Підставляючи цю величину та інші дані і визначаючи  $\delta_{ac}$ ,  $Обв^{2л}$  і  $Пус^{ук}$  за (16), (17) і (18), розрахуємо величини за (15) для цементного каменю з В/Ц = 0,4, 0,26 і 0,23 для зразків  $100 \times 100 \times 100$  мм при  $S_{ax}/S_{ob} = 0,4$ .

При  $B/Ц = 0,4$  товщинашару води на частках і глобулах гелю:

$$\delta_{ac} = \frac{0,4 - 0,114}{1000 \times 0,5 \times 0,65 \times 2,52 \times 10^5} = 3,5 \times 10^{-10} \text{ м.}$$

Обводненість глобул і часток гелю, відповідно,

$$Обв^{2л} = \frac{3,5}{25/3 + 3,5} = 0,3, \quad Обв^z = \frac{3,5}{5/3 + 3,5} = 0,67.$$

Пустотність цементного каменю за рахунок пустот між частинками гелю і між глобулами гелю

$$Пус_z^{ук} = \frac{0,5 \cdot 0,65 \cdot 0,3}{1000 \cdot \left( \frac{1}{3100} + \frac{0,4}{1000} \right) \cdot 1,9} = 0,071; \quad Пус_{2л}^{ук} = \frac{0,5 \cdot 0,65 \cdot 0,67}{1000 \cdot \left( \frac{1}{3100} + \frac{0,4}{1000} \right) \cdot 1,9} = 0,159.$$

Відповідно, величинибезнапірноїводопроникностіна ділянці 4 графіку рис. 2, а складуть:

$$W_{об} = \frac{5 \cdot 0,4 \cdot 0,071 \cdot 35 \cdot 10^{-8} \cdot (1/3,1 + 0,4)}{10^{-7} \cdot 10 \cdot 0,5 \cdot 0,65 \cdot 2,52 \cdot 10^6} = 4,36 \cdot 10^{-8} = \left[ \frac{(H/cm^2) \cdot cm \cdot (cm^3/z)}{(H \cdot c/cm^2) \cdot cm \cdot cm^2/z} = \frac{cm}{c} \right];$$

Аналогічно розраховуємо дані для В/Ц = 0,26 і 0,23 (табл. 1). Як бачимо, розрахункові величини  $W_{об}$  близькі до експериментальних (рис. 1, з, 2). Це підтверджує коректність уявлень про механізм безнапірної фільтрації води, що дозволяє використовувати значення  $W_{об}$  для оцінки швидкості вилуговування цементного каменю і бетону (рис. 1, а), кінетики повзучості і т.д.

На основі уявлень про безнапірну водопроникність розглянемо механізм вилуговування цементного каменю і бетону при фільтрації водикрізь нього. Загальноприйнятий механізм і модель корозії бетону I виду, а також

нормування його відповідних термінів служби ґрунтуються на уявленнях про фільтрацію води через бетон і вилуговуванні з нього вапна [11]. При цьому емпірично встановлено граничну кількість  $CaO$ , яка може бути винесена з бетону (бл. 10 %), після чого, як вважають, починається швидке падіння міцності бетону. З цієї величиною обчислюється кількість води  $V_{об}$ , яка, фільтруючи крізь бетон, може винести цю кількість  $CaO$ , і за відповідним рівнянням обчислюється термін безпечної служби споруди.

Таблиця 1

Результати розрахунку безнапірної водопроникності цементного каменю

В/Ц	0,4	0,26	0,23
дасис, нм	3,5	1,78	1,42
Обвгл	0,3	0,177	0,146
Пусцкгл	0,071	0,052	0,045
Вбв, см/с	$4,36 \times 10^{-8}$	$2,29 \times 10^{-8}$	$1,66 \times 10^{-8}$

З урахуванням цього розроблено спосіб нормування фільтраційних властивостей бетону для обводнених конструкцій і прогнозування терміну їх служби при вилуговуванні [3]. У цьому способі кількість фільтруючої води і коефіцієнт фільтрації визначаються так:

$$V_{об} = \frac{K_{ван} \cdot \alpha_{CaO}}{c_{ван}} ; K_{\phi} = \eta \cdot \frac{K_{ван} \cdot \alpha_{CaO} \cdot l_{\phi}^2}{\tau c_{ван}} \quad (19)$$

У такому вигляді рівняння прийнятно для нормування коефіцієнта фільтрації бетону конструкцій, наприклад, обробки тунелю. У цьому рівнянні  $p$  – сума тиску води за обробкою  $p_h$  і осмотичного тиску води  $p_{oc}$ , виражена у см водяного стовпа (напір):

$$p = (p_h + p_{oc}) / \rho^g g = [Pa / ((г/см^3) \cdot (м/с^2)) = м]. \quad (20)$$

Визначимо величину осмотичного тиску водиза(3):

$$p_{oc} = \Delta c RT = 20 \times 8,31 \times 293 = 49000 \text{ Па} = 0,049 \text{ МПа},$$

де  $\Delta c = c_{б} - c_{сп}$  – різниця концентрації електроліту  $Ca(OH)_2$  в поровій волозібетонус<sub>б</sub>іґрунтовой воді за обробкою спорудис<sub>сп</sub>, моль/м<sup>3</sup>;  $c_{б} = 0,02$  моль/л = 20 моль/м<sup>3</sup> (рівна розчинності  $Ca(OH)_2$  у воді при рН = 12,5); величиною  $c_{сп}$ , що відповідає рН = 7, зневажили, тобто  $\Delta c = c_{б}$ .

Величина  $p_{oc} = 0,049$  МПа практично постійна при контактіґрунтовой водиз бетоном, розчином і цементним каменем. При незначному тиску фільтрація води через бетонну (залізобетонну) обробку здійснюється за рахунок осмотичного тиску  $p_{oc}$ . Це має місце у спорудах, розташованих в скельних і глинистих ґрунтах. Напір води спостерігається в нескельних і неглинистих ґрунтах і дорівнює, наприклад, висоті стовпа води від рівня ґрунтових вод до конкретної позначки на обробці тунелю. Його також можна визначити шляхом прямого вимірювання тиску води за обробкою.

На наш погляд, величина  $K_{ван} = 10$  % у [11] прийнята без достатнього обґрунтування, у зв'язку з чим оцінка граничної кількості вилуженого вапна  $q_{ван}$  виявляється заниженою. Більш коректно величину  $K_{ван}$  можна визначити,

виходячи з розроблених авторами кількісних уявлень про міцність цементного каменю і бетону і природі електрогетерогенних контактів ЕГК [1; 3]. Згідно з цими уявленнями міцність в'язучих визначається поверхневою часткою ЕГК  $\gamma_s^{ЭК}$  [1], яка у свою чергу визначається масовим відношенням кількостей кристалогідратних (позитивно заряджених) і гідросілікатних (негативно заряджених) продуктів гідратації цементу. При цьому міцність цементного каменю  $R$  знаходиться в екстремальній залежності від цього відношення з максимумом при  $K/\Gamma = 0,86 \approx 0,9$  (рис.4.18[3]).

Мінімально допустиму відносну величину міцності можна визначити як частку від ділення розрахункового опору бетону на нормативний за СНиП 2.03.01, наприклад, для бетону класу В40  $K_{np} = 22/29 = 0,76$ .

За рис.4.18 [3] зменшенню максимальної міцності  $R_{max} = 44$  МПа до мінімальної  $R_{min} = 44 \times 0,76 = 33$  МПа відповідає зменшення (за рахунок розчинення кристалогідратів  $Ca(OH)_2$ ) відношення  $K/\Gamma = 0,86$  до  $K/\Gamma = 0,68$ , або на  $\Delta(K/\Gamma) = (0,86 - 0,68) / 0,86 = 0,33$ .

При ступені гідратації цементу  $\alpha^h$  предельная величина зменшення кількості  $Ca(OH)_2$ , а отже  $CaO$ , складає  $\Delta(K/\Gamma) = 0,33 \alpha^h$ . Для середнього значення  $\alpha^h = 0,5$  величина  $K_{вап}$  складе  $K_{вап} = (0,5 \cdot 0,33) \cdot 100 \approx 18 \%$ .

Приклад розрахунку безнапірних  $K_{\phi}^{бн}$  і водопроникності  $W_{бв}$ , а також терміну служби обводненої залізобетонної обробки тунелю  $\tau$ . Підставимо у (19)  $l_{\phi} = 20$  см (товщина обробки тунелю метрополітену) та ін. яку [11]:

$$K_{\phi}^{бн} = 1 \cdot \frac{0,18 \cdot 0,35 \cdot 0,63 \cdot 20^2}{(100 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600) \cdot 50 \cdot 0,0012} = 8,4 \cdot 10^{-8} \left[ \frac{(г / см^3) \cdot см^2}{с \cdot см \cdot г / см^3} = \frac{см}{с} \right].$$

Як бачимо, отримана реальна величина граничного коефіцієнта безнапірної фільтрації води  $K_{\phi}^{бн}$ , яку можливо визначити за даними про склад бетону. Для практичного застосування такого способу нормування фільтраційних властивостей бетону зручніше нормувати показник його безнапірної водопроникності з визначенням її величини  $W_{бв}$  на зразку  $10 \times 10 \times 10$  см за виразом (1). Цей спосіб придатний також для прогнозування довговічності бетону обробки (конструкції) на будь-якій ділянці шляхом відбору зразків (кернів), визначення дійсної величини їх безнапірної водопроникності  $W_{бв}$  і прогнозування терміну служби бетону на цій ділянці за допомогою виразу

$$\tau = \frac{V_{об} \times l_k}{W_{бв} \times l_{об}} = \left[ \frac{(см^3 / см^3) \cdot см}{(см / с) \cdot см} = с \right], \quad (24)$$

де  $l_k, l_{об}$  – довжина шляху фільтрації в конструкції і випробовуваному зразку, відповідно, см.

Приклад: реальні величини  $W_{бв} = 1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-8}$  см/с, інші вихідні дані яку [11]:

$$\tau = \frac{33,3 \times 20}{1 \times 10^{-6} \times 10} = 6,7 \times 10^7 с = 2,1; \quad \tau = \frac{33,3 \times 20}{1 \times 10^{-9} \times 10} = 6,7 \times 10^8 с = 210, \text{ років,}$$

що відповідає реальним, як вкрай низьким, так і тривалим термінами служби бетону при корозії І виду.

**Висновок.** Таким чином, у статті викладені положення колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки щодо впливу поверхневого заряду та електроповерхневого потенціалу дисперсної фази капілярно-пористих матеріалів на процес фільтрації в них, зокрема, безнапірну водонепроникність бетону. Встановлено, що на безнапірну водонепроникність цементного каменю і бетону на стадії водонасичення впливають осмотичний, капілярно-осмотичний, капілярний і електрокапілярні тиски, а на стадії встановлення стаціонарного потоку – осмотичний тиск і в'язкісний опір течії. Наведені відповідні рівняння та експериментальні методики, які дозволяють ефективно керувати водонепроникністю бетону, його довговічністю при вилуговуванні.

1. Плугін А.А. Колоїдна-хімія та фізико-хімічна механіка як основа виробництва ресурсозберігаючих мінеральних в'язучих речовин та високоефективних композиційних матеріалів на їх основі / А.А. Плугін, А.М. Плугін, О.С. Кагановський, О.В. Градобоев // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків, 2013. – Вип. 138.– С.7-19.
2. Плугін А.Н. Электрогетерогенные взаимодействия при твердении цементных вяжущих: Дисс... д.х.н.- 02.00.11.- Защ.14.06.89.- К.: ИКХХВ, 1989.- 282 с.3.Плугин А.А. Долговечность бетона и железобетона в обводненных сооружениях: Коллоидно-химические основы: Дисс... д.т.н.- 05.23.05.- Защ.18.10.2005.- Харьков: УкрГАЗТ, 2005.- 442 с. 4. Плугин А.Н. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них: В 3-х тт. Т.1. Коллоидная химия и физико-химическая механика цементных бетонов / А.Н.Плугин, А.А.Плугин, Л.В.Трикоз, А.С.Кагановский, Ал.А.Плугин; Под ред.А.Н.Плугина. – К.: Наук.думка, 2011. – 331 с. 5. Плугин А.Н. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них: В 3-х тт. Т.2. Теория твердения портландцемента / А.Н.Плугин, А.А.Плугин, О.А.Калинин, С.В.Мирошниченко, Д.А.Плугин, А.С.Кагановский, Ал.А.Плугин, О.В.Градобоев; Под ред. А.Н.Плугина. – К.: Наук.думка, 2012. – 224 с. 6. Плугин А.Н. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них: В 3-х тт. Т.3. Теория прочности, разрушения и долговечности бетона, железобетона и конструкций из них / А.Н.Плугин, А.А.Плугин, О.А.Калинин, С.В.Мирошниченко, Д.А.Плугин, А.С.Кагановский, Ал.А.Плугин, О.В.Градобоев, О.С.Борзяк; Под ред. А.Н.Плугина. – К.: Наук.думка, 2012. – 288 с. 7. Коллоидно-химические основы прочности, разрушения и долговечности железобетонных конструкций/А.Н.Плугин, О.А.Калинин, А.А.Плугини др.// Матер.Вісн.шк. «Вибротехнологія-96».- Одесса: Вовум, 1996.- Ч.3.- С.63-89.
8. The Mechanism of Water and Ionic Permeability of Concrete/ A.N.Plugin, I.G.Prokopova, S.Wild, A.A.Plugin // Proc. of the 10<sup>th</sup> Intern. Congr. of the Chemistry of Cement.- Goteborg: Inform Trycket, 1997.- V.4.- 4iv075.- 8pp. 9. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии.- Л.: Химия, 1984.- 368 с. 10. Шукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия.- М.: МГУ, 1982.- 352с. 11. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н.Алексеев, Ф.М.Иванов, С.Модры, П.Шиссль.- М.: Стройиздат, 1990.- 320 с.