

Результати розрахунку відображені в таблиці і на графіку залежності ексергетичного ККД η_e від холодопродуктивності $Q_{х ст}$ (рис.2).

Аналізуючи результати графічної залежності, доходимо висновку, що ексергетичний ККД одноступеневих холодильних машин кондиціонерів фірми «SANYO» за стандартних умов тим вищий, чим менша холодопродуктивність кондиціонера. Для кондиціонованого приміщення з метою забезпечення найвищого ККД холодильної установки краще використовувати декілька кондиціонерів з малою холодопродуктивністю, ніж один з великою.

1. Соколов Е.Я., Бродянский В.М. *Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоиздат, 1981. – 320 с.* 2. Богданов С.Н., Иванов О.П., Куприянова А.В. *Холодильная техника. Свойства веществ: Справочник. Изд.3-е, перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1985. – 208 с.*

УДК 624.012

Лівша Р.Я.

Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра автомобільних шляхів

ВПЛИВ МАСШТАБНОГО ФАКТОРА ТА СПІВВІДНОШЕННЯ ВОЛОГІСНОЇ І КОНТРАКЦІЙНОЇ СКЛАДОВИХ ЗАГАЛЬНОЇ УСАДКИ ЦЕМЕНТНО-ПІЩАНИХ РОЗЧИНІВ НА НАПРУЖЕНИЙ СТАН ВИРОБІВ І КОНСТРУКЦІЙ НА ЇХ ОСНОВІ

© Лівша Р.Я., 2002

Описана методика вивчення вологісної і контракційної складових загальної усадки цементно-піщаних сумішей з врахуванням фізики процесу тверднення і впливу масштабного фактора на внутрішній напружений стан конструкцій і виробів на їх основі

Досліджували зразки розміром $0.04 \times 0.04 \times 0.16$, $0.1 \times 0.1 \times 0.515$ і $0.2 \times 0.2 \times 0.515$ м із цементно-піщаного розчину (ЦПР) складу Ц:П:В=1:2:0,4, виготовлені з польовошпатового піску з $M_{кр} = 2.2$ і цементу марки 400 Миколаївського ЦГК.

Зразки після виготовлення одну добу знаходились у камері нормального тверднення, а після розпалублювання їх зважували і після вимірювання компаратором їх початкової довжини між анкерами, які виступали з торців, переносили на полицки стелажів. Методика вимірювання деформацій описана в роботі [1]. Температуру і вологість повітря в лабораторії фіксували термографом і гігрографом.

Як відомо, загальна усадка складається із контракційної, вологісної і карбонізаційної складових. У монографії С.В. Александровського [2] описані результати дослідження контракційної усадки Ю.А. Нілендером, Б.Г. Скрамтаєвим, вологісної – З.М. Цілоسانی, Берналом, Фельдманом і Середою, карбонізаційної – Пауерсом.

Більшість експериментальних досліджень дають інформацію тільки про сумарну величину деформацій усадки без розділення на вищепераховані складові. Методика досліджень деформацій усадки за тривалий час практично не змінилась.

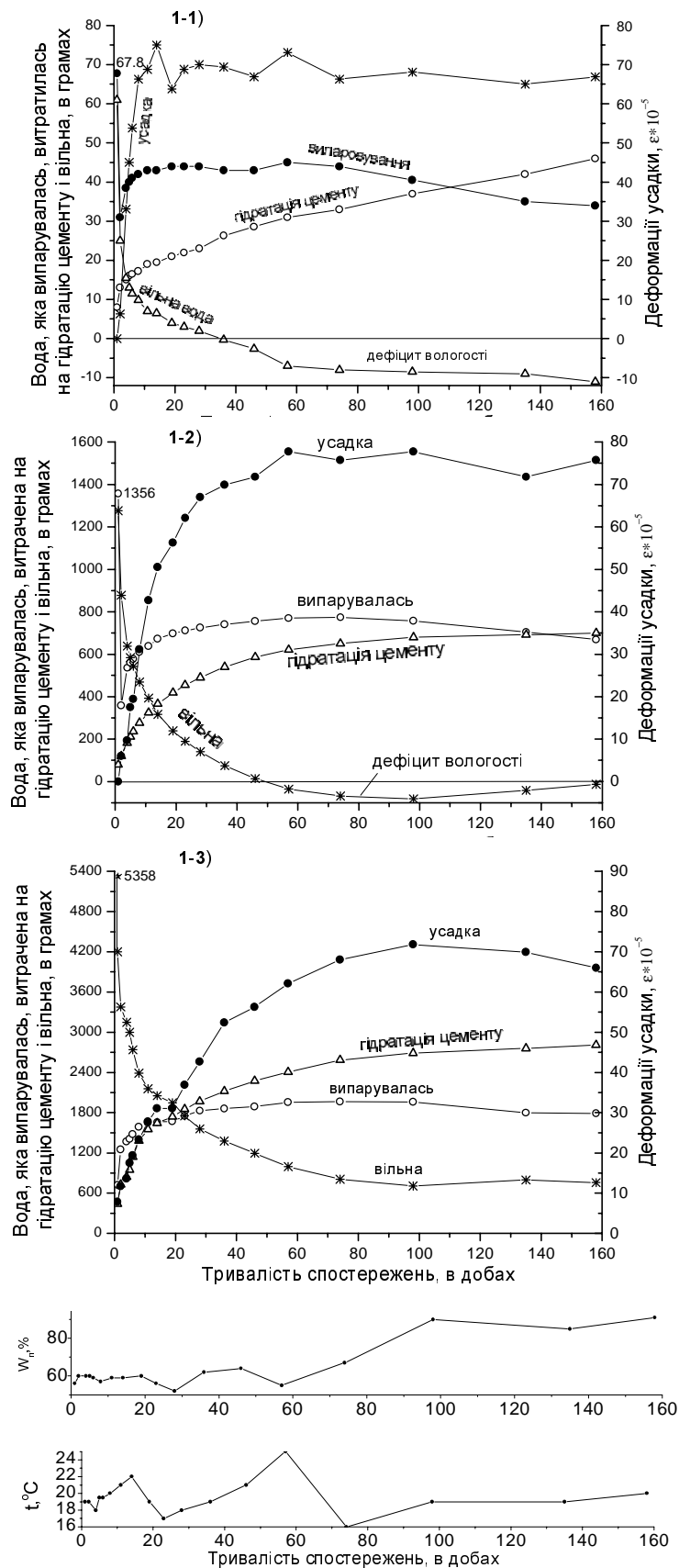


Рис. 1. Суміщені графіки зразків розмірами: а – $0,04 \times 0,04 \times 0,16$, б – $0,1 \times 0,1 \times 0,515$ і $0,2 \times 0,2 \times 0,515$ м

При обробці результатів будують залежності деформацій загальної усадки від часу спостережень, від зменшення вологості за масою, від інтенсивності випаровування (в $\text{г}/\text{см}^2$) з поверхні, з об'єму (в $\text{г}/\text{см}^3$), або в $(\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{год})$.

Але фізична суть тверднення цементних сумішей інша. Після змішування складових зразу ж починається гідратація, незалежно від умов, в яких зразки перші 1-3 доби тверднуть, на яку витрачається значна кількість води, а вже пізніше залежно від методики досліджень, починають контролювати випаровування води і деформації усадки. Здебільшого втрату води при висиханні зразків в повітряно-сухих умовах визначають за масою ($\Delta W_m, \text{г}/\text{г} \cdot 100\%$), що менш доцільно.

Тому, для вивчення деформації усадки, намагаючись слідувати фізиці тверднення цементного тіста, був прийнятий такий порядок дослідження:

- визначили з високою точністю масу складових у бетонних зразках (цемент, пісок, вода), а також початкову об'ємну вологість свіжоприготовленої суміші із ЦПП – ΔW_o^n , в $\text{г}/\text{см}^3$;
- контролювали кількість води в зразках, яка випаровується, витрачається на гідратацію цементу і залишається вільною в зразках в $\text{г}/\text{см}^3$;
- для повного і надійного аналізу внаслідок дослідження будували “суміщені графіки”, на яких одночасно представляли чотири графіки на осі “у”: залежності кількості води, яка випарувалась, витратилась на гідратацію цементу, залишилась вільною в зразках і деформації усадки, а на осі “х”: вологість і температуру повітря в лабораторії і час спостереження в добах (рис. 1).

С.В. Александровський [2] і О.Є. Шейкін [3] встановили, що через 28 діб на гідратацію цементу витрачається кількість води, що дорівнює 0,15, через 90 діб – 0,20, а через 2-3 роки - 0,23-0,25 від маси сухого цементу в зразках.

За вказаними даними будували для кожного зразка епюри в масштабі, з яких графічно знімали необхідні значення кількості води, що витрачена на гідратацію цементу (рис. 2).

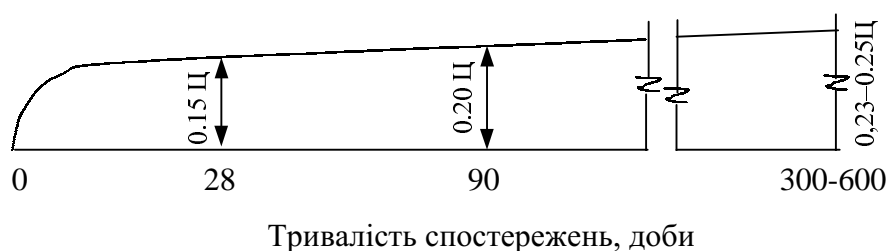


Рис. 2. Епюра для визначення кількості води, яка витрачена на гідратацію цементу

– визначили об'єм поверхневого шару ($V_{ш}^i, \text{см}^3$), з якого випарувалась вода за певний час (t , в добах), за масою води, яка випарувалась, і початковим значенням об'ємної вологості ($\Delta W_o^n, \text{г}/\text{см}^3$). Вважаючи, що вода випаровується з усієї поверхні зразків рівномірно, визначали товщину поверхневого шару ($h_{ш}$, в см) зразків різних розмірів за рівняннями

$$h_{n.u.}^4 = 0,000527 \cdot (V_{n.u.}^4)^{1,429}, \quad (1)$$

$$h_{n.u.}^{10} = 0,000963 \cdot (V_{n.u.}^{10})^{1,221}, \quad (2)$$

$$h_{n.u.} = 0,000145 \cdot (V_{n.u.}^{20})^{1,309}, \quad (3)$$

які виражають залежність між товщиною поверхневого шару зразків різного розміру і їх об'ємом.

Отримані товщини поверхневих шарів $h_{ш}$, з яких випарувалась вода, використовували для побудови епюр зміни вологості в поперечному перетині зразків, необхідні для визначення напружень.

На рис. 3 показані схематичні епюри вологості в поперечному перетині зразків в декількох стадіях. На рис. 3, а – в початковій стадії при змішуванні розчину і виготовленні зразків, коли в кожному $см^3$ об'єму зразка знаходиться однакова кількість води, ордината епюри дорівнює W_o^n .

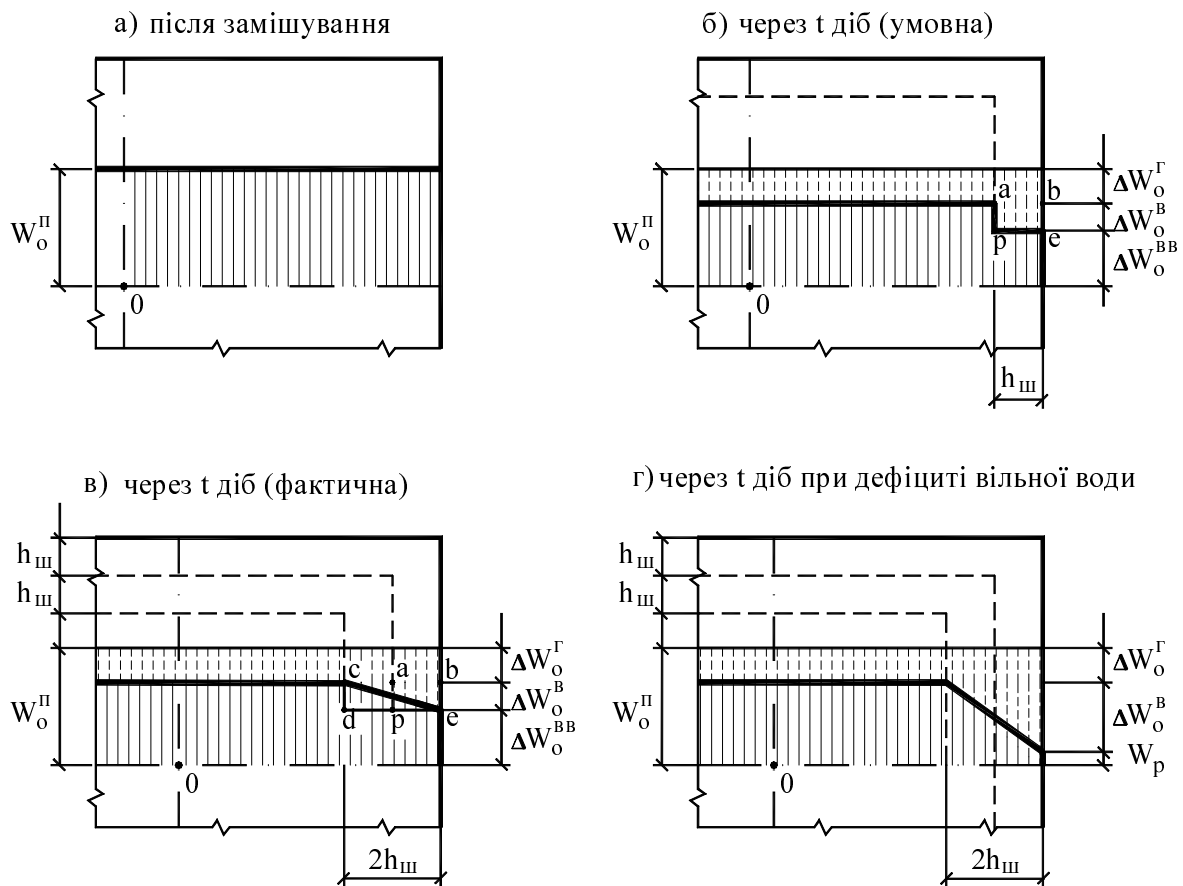


Рис. 3. Епюри зміни вологості в поперечному перерізі дослідних зразків: а) – епюра вологості свіжовиготовлених зразків; б) – через t діб від початку спостережень (умовна); в) – через t діб від початку спостережень (фактична) при наявності вільної води; г) – те саме при дефіциті вільної води в зразках, характерна для зразків $0.04 \times 0.04 \times 0.16$ і $0.1 \times 0.1 \times 0.515$ м, W_p – рівноважна вологість

На рис. 3, б – через час t (в добах) від початку спостереження або в кінці спостережень, коли стабілізувались випаровування і деформації усадки. За цей час частина води витратилась на гідратацію цементу в цілому об'ємі зразків ($\Delta W_o^Г$), інша частина – на випаровування з поверхневого шару ($h_{ш}$) – прямокутник $aber$. Поділивши кількість води, яка випарувалась за час t на початкову об'ємну вологість ЦПР W_o^n ми отримали, звичайно,

умовно, що в цьому шарі *aber* відсутня повністю вода, але відомо, що при випаровуванні води з поверхні зразків, які тверднуть в умовах усестороннього висихання, плівка води, яка окутує стінки капіляр і пор ЦК, повинна потовщуватись від поверхні в середину зразка з певним гідравлічним ухилом, який можна знайти математично. Нами гідравлічні ухили дослідних зразків визначені графоаналітичним методом і представлені нижче.

Щоб фізична суть випаровування (рис. 3, б, в) відповідала математичним діям і графічній побудові епюр зміни вологості, необхідно, щоб площа прямокутника *aber* (рис. 3, б) відповідала трикутнику *edc* (рис 3, в). для цього проводимо на рис. 3, в дві товщини шару випаровування біля поверхні зразка ($2h_{ш}$) і з'єднуємо точки *се*. В цьому випадку площа трикутника *ecd* буде дорівнювати площі прямокутника *aber*: $S_{aber} = S_{ecd}$, або $eb \cdot h_{ш} = \frac{1}{2} eb \cdot x$, звідки знаходимо, що $x = 2h_{ш}$.

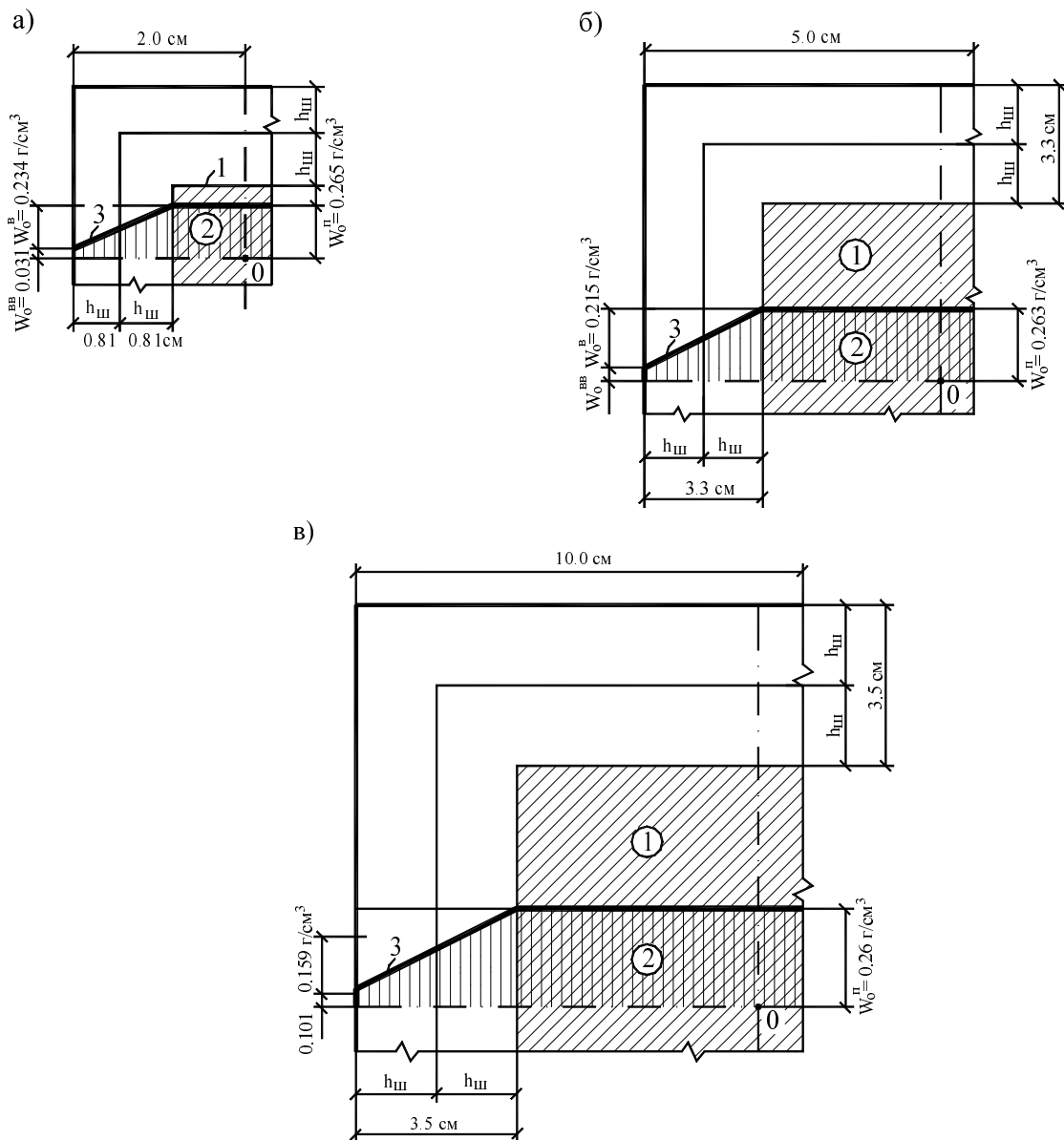


Рис. 4. Фактичні епюри зміни вологості в поперечному перерізі дослідних зразків розмірами: відповідно а – $0.04 \times 0.04 \times 0.16$ м, б – $0.1 \times 0.1 \times 0.515$ м, в – $0.2 \times 0.2 \times 0.515$ м з гідравлічними ухилами: 1 – об'єм зразків, з якого вода не випаровується; 2 – епюра вологості в поперечному перерізі зразків; 3 – гідравлічний ухил в частках одиниці

Отже, ми отримуємо трикутник edc , площа якого рівновелика площі прямокутника $abep$. За нахилом бісектриси трикутника “ ce ” визначені гідравлічні ухили дослідних зразків з врахуванням коефіцієнта масивності на момент стабілізації випаровувань і деформацій.

На рис. 4 показані фактичні епюри зміни вологості в четвертях поперечних перетинів дослідних зразків різних розмірів.

Аналіз результатів досліджень показав, що найточніше гідравлічний ухил залежно від кількості цементу в зразках, апроксимується рівнянням вигляду

$$i_0 = \frac{Ц}{224145,6} + 0.132. \quad (4)$$

Відхилення дослідних значень i_0 від розрахункових не перевищує 4%.

Як видно з досліджень, вода із зразків випаровується тільки з поверхневого шару завтовшки $h_m \approx 1,5h_m$, а в середині зразків знаходиться масив, з якого вода не випаровується (рис. 4, позн. 1). З останнього робимо висновок, що гідратація цементу проходить в цілому об’ємі зразків, на яку витрачається відповідна кількість води і відбувається контракційна усадка. Звичайно, ступінь гідратації цементу в поверхневому шарі нижчий, ніж в масиві, з якого вода не випаровується, в якому умови тверднення схожі з твердненням зразків у воді. За даними [3] в зразках із ЦПР, які тверднуть у воді, зменшується загальна (інтегральна) пористість внаслідок підвищення ступеня гідратації цементу, при цьому зростає відносна пористість, яка представлена капілярами з радіусами менше 1000 \AA , при одночасному вагомому зменшенні макрокапілярів з радіусами більше 10000 \AA . У поверхневому шарі гідратація цементу проходить в повітряно-сухих умовах, тому переважатимуть пори з радіусами більше 10000 \AA .

При випробуваннях дослідних зразків близнят на розтяг при згині підтвердилось дане припущення. На зламі зразків чітко відрізнялось колоподібне ядро іншого кольору, ніж поверхневий шар, пористість і твердість ядра і поверхневого шару теж були різними. У деяких зразках злам проходив по тріщинах, які починались з поверхні зразків.

Оскільки на напружений стан зразків впливає величина і співвідношення вологісної і контракційної складових загальної усадки, для їх визначення використали постулат: “кількість води, яка випарувалась, пропорційна вологісній усадці, а кількість води, яка витратилась на гідратацію цементу – контракційній усадці.”

Для прикладу наведемо розділення загальної усадки зразків всіх трьох розмірів на вологісну ($\epsilon_y^e \cdot 10^{-5}$) і контракційну ($\epsilon_y^k \cdot 10^{-5}$) складові (див. таблицю). Для цього з журналу досліджень виписуємо кількість води, яка випарувалась і витратилась на гідратацію цементу, а також загальну усадку через 2, 11, 23, 46, 57 і 158 діб від початку спостережень для зразків розміром $0,04 \times 0,04 \times 0,16$, $0,1 \times 0,1 \times 0,515$ і $0,2 \times 0,2 \times 0,515$ м і виписуємо в колонки 1, 2, 3, 4 і 5 табл. 4, а, 4, б, 4, в.

Поділ загальної усадки проводимо для 5 рядка табл. 4, б в такій послідовності:

Складаємо пропорцію: сумарна кількість води, яка випарувалась і витратилась на гідратацію цементу пропорційна загальній усадці, а кількість води, яка випарувалась – вологісній складовій загальної усадки, тобто $\frac{774 + 657}{77,7} = \frac{774}{x}$, звідки $x = \epsilon_y^e = \frac{77,7 \cdot 774}{1431} = 42 \cdot 10^{-5}$,

що становить $42 \cdot 10^{-5} : 77,7 \cdot 10^{-5} = 0,54 \sum \epsilon_y \cdot 10^{-5}$; аналогічно $\frac{1431}{77,7} = \frac{657}{x}$, звідки

$x = \varepsilon_y^k = \frac{77,7 \cdot 657}{1431} = 35,7 \cdot 10^{-5}$, що становить $35,7 \cdot 10^{-5} : 77,7 \cdot 10^{-5} = 0,46 \sum \varepsilon_y \cdot 10^{-5}$. Значить вологісна усадка становить 0,54, а контракційна 0,46 від загальної усадки; 0,54 і 0,46 – відповідно коефіцієнти вологісної і контракційної складових K_B і K_K загальної усадки, визначені на 74 добу від початку спостережень.

**Вологісна ($\varepsilon_y^e \cdot 10^{-5}$) і контракційна ($\varepsilon_y^k \cdot 10^{-5}$)
складові загальної усадки дослідних зразків
а) 0,04×0,04×0,16 м**

| № з/п | Через діб | Кількість води, яка | | $(\sum E_y \cdot 10^{-5})$ | $E_y^k \cdot 10^{-5}$ | | $E_y^e \cdot 10^{-5}$ | |
|-------|-----------|---------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------|------|-----------------------|------|
| | | випарувалась, г | витратилась на гідратацію, г | | K_K | | K_B | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | 7 | |
| 1 | 2 | 31 | 13,0 | 6,3 | 1,9 | 0,30 | 4,4 | 0,70 |
| 2 | 11 | 43 | 19,0 | 68,8 | 21,1 | 0,31 | 47,7 | 0,69 |
| 3 | 23 | 44 | 22,0 | 68,8 | 29,9 | 0,43 | 38,9 | 0,57 |
| 4 | 46 | 44 | 28,6 | 66,9 | 26,4 | 0,39 | 40,5 | 0,61 |
| 5 | 57 | 45 | 31,0 | 73,1 | 29,8 | 0,41 | 43,3 | 0,59 |
| 6 | 158 | 34 | 46,0 | 66,9 | 38,5 | 0,57 | 28,4 | 0,43 |

б) 0,1×0,1×0,515 м

| | | | | | | | | |
|----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
| 1 | 2 | 358 | 140 | 5,8 | 1,6 | 0,28 | 4,2 | 0,72 |
| 2 | 11 | 638 | 338 | 42,7 | 14,8 | 0,35 | 27,9 | 0,65 |
| 3 | 23 | 711 | 462 | 62,1 | 24,5 | 0,39 | 37,9 | 0,61 |
| 4 | 46 | 755 | 588 | 72,8 | 31,9 | 0,44 | 40,9 | 0,56 |
| 5* | 57 | 774 | 657 | 77,7 | 35,7 | 0,46 | 42,0 | 0,54 |
| 6 | 158 | 711 | 700 | 75,7 | 37,6 | 0,50 | 38,1 | 0,50 |

в) 0,2×0,2×0,515 м

| | | | | | | | | |
|---|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 2 | 720 | 439 | 7,8 | 3,0 | 0,38 | 4,8 | 0,62 |
| 2 | 11 | 1587 | 1380 | 23,3 | 10,8 | 0,47 | 12,5 | 0,53 |
| 3 | 23 | 1750 | 1854 | 36,9 | 19,0 | 0,51 | 17,9 | 0,49 |
| 4 | 46 | 1890 | 2273 | 56,3 | 30,7 | 0,55 | 25,6 | 0,45 |
| 5 | 57 | 1965 | 2585 | 68,0 | 38,6 | 0,57 | 29,4 | 0,43 |
| 6 | 158 | 1790 | 2810 | 66,0 | 40,3 | 0,61 | 25,7 | 0,39 |

Аналіз результатів розділення загальної усадки на дві складові для зразків розміром 0,04×0,04×0,16 м (рис. 1, а) показує, що випаровування припинилось через 23 доби від початку спостережень, до цього часу сумарна усадка стабілізувалась, в зразках вже була відсутня вільна вода і тому при зміні вологості повітря, зразки то набухали, то скорочувались. Відповідно вологісна складова сумарної усадки теж – то збільшувалась то зменшувалась, а контракційна – постійно зростала.

Для зразків розмірами 0,1×0,1×0,515 м (рис. 1, б) випаровування і загальна усадка стабілізувались на 74 добу, в зразках відсутня була вільна вода, і при збільшенні вологості повітря зразки сорбували вологу з повітря і набухали, тому сумарна усадка і її вологісна складова теж зменшились. Контракційна складова постійно зростала.

Для зразків розміром 0,2×0,2×0,515 м (рис. 1, в) усадка і випаровування теж стабілізувались через 74 доби, але в зразках залишилась ще значна кількість вільної води, тому

при збільшенні вологості повітря до 90 і більше процентів в зразках наступив стан гігromетричної рівноваги, а при збереженні високої вологості повітря більше 50 діб – почався процес сорбції вологи, тому зразки, починаючи з 90 доби, почали набухати. Контраційна складова усадки постійно зростала, а вологісна складова після 110 доби почала зменшуватись внаслідок набухання.

Суміщені графіки (рис. 1, а, в) допомагають глибше аналізувати результати дослідження розділення загальної усадки на дві складові, а також правильно визначити стан гігromетричної рівноваги, який може наступити лише тоді, коли в зразках є вільна вода. Коли в зразках дефіцит вільної води, то про стан гігromетричної рівноваги не може йтися. У той час як при побудові звичайних залежностей деформацій усадки від часу спостережень, поява горизонтальних ділянок оцінюється як стан гігromетричної рівноваги.

Аналогічно проведені розрахунки для зразків трьох розмірів (таблиця, колонки 6-9).

Як видно з таблиці, а для зразків розміром 0,04x0,04x0,16 м контраційна складова загальної усадки постійно збільшується, а вологісна – зменшується.

Для зразків розміром 0,1x0,1x0,515 м (таблиця, б) вологісна і контраційна складові загальної усадки через 158 діб вирівнялись, а для зразків 0,2x0,2x0,515 м (таблиця, в) – контраційна складова становила 0,61 від загальної усадки, а вологісна – 0,39, тобто контраційна складова перевищувала вологісну на 22 %.

Значить для визначення напружень у зразках різних розмірів для поверхневих шарів треба враховувати дію загальної усадки, а для внутрішнього масиву – контраційної складової.

Для приблизних розрахунків напружень можна використовувати закон Гука

$$\Delta \epsilon E = \sigma, \quad (5)$$

в якому $\Delta \epsilon$ – різниця усадок поверхневого шару і внутрішнього масиву, E – модуль пружності ЦПР.

Для точних розрахунків необхідно використовувати методику, описану в праці [4].

1. Ливша Р.Я. Прогнозирование усадочных деформаций цементно-песчаных растворов // Вест. Львов. политех. ин-та. Львов. Изд. при Львов. гос. ун-те "Вища школа", 1965. № 155. С.42-44. 2. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменение температуры и влажности с учетом ползучести. – М.: Стройиздат, 1973. – 432 с. 3. Шейкин А.Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня. – М.: Стройиздат, 1974, -192 с. 4. Лівша Р.Я. Вплив усадки на геометричні та деформівні параметри бетонного зразка // Збірн. матер. VI Міжнар. наук. конф. "Актуальні проблеми будівництва та інженерії докiлля" Львів-Кошиці-Жешув, Львів, 12-15 вересня 2001.