

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 693.666.9

ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄМНИХ ЗМІН ГІПСУ З МІНЕРАЛЬНИМИ ДОБАВКАМИ

Асп. А. С. Єфіменко

STUDY OF VOLUME CHANGES OF PLASTER WITH MINERAL ADDITIVES

Postgraduate student A. Yefimenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.193.2020.229525>

Анотація. Досліджено вплив мінеральних добавок на вологісні деформації штучного гіпсового каменю. Встановлено, що величина вологісної деформації залежить від вмісту мінеральної добавки. Максимальна деформація спостерігається у гіпсового каменю без добавки. Зі збільшенням її вмісту деформація знижується. Це зниження має не лінійний характер, а хвилюподібний аналогічно до відомих залежностей міцності й водостійкості від вмісту шлаку. Це підтверджує припущення про внесок у низьку водостійкість гіпсу розклинювального впливу води у його структурі. Величини вологісних деформацій штучного гіпсового каменю запропоновано застосовувати як додаткові показники його водостійкості.

Ключові слова: гіпс, водостійкість, вологісна деформація, мінеральна добавка, шлак доменний гранульований мелений.

Abstract. Pre-treatment viznachae infusion of mineral additives on the natural deformation of gypsum virob. The main reason for the low water resistance of the gypsum viruses is stated. The reason is ϵ a wedge vise. Such a grip breaks out local contacts with crystals. Tsi cause one to dress up in a negative synergistic effect. A wide circle of naukovts is looked around. Fakhivtsi detect the inflow of mineral and chemical additives on the water resistance of the gypsum. Zokrem is honored that the power of materials on the basis of inorganic viscous accumulation of the manifestation of electrostatic interconnection of subordinate electric spheres of structural elements.

Before it was confirmed, the value of the biological deformation of the gypsum should be deposited instead of a mineral supplement. Uwagu zoseredzheno on slag blast-furnace granulated chalk.

The meta of the statistic was the determination of the degree of determination of the indicator of the uniform lineal deformation of the water saturation (swelling) ϵ_w at m / m . Such an indicator can be used with a supplementary indicator of water resistance. In the experimental preliminaries, we used G-10 grade G-10 industrial gypsum, Zaporizhstal blast-furnace granulation slag, and a plasticizing additive - sodium lignosulfonate in a 2% mixture of gipsu

For further development, the skin with three eyes was placed vertically near the vessel. A steel overlay was placed on top of the zrazok. Before the overlay, an indicator of the year-old type was set, fastened to a laboratory stand. The distance was fixed to the cob to show the indicator. The deformation took 3–5 years to develop. In the meantime, having reached the maximum value and mayzhe, the odra was repaired to decrease. At the same time, there will be a projection of the addition of a supplementary indicator of water resistance to the water consum

Due to the increase in the amount of slag, the deformation will decrease. The price decrease did not demonstrate a linear character. The character is sickly. This deposit is analogous to that of

the deposits of the mines and water from the slag. Minimal deformation is more favorable for a piece gypsum stone with a removable slag $W / (H + W)$ 0.05–0.1 and ponad 0.27. Tse pidtverzhu podpuschennya about injections at low water resistance gipsu ozklinuvalnogo inlet water. The wedge-shaped inflow of water is drawn through the contacts between the crystals and particles in the structures of the hypsers. The values of the natural deformations of a piece gypsum stone are projected according to the parameters of the water resistance.

Keywords: gypsum, water resistance, free deformation, mineral additive, slag of blast-furnace granulation of chalking.

Вступ. Матеріали на основі гіпсових в'язучих характеризуються екологічністю, достатньою міцністю та довговічністю, невеликою вагою, відносно низькими тепло- і звукопровідністю. Завдяки цим перевагам гіпсові матеріали широко використовуються в будівництві, проте недостатня водостійкість, яка полягає у суттєвій втраті міцності у разі водонасичення або зволоження, стримує їх більш широке застосування. Низьку водостійкість гіпсових матеріалів в основному пояснюють розчинністю двогідрату кальцію, а також розклинювальними силами, створюваними водою, що всочується в пори.

На сьогодні відомо багато способів підвищення водостійкості гіпсу: зниження водогіпсового відношення, використання полімерних добавок, просочення та гідрофобізація поверхонь гіпсового каменю, сполучення з гідралічними в'язучими, введення активних мінеральних добавок, добавок-мікронаповнювачів, що сприяють формуванню щільної структури гіпсового каменю. Під час досліджень з удосконалення складів гіпсового в'язучого водостійкість оцінюють коефіцієнтом розм'якшення – відношенням міцності на стиск у водонасиченому стані до міцності на стиск у вихідному сухому стані.

Проте внесок у водостійкість зазначених розклинювальних сил, створюваних водою, що всочується в пори, залишається недостатньо вивченим. Одночасно відомо, що ці сили одночасно призводять до вологісних деформацій штучного каменю. Отже, дослідження об'ємних деформацій штучного гіпсового каменю з мінеральними добавками та їх

зв'язку з водостійкістю є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій науковців констатує визнання низької водостійкості гіпсових виробів. Низьку водостійкість гіпсових виробів пояснюють досить високою розчинністю гіпсу-двогидрату 2,04 г/л [1]. Крім того, вода, проникаючи в міжкристалічні порожнини гіпсового каменю, адсорбується на твердих поверхнях, між якими виникає розклинювальний тиск, що розриває локальні контакти між кристалами. Можна припустити, що ці причини сполучаються, підсилюючи одна одну.

Модифікації гіпсу присвячено багато досліджень [2–6]. Водостійкість гіпсових в'язучих можна підвищити зниженням водогіпсового відношення, поєднанням з гідралічними в'язучими [4–6], введенням мінеральних добавок-наповнювачів [7–12], гідрофобізувальних добавок [12], полімерів, фібри [13]. Автори дають різні пояснення причин покращення властивостей. Комплексна мінеральна добавка, що включає доменний гранульований шлак, золу-винос і пуцолану (цеоліт), згідно з [15] забезпечує ущільнення структури цементного каменю, підвищення міцності. У [16] за рахунок уведення в шлаколуужне в'язуче портландцементного клінкеру досягається управління власними деформаціями штучного каменю. Автори [17] для покращення фізико-механічних характеристик модифікують в'язучі речовини глинистими наповнювачами. Електроліти, особливо у вигляді комплексної добавки, забезпечують підвищення водонепроникності [18],

міцності [19] цементних композитів. У [19] такий вплив сульфатів і карбонатів калію і натрію пояснюється модифікацією мікроструктури і порової структури.

Регулювання структури і властивостей гіпсових матеріалів також можливе за рахунок уведення мінеральних наповнювачів та інших в'язучих різного складу і ступеня дисперсності [4–13, 20–23]. Найбільш стабільні композиції гіпсових в'язучих – гіпсоцементопуцоланові в'язучі [1]. Серед їх продуктів гідратації є не тільки кристали двогідрату сульфату кальцію, а й низькоосновні гідросилікати кальцію та інші малорозчинні гідрати. За [14], вони здатні утворювати електрогетерогенні контакти з кристалами двогідрату сульфату кальцію, які й забезпечують формування водостійкої структури.

У [4] водостійкість гіпсу з відходів досягається шляхом його змішування із золою-виносом і портландцементом. Автори [21] вводять у гіпс мінерали і органічні модифікатори, пояснюючи їх дію посиленням на атомно-молекулярному рівні. У [20] як замітник природного гіпсу застосовані промислові відходи, що містять двогідрат сульфату кальцію. Автори [22] для формування найбільш щільної структури гіпсового каменю застосовують методи комп'ютерного моделювання складу сировинної суміші, а [2] – обґрунтовують оптимальну пропорцію, яка забезпечує максимальну міцність змішаного в'язучого зі шлаку, гіпсу та клінкеру. У [5, 7, 10, 13] зазначено мікроармувальну дію мінеральних добавок на гіпсовий камінь і його вплив на міцність. Уведення в гіпс 14 % ультрадисперсного цеоліту сприяло підвищенню його водостійкості з 0,31 до 0,84 [7]. Аналогічний ефект від уведення цеоліту і карбоксилату в [10] пояснений також істотною зміною структури. В [13] підвищення міцності гіпсу пояснено ефектом дисперсного армування.

Вплив мінеральних і хімічних добавок на водостійкість гіпсу досліджено в [4, 7, 8, 11, 12]. Автори [8] модифікують гіпс

металургійним пилом і багатостінними вуглецевими нанотрубками. Спостережуване підвищення водостійкості вони пояснюють утворенням на поверхні кристалів гіпсу аморфних гідросилікатних структур, що зв'язують кристали гіпсу і перешкоджають доступу до них води. В [9] гіпс модифікують ультрадисперсним металургійним пилом і ангідритом. Автори зазначають зміну морфології, яка призводить до ущільнення та підвищення міцності й водостійкості. В [11] у результаті введення комплексної хімічної добавки зазначаються прискорення гідратації і утворення більш щільної структури. Мікрота нанодобавками карбіду кремнію SiC , які діють як центри кристалізації і приводять до утворення більших кристалів, також прискорюють гідратацію і структуроутворення [12].

Як відомо [23], властивості матеріалів на основі неорганічних в'язучих обумовлені наявністю електростатичної взаємодії подвійних електричних шарів структурних елементів. Міцність та водостійкість гідравлічних в'язучих визначається міцними електрогетерогенними контактами між частинками з протилежними поверхневими зарядами. Повітряні в'язучі складаються з елементів, що мають однойменні поверхневі заряди, тому їх міцність та водостійкість визначається електрогомогенними контактами з міжмолекулярною взаємодією. У [3] висунуто і підтверджено гіпотезу про досягнення максимально можливих фізико-механічних показників тверднучих мінеральних в'язучих за рахунок рівності між собою сумарних площ поверхні частинок дисперсної фази в одиниці об'єму, що мають протилежні поверхневі заряди. Вважаємо, що досягнення такої рівності можливе за рахунок регулювання складу продуктів гідратації в'язучого, впровадження в їх структуру вискодисперсних інертних частинок. Міцність гіпсового каменю визначають переважно електрогомогенні контакти між кристалогідратами

гіпсу зі слабкою міжмолекулярною взаємодією. Ці контакти руйнуються навіть при незначних напругах [3, 14]. Для забезпечення водостійкості та збільшення міцності гіпсових в'язучих у [2, 14] запропоновано до їх складу вводити мінеральні добавки – наповнювачі та мікронаповнювачі з визначеними поверхневими зарядами, що приведе до утворення значної кількості електрогетерогенних контактів з гранями кристалогідратів гіпсу.

У [26, 3] показано, що водостійкість гіпсу з мінеральними добавками, зокрема шлаком доменним гранульованим меленим, залежить від товщини прошарків гіпсу-двогідрату між частинками мінеральних наповнювачів. Товщина цих прошарків пов'язана зі структурною характеристикою наповненого гіпсового каменю – коефіцієнтом розсунення частинок мінерального наповнювача гіпсом-двогідратом η . Залежність міцності штучного каменю та, особливо, його водостійкості, за [26], має хвилеподібний або екстремальний характер з максимумами, яким відповідають оптимальні величини коефіцієнтів розсунення $\eta_{\text{опт}}$. Максимальні міцність та водостійкість забезпечуються у разі утворення найбільш щільних упаковок кристалів гіпсу-двогідрату у прошарках між частинками мінерального наповнювача та відповідності фактичної величини коефіцієнта розсунення η його оптимальній величині $\eta_{\text{опт}}$. Для реалізації цього у [26, 3] запропоновано забезпечувати оптимальне значення коефіцієнта розсунення $\eta_{\text{опт}}$, аналогічного до оптимальних коефіцієнтів розсунення зерен крупного заповнювача $\alpha_{\text{опт}}$ та дрібного заповнювача $\mu_{\text{опт}}$ у бетонах. Для збільшення щільності гіпсового каменю можливо також застосування нанодисперсних наповнювачів, які, вбудовуючись у структуру, заповнюють міжкристалічні порожнини і сприяють ущільненню структури [3, 14]. У такому випадку кількість і дисперсність наповнювачів підбирається таким чином, щоб утворювалися щільні упаковки частинок матриці в прошарках між

структуруювальними частинками: кристалогідратів гіпсу – між частинками шлаку, нанодисперсних частинок – між кристалогідратами гіпсу [3, 14]. Крім того, нанодисперсні частинки наповнювача можуть служити центрами кристалізації, підвищуючи дисперсність кристалогідратів та ущільнюючи структуру.

Визначення мети та завдання дослідження. Завдання дослідження походять з уяви про низьку водостійкість гіпсу від розклинювального впливу води. Такий вплив проявляється у контактах між окремими кристалами і частинками в структурі гіпсу. Метою статті стало обґрунтування доцільності застосування відносної лінійної вологісної деформації від водонасичення (набухання) ε_w , м/м, як додаткового показника водостійкості.

Основна частина дослідження. В експериментальних дослідженнях застосовували гіпс будівельний марки Г-10, шлак доменний гранульований «Запоріжсталь» мелений, пластифікуючу добавку – лігносульфонат натрію у кількості 2 % від маси гіпсу.

Шлак доменний гранульований «Запоріжсталь» мелений: хімічний склад, %: SiO_2 – 36,5; Fe_2O_3 – 5,1; Al_2O_3 – 6,7; CaO – 46,5; MgO – 5,9; SO_3 – 4,2; модуль основності – 1,19; істинна густина – 2810 кг/м^3 ; питома поверхня – $3000 \text{ см}^2/\text{г}$; гранулометричний склад, визначений вимірюваннями за допомогою лінійки мікроскопу МБИ-6, %: до 10 мкм – 2,5; 10–23 мкм – 11; 23–36 мкм – 8,6; 36–49 мкм – 12,9; 49–62 мкм – 8,8; 62–75 мкм – 6,8; 75–88 мкм – 9,2; 88–101 мкм – 6,7; 101–114 мкм – 10,6; 114–127 мкм – 10,3; понад 127 мкм – 12,7, отже, близько 80 % – у межах 10–130 мкм, середній розмір – 60 мкм.

Вологісну деформацію визначали на зразках-призмах розміром $160 \times 40 \times 40 \text{ мм}$, які тверділи не менше 7 діб, висушених за температури $18\text{--}22^\circ\text{C}$ та відносної вологості 40–60 % до постійної маси.

Для кожного складу випробували не менше трьох зразків. Попередньо

вимірювали довжину зразків L . Кожен зразок встановлювали вертикально у посудину, зверху накладали сталеву або скляну накладку, підводили до неї індикатор годинникового типу, закріплений у лабораторному штативі (рис. 1), та фіксували початкове показання індикатора.

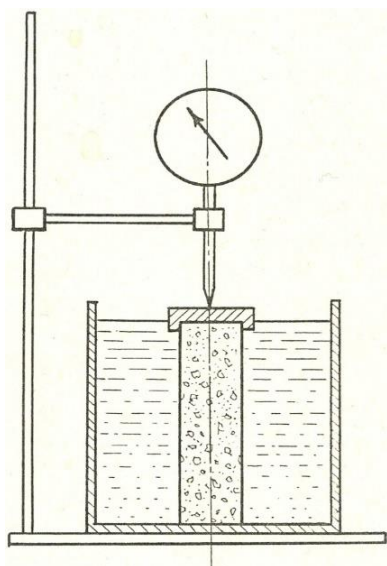


Рис. 1. Вимірювання вологісних деформацій штучного гіпсового каменю з мінеральними добавками

У посудину наливали воду до рівня верхньої грані зразка і не рідше ніж кожні 0,25–0,5 годин протягом перших 6 годин знімали показання індикатора. Спостереження здійснювали протягом не менше 1 доби.

Для кожного моменту часу i за показанням індикатора X_i знаходили величину абсолютної лінійної вологісної деформації, мм:

$$\Delta L_i = X_i - X_0, \quad (1)$$

де X_0 – початкове показання індикатора перед наливанням води.

Для кожного моменту часу визначали відносну вологісну деформацію:

$$\varepsilon_w = \Delta L_i / L. \quad (2)$$

За величинами ε_w будували кінетичну криву залежності ε_w від часу, за якою визначали максимальну величину ε_w і час, за який її досягнуто.

Результати дослідження подано на рис. 2, 3 і в табл. 1.

Таблиця 1

Максимальні вологісні деформації ε штучного гіпсового каменю з різним відносним вмістом мінеральної добавки шлаку доменного гранульованого меленого Ш/(Г+Ш)

№	Ш/(Г+Ш)	В/(Г+Ш)	Відносна вологісна деформація зразків ε_w , м/м						$\varepsilon_{w\text{сер}}$, м/м
К	0	0,35	0,64020	0,78047	1,60285	1,05040	0,91300	1,12973	1,01937
1	0,09	0,32	0,59156	0,43218	0,27623				0,43332
2	0,17	0,29	0,54071	0,39653	0,54162	0,96342	0,91690	0,78600	0,69081
3	0,23	0,27	1,12251	0,72981	0,67662				0,84298
4	0,29	0,25	0,75382	0,38879	0,29888				0,48050
5	0,33	0,23	0,35869	0,32983	0,76449				0,34426

Із рис. 2, 3 і табл. 1 видно, що після занурення зразків у воду одразу починається збільшення їх довжини внаслідок вологісної деформації – набухання. Деформація

розвивається протягом 3–5 годин, після чого досягає максимальної величини і майже одразу починає знижуватись.

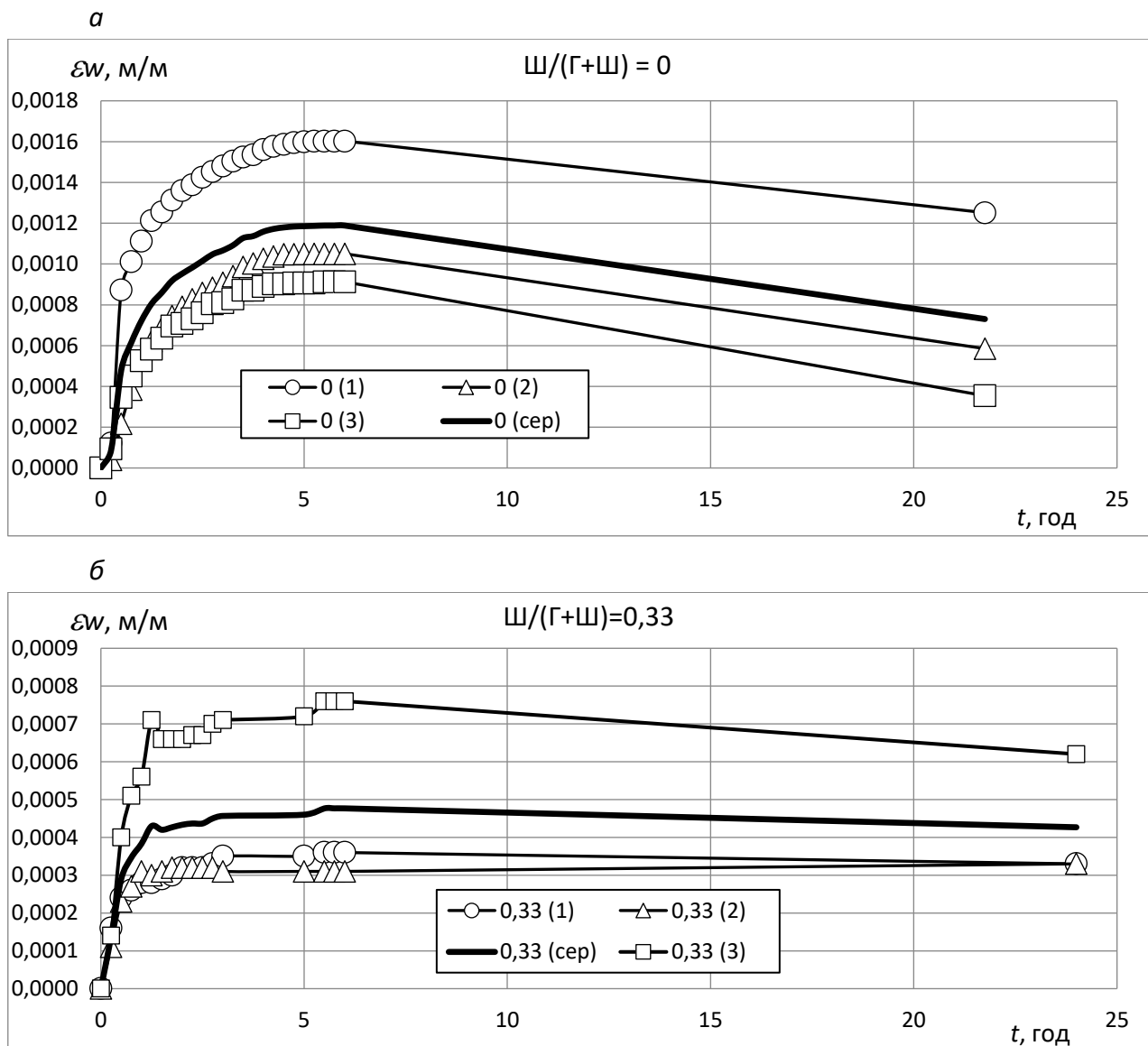


Рис. 2. Залежність від часу t вологісної деформації ε_w штучного гіпсового каменю з відносним вмістом мінеральної добавки шлаку доменного гранульованого меленого $\text{Ш}/(\Gamma+\text{Ш})$: *а* – 0 (гіпсового каменю без добавок); *б* – 0,33

Із рис. 3, 4 і табл. 1 випливає, що величина вологісної деформації залежить від вмісту мінеральної добавки шлаку доменного гранульованого меленого. Максимальна деформація спостерігається у гіпсового каменю без мінеральної добавки. Зі збільшенням вмісту шлаку відносна деформація знижується. Проте це зниження має не лінійний характер, а хвилеподібний аналогічно до залежностей міцності й водостійкості від вмісту шлаку.

Із рис. 3, 4 і табл. 1 видно, що мінімальні вологісні деформації спостерігаються у штучного гіпсового каменю з відносним вмістом шлаку $\text{Ш}/(\Gamma+\text{Ш})$ 0,05–0,1 і понад 0,27. Це узгоджується з характером залежностей водостійкості штучного гіпсового каменю від відносного вмісту шлаку та підтверджує припущення про внесок у низьку водостійкість гіпсу розклинювального впливу води у контактах між окремими кристалами і частинками в

його структурі. Отже, величини вологісних деформацій штучного гіпсового каменю

доцільно застосовувати як додаткові показники його водостійкості.

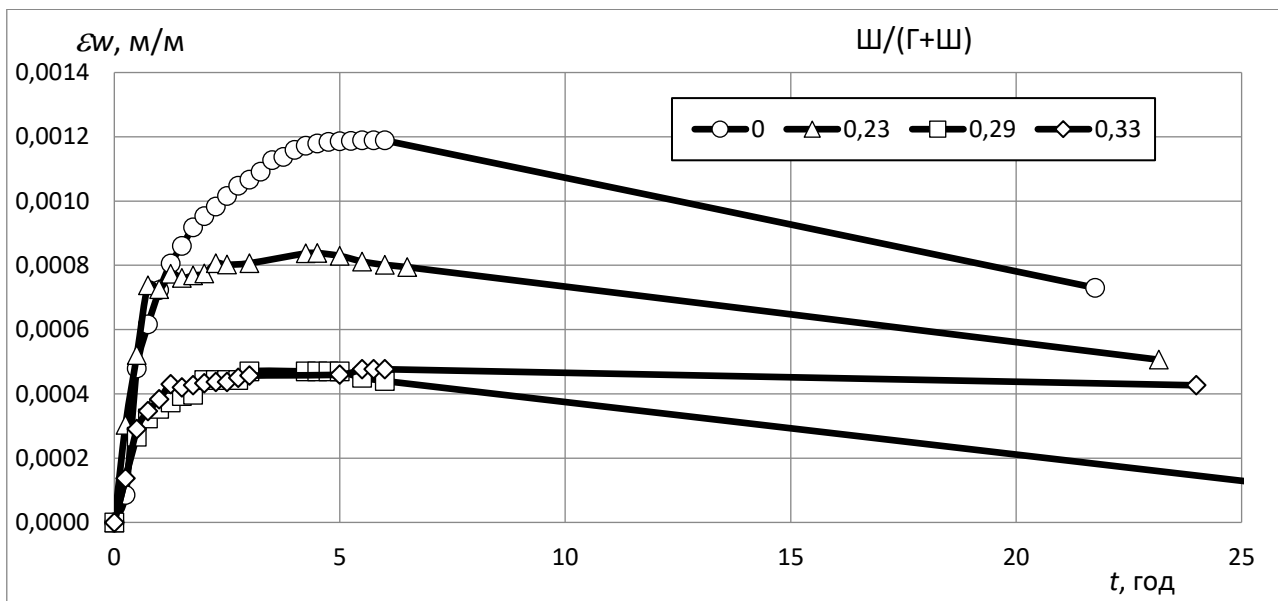


Рис. 3. Залежність від часу t вологісної деформації ε_w штучного гіпсового каменю з різним відносним вмістом мінеральної добавки шлаку доменного гранульованого меленого Ш/(Г+Ш)

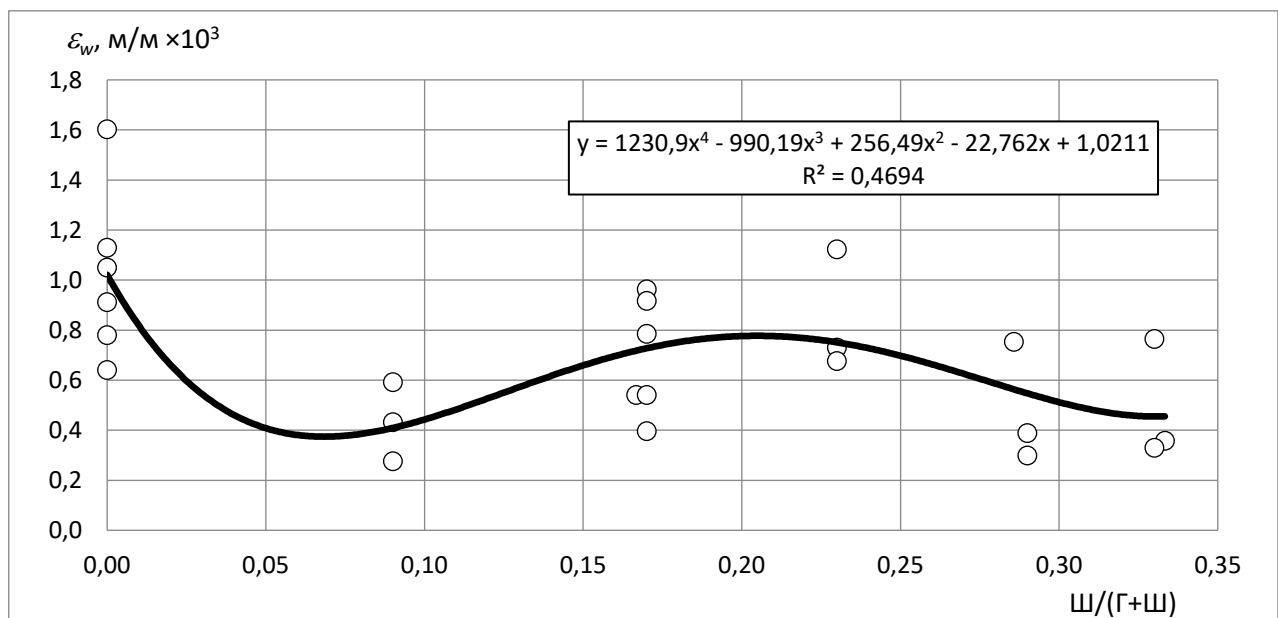


Рис. 4. Залежність максимальної вологісної деформації ε штучного гіпсового каменю від відносного вмісту мінеральної добавки шлаку доменного гранульованого меленого Ш/(Г+Ш)

Висновки. В результаті експериментальних досліджень встановлено, що після занурення зразків штучного гіпсового каменю у воду одразу починається збільшення їх довжини внаслідок вологісної деформації – набухання. Деформація розвивається протягом 3–5 годин, після чого досягає максимальної величини і майже одразу починає знижуватись.

Встановлено, що величина вологісної деформації залежить від вмісту мінеральної добавки шлаку доменного гранульованого меленого. Максимальна деформація спостерігається у гіпсового каменю без мінеральної добавки. Зі збільшенням вмісту шлаку відносна деформація знижується.

Проте це зниження має не лінійний характер, а хвилеподібний аналогічно до відомих залежностей міцності й водостійкості від вмісту шлаку. Мінімальні вологісні деформації спостерігаються у штучного гіпсового каменю з відносним вмістом шлаку Ш/(Г+Ш) 0,05–0,1 і понад 0,27.

Це підтверджує припущення про внесок у низьку водостійкість гіпсу розклинювального впливу води у контактах між окремими кристалами і частинками в його структурі. Отже, величини вологісних деформацій штучного гіпсового каменю доцільно застосовувати як додаткові показники його водостійкості.

Список використаних джерел

1. Гипсовые материалы и изделия / под ред. А. В. Ферронской. Москва: АСВ, 2004. 488 с.
2. Sanytsky M., Fischer H., Korolko S. Modified composite gypsum binders based on phosphogypsum // 16 Internationale Baustofftagung. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, 2006. Band 1. P. 875–882.
3. Increase of gypsum water resistance by mineral additives / A. A. Plugin, O. A. Plugin, H.-B. Fisher, G. N. Shabanova. 1 Weimarer Gipstagung, 2011. P. 435–443.
4. Wansom S., Chintasongkro P., Srijanpan W. Water resistant blended cements containing flue-gas desulfurization gypsum, Portland cement and fly ash for structural applications. *Cement and Concrete Composites*, 2019. 103. P. 134–148. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.04.033> (last access: 30.08.2020).
5. Zavadskaya L. V., Berdov G. I. Change of Structure and Strength of Gypsum at Adding Disperse Mineral Additives. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2016. 1. P. 86–93. URL: <http://dx.doi.org/10.19026/rjaset.12.2306> (last access: 30.08.2020).
6. Sun H., Qian J., Yang Y., Fan C., Yue Y. Optimization of gypsum and slag contents in blended cement containing slag. *Cement and Concrete Composites*. 2020. 112. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103674> (last access: 30.12.2020).
7. Egorova A. D., Filippova K. E. Ultra-disperse modifying zeolite-based additive for gypsum concretes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. 687. 022030. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/687/2/022030> (last access: 30.08.2020).
8. Water-resistant Gypsum Compositions with Man-made Modifiers / G. N. Pervyshin, G. I. Yakovlev, A. F. Gordina, J. Keriene, I. S. Polyanskikh, H. B. Fischer, A. F. Buryanov. *Procedia Engineering*. 2017. 172. 867–874. Elsevier Ltd. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.087> (last access: 30.08.2020).
9. Anhydrite and gypsum compositions modified with ultrafine man-made admixtures / G. Yakovlev, I. Polyanskikh, G. Fedorova, A. Gordina, A. Buryanov. *Procedia Engineering*. 2015. 108. P. 13–21. Elsevier Ltd. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.195> (last access: 30.08.2020).
10. Performance of low carbon modified composite gypsum binders with increased water resistance / M. Sanytsky, T. Kropyvnytska, H. B. Fischer, N. Kondratieva. *Chemistry and Chemical*

Technology. 2019. 13(4). P. 495–502. URL: <https://doi.org/10.23939/chcht13.04.495> (last access: 03.08.2021).

11. Study of modified gypsum binder / N. Kondratieva, M. Barre, F. Goutenoire, M. Sanytsky. *Construction and Building Materials*. 2017. 149. P. 535–542. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.140> (last access: 26.08.2020).

12. Effect of additives SiC on the hydration and the crystallization processes of gypsum / N. Kondratieva, M. Barre, F. Goutenoire, M. Sanytsky, A. Rousseau. *Construction and Building Materials*. 2020. 235. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117479> (last access: 21.08.2020).

13. On the fracture behaviour of fibre-reinforced gypsum using micro and macro polymer fibres / F. Suárez, L. Felipe-Sesé, F. A. Díaz, J. C. Gálvez, M. G. Alberti. *Construction and Building Materials*. 2020. 244. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118347> (last access: 30.08.2020).

14. Structure and strength of gypsum: Mechanism of strength and water resistance / A.N.Plugin, A. A. Plugin, Yu. G. Gasan, H.-B. Fisher, O. A. Plugin. 2 Weimarer Gipstagung, 2014. P.427–438.

15. Study of low-emission multicomponent cements with a high content of supplementary cementitious materials / H. Ivashchyshyn, M. Sanytsky, T. Kropyvnytska, B. Rusyn. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 4(6–100). P. 39–47. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.175472> (last access: 30.08.2020).

16. The Influence of Complex Additive on Strength and Proper Deformations of Alkali-Activated Slag Cements / P. V. Krivenko, O. Petropavlovskiy, I. Rudenko, O. P. Konstantynovskiy. *Materials Science Forum*. 2019. 968. P. 13–19. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.968.13> (last access: 30.08.2020).

17. Acid-basic surface properties of clay disperse fillers / Y. Danchenko, V. Andronov, V. Sopov, I. Khmyrov, A. Khryapynskyy. *MATEC Web of Conferences*. 2018. 230. 03004. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823003004> (last access: 22.08.2020).

18. Plugin A. A., Pluhin O. A., Borziak O. S., Kaliuzhna O. V. The Mechanism of a Penetrative Action for Portland Cement-Based Waterproofing Compositions. In: Blikharsky Z., Koszelnik P., Mesaros P. (eds) *Proceedings of CEE 2019. CEE 2019. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 47. Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_5 (last access: 28.08.2020).

19. The role of chemical admixtures in the formation of the structure of cement stone / V.Sopov, L. Pershina, L. Butskaya, E. Latores, O. Makarenko. *MATEC Web of Conferences*. 2017. 116. 01018. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711601018> (last access: 25.08.2020).

20. Lushnikova N., Dvorkin L. 25 Sustainability of gypsum products as a construction material. In *Sustainability of Construction Materials* (2nd edn.). 2016. P. 643–681. Woodhead Publ. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100370-1.00025-1> (last access: 30.08.2020).

21. Gypsum composites reinforcement / V. Petropavlovskaya, A. Buryanov, T. Novichenkova, K. Petropavlovskii. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 365, 3. Institute of Physics Publishing. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/3/032060> (last access: 30.08.2020).

22. Buryanov A., Petropavlovskaya V., Novichenkova T. Structuring in systems on the basis of calcium sulfate dihydrate. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. 467. P. 91–96. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.467.91> (last access: 25.08.2020).

23. Плугин А. Н. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них: монография в 3 т. / под ред. А. Н. Плугина. Киев: Наук. думка, 2012. Т.2. 224 с.

24. Влияние активных поверхностных центров на прочность свежесформованных мелкозернистых бетонов / В. И. Бабушкин, А. А. Плугин, Т. А. Костюк, В. А. Матвиенко. *Науковий вісник будівництва*. Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 1999. Вип. 5. С. 85–88.

25. Підвищення міцності та водостійкості гіпсових в'язучих нанодисперсними мінеральними добавками / А. А. Плугін, Х.-Б. Фішер, О. С. Борзяк, А. С. Єфіменко, А. А. Жигло. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. Харків: УкрДУЗТ, 2017. Вип. 171. С. 37–43.

26. Плугин А. А. Совершенствование состава и структуры бетона с учетом электроповерхностных свойств его составляющих для повышения прочности и стойкости изделий кольцевого сечения: дисс... канд. техн. наук: 05.23.05. Защ. 14.06.1994. Харьков: ХИСИ, 1994. 245 с.

Єфіменко Артем Сергійович, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. +380509443176. E-mail: A.efimenko03@gmail.com.

Iefimenko Artem, postgraduate student, Department of Building Materials, Structure and Construction, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel:+380509443176. E-mail: A.efimenko03@gmail.com.

Статтю прийнято 30.09.2020 р.