

ТЕХНОЛОГІЯ НЕОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН ТА СИЛКАТНИХ МАТЕРІАЛІВ

А. І. Заграй¹, Я. М. Новіцький²,

Національний університет “Львівська політехніка”,

¹ кафедра хімічної технології силікатів,

² кафедра технічної механіки та деталей машин,

andrii.i.zahrai@lpnu.ua,

yaroslav.m.novitskyi@lpnu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ВІБРОАКТИВАЦІЇ ГІДРАТНОГО ВАПНА

<https://doi.org/10.23939/ctas2022.02.047>

У роботі розглянуто ефективність процесу механічного активування гідратного вапна у віброактиваторі бункерного типу. Це дає можливість використовувати високоактивне гідратне вапно як модифікуючу зміцнювальну добавку до цементів. Введення добавки також позитивно впливає на економічний та екологічний ефект у виробництві будівельних розчинів та бетонних конструкцій. Виконано теоретичні та експериментальні дослідження режимів вібропереміщення суміші та їх впливу на швидкість та ступінь диспергування гідратного вапна. Встановлено параметри існування ефективних режимів віброактивації.

Ключові слова: високоактивне гідратне вапно; вібраційний активатор; ефективність віброактивації; динамічна в'язкість; віброактивоване вапно; диспергування вапна.

Вступ

У технологіях будівельних матеріалів гідратне вапно має широкі сфери застосування. Кальцію гідроксид використовується як самостійна в'язуча речовина у складах вапняно-піщаних чи інших сумішей повітряного та автоклавного тверднення, як компонент пуцоланових зв'язних систем, як складова композиційних матеріалів (наприклад, вапно-порохнянка у складі модифікованих сухих будівельних сумішей). Ефект зростання механічних показників є особливо актуальним у межах одного із сучасних напрямів розвитку будівельної індустрії, а саме проектування складів так званого “зеленого бетону”.

Одним із найважливіших критеріїв оцінювання бетонів згідно із зазначеною концепцією є показник питомої витрати цементу. Тому перед науковцями та технологами постало важливе завдання одночасного збільшення механічних показників бетону та зменшення питомої витрати портландцементу на його приготування. Оскільки більшу частину конструкційного бетону готують на основі портландцементу, отримання

якого потребує значної витрати палива, то використання модифікувальних добавок і, зокрема, високоактивного гідратного вапна, крім екологічного, дасть ще й позитивний економічний ефект. Тому дослідження у напрямі застосування високоактивного гідратного вапна становлять як науковий, так і практичний інтерес.

Метою дослідження є встановлення ефективності віброактивації гідратного вапна в активаторі бункерного типу.

Матеріали та методи досліджень

Для досліджень використано гідратне вапно-порохнянку фірми Lhoist (Республіка Польща). Вміст основних оксидів у гідратному вапні, % (мас.): CaO – 97,2; MgO – 0,7; CO₂ – 1,4; SO₃ – 0,4. Вміст вільної води – 1,3 %.

У першій фазі механічної активації гідратного вапна в'язкість колоїдної системи з великою точністю можна вимірювати за допомогою ротаційного віскозиметра “RION” типу VT-04

(рис. 1). Цей метод ґрунтується на вимірюванні обертального моменту, який виникає на осі ротора у вигляді циліндра, зануреного у вапняне тісто під час його обертання. Цей прилад дає змогу вимірювати числові значення в'язкості системи в інтервалі від 0,01 до 40 Па·с. Однак цей діапазон вимірювань не є достатнім, оскільки під час подальшого загуснення системи прилад стає нечутливим до збільшення в'язкості системи. Через це під час подальшого віброактивування за допомогою ротаційного віскозиметра неможливо оцінювати та контролювати процеси диспергування вапна.

У зв'язку з цим для подальших вимірювань динамічної в'язкості суміші було використано вібраційний метод визначення в'язкості [1], оснований на визначенні зміни амплітуди коливань тіла під час занурення його у в'язке середовище.

Амплітуду коливань у часі вимірюють спеціальним давачем – акселерометром АНС 014-03. Діапазон вимірювальних прискорень – від 0,5 до 300 м/с². Робочий діапазон частот – від 1 до 125 Гц.

Часові розгортки згасних коливань вимірюються та зберігаються у пам'яті комп'ютера за допомогою двоканального цифрового осцилографа марки OWON серії VDS1022 зі смугою пропускання 25 МГц.

Логарифмічний декремент згасання коливань визначається з їхніх часових розгортки, а динамічна в'язкість суміші – за відомими формулами [81].

Результати досліджень та їх обговорення

Останніми роками здійснюються дослідження у напрямі використання гідратного вапна як модифікувальної добавки у сумішах на основі портландцементу. Введення невеликих кількостей кальцію гідроксиду до складу цементних композицій дає змогу підвищити міцність затверділого виробу, не спричиняючи руйнування арматури, розтріскування цементного каменю або утворення висолів на його поверхні [2]. Використання вапна позитивно впливає на покращення експлуатаційних властивостей виробів, що зумовлює його широке застосування у будівельних технологіях [2, 5]. Зокрема для різного асортименту виробів вапна дає змогу підвищити показники міцності [10], збільшити тріщиностійкість, паро- та повітропроникність [11, 12]

тощо. Позитивна дія гідратного вапна визначається розміром частинок $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Після гасіння гідратне вапно є грубодисперсною коагульованою системою [4], що значною мірою стримує його позитивний вплив на формування структури затверділих виробів та покращення їхніх експлуатаційних характеристик [12–14]. Тому одним із ефективних способів підвищення активності гідратного вапна є його диспергування, тобто зменшення розмірів частинок $\text{Ca}(\text{OH})_2$ до високодисперсних [15, 16]. Існують різні технології отримання високодисперсного і відповідно високоактивного гідратного вапна із його подрібненням. У роботі [10] запропоновано метод механічного диспергування $\text{Ca}(\text{OH})_2$ у пастоподібному стані у спеціально сконструйованому вібробункері. Під час досліджень виявлено, що двофазна суміш $\text{Ca}(\text{OH})_2$ +вода за значних концентрацій твердої фази (>50 %) поводить як бінгамівська пластична рідина [3], що зберігає достатньо жорстку просторову структуру за невеликих швидкостей зсуву між її частинками. Якщо швидкість зсуву велика, то структура руйнується і суміш поводить як звичайна ньютонівська рідина.

Вібраційний активатор – це білярезонансна вібромашина (рис. 1, а) з електромагнітним приводом, яка здійснює гармонічні коливання відносно центральної вертикальної осі. Конструкція складається із робочого органа – тороподібного бункера (1), всередині якого розташовані лопаті (2), реактивної маси (6) із електромагнітами (4) та пружинної системи – торсіона 3, що скріплює реактивну масу та робочий орган між собою. У вузловій точці коливань торсіона 3 закріплено якори електромагнітного приводу (5), до яких через гумові амортизатори кріпиться рама конструкції (на схемі не показано). Використання вузлової (нерухомої) точки коливань торсіона для кріплень якорів електромагнітного приводу та амортизаторів рами забезпечує високу ефективність приводу віброактиватора та віброізоляцію рами конструкції.

Частота коливань віброактиватора дорівнює частоті коливань напруги промислової однофазної мережі (50 Гц), а амплітуда коливань регулюється лабораторним автотрансформатором. Максимальне значення амплітуди коливань незавантаженого робочого органа активатора становить 8 мм. Кількість речовини в бункері та її в'язкість зменшують амплітуду коливань бункера.

Лопаті (2, рис. 1, б) жорстко закріплені до зовнішньої стінки бункера із деяким зазором, що забезпечує відсутність мертвих зон у суміші, яка зазнає віброоброблення. Зовнішня та внутрішня стінки бункера утворюють гідравлічний канал шириною 50 мм та глибиною 100 мм ($D = 500$ мм; $d = 400$ мм) по якому безнапiрно переміщується суміш під дією сил інерції.

Як показали попередні дослідження [8], оптимальне значення кута нахилу лопаті α близьке до 90° , але не може дорівнювати йому через необхідність забезпечення впорядкованого одностороннього руху суміші під час її оброблення. Одно-

сторонній рух суміші (вібропереміщення) відбувається за рахунок різного гідравлічного опору під час взаємодії суміші із лопатями та стінками бункера, чому сприяють як значення зазорів між лопатями і стінками бункера, так і оптимальний кут атаки лопаті ($\alpha = 86^\circ$). Тоді відносно переміщення суміші по каналу за один повний цикл його коливання дещо різнитиметься. Саме ці різниці переміщень і забезпечують незначне (5–7 мм/с) одностороннє вібропереміщення суміші по каналу бункера, що призводить до транспортування активованої суміші від лопатей та неактивованої до них із подальшим їх перемішуванням.

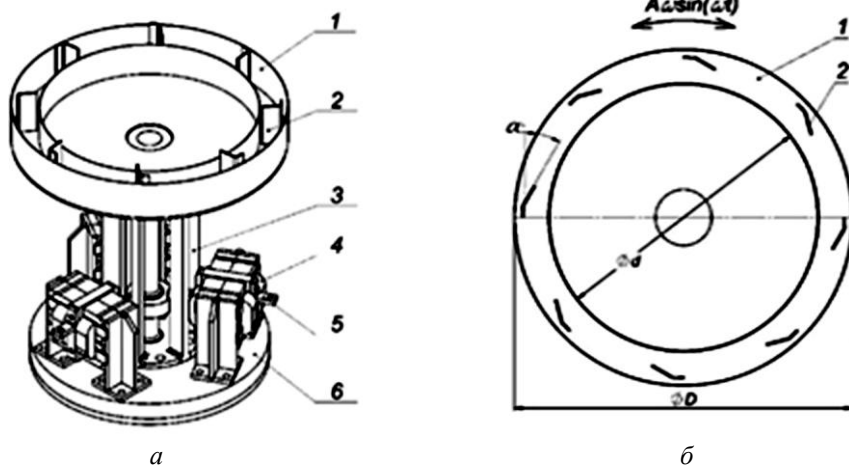


Рис. 1. Конструкційна схема вібраційного активатора

Проведені раніше експериментальні дослідження вказують на те [6, 8], що ефективність віброактивації суміші підвищується зі збільшенням амплітуди коливань та часу оброблення суміші, а також знижується зі зменшенням концентрації твердої фази, збільшенням в'язкості та кількості суміші.

Щоб оцінити ефективність роботи віброактиватора, розглянемо рух пастоподібної двофазної суміші $\text{Ca}(\text{OH})_2$ +вода у відкритому каналі, що здійснює гармонічні коливання із відомими амплітудою та частотою. Для спрощення приймемо, що канал здійснює прямолінійні, а не кругові коливання із середнім значенням амплітуди, що відповідає середньому радіусу каналу тороподібного віробункера. Припустимо, що значення віброшвидкості робочого органа активатора достатнє, щоб суміш поведилась як ньютонівська рідина. Також знехтуємо різницею гідравлі-

чних опорів як фактором, що незначно впливає на взаємодію лопатей і суміші. Також припустимо, що можливий удар суміші та лопаті є пластичним, тобто суміш у відкритому безнапорному каналі позбавлена пружних властивостей.

Розглянемо взаємодію суміші та гідравлічного каналу робочого органа віброактиватора як взаємодію матеріальної точки, що зв'язана із робочим органом силою в'язкого тертя. Тоді, на першому можливому етапі – **етапі сумісного руху** (рис. 2, від $\omega t=0$ до $\omega t=\pi/2$), коли суміш впирається в перпендикулярну лопать і рухається разом із каналом, рівняння руху запишемо так

$$\frac{d^2 x_c}{dt^2} = \frac{d^2 x_k}{dt^2} = A\omega^2 \cos(\omega t); \quad (1)$$

де x_c , x_k – координати суміші та каналу; A ; ω – амплітуда та кутова частота коливань робочого органа активатора.

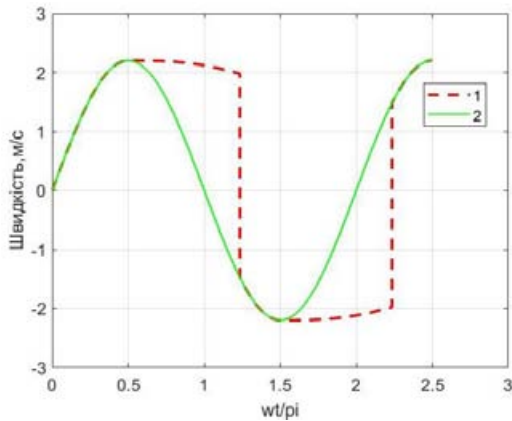


Рис. 2. Етапи можливого відносного руху каналу та суміші: 1 – швидкість суміші; 2 – швидкість каналу активатора

Наступний етап руху – **етап відносного проковзування** суміші відносно каналу – описується рівняннями:

$$\frac{d^2 x_c}{dt^2} = -F \frac{dx_c}{dx} - \frac{dx_k}{dx}; \quad (2)$$

$$\frac{d^2 x_k}{dt^2} = A\omega^2 \cos(\omega t). \quad (3)$$

де F – сила гідравлічного опору каналу.

$$F = F1 \times F2 / F1 + F2; \quad (4)$$

$$F1 = \mu \cdot L1 \cdot S^2 \cdot z / 2 \cdot \pi \cdot R1^4;$$

$$F2 = \mu \cdot L2 \cdot S^2 \cdot z / 2 \cdot \pi \cdot R2^4;$$

де $F1$; $F2$ – сила опору зовнішньої та внутрішньої щілин каналу; z – кількість лопатей; μ – динамічна в'язкість суміші; $L1$; $L2$ – довжина зовнішньої та внутрішньої щілин; S – площа нормальної проєкції лопаті; $R1$, $R2$ – гідравлічний радіус зовнішньої та внутрішньої щілин.

Етап розпочнеться, коли справдиться нерівність:

$$A\omega^2 \cos \omega t > F \frac{dx_c}{dx} - \frac{dx_k}{dx}. \quad (5)$$

Тобто етап розпочнеться, коли сила інерції перевищить силу опору. Цей етап закінчиться зіткненням суміші та лопаті, тобто настанням удару. Оскільки удар цілком пластичний, то швидкість суміші миттєво зрівняється зі швидкістю лопаті, тобто каналу. Можлива тривалість цього етапу від $0,5\pi$ до $1,5\pi$.

Удар відбудеться тоді, коли відносне переміщення матеріальної точки дорівнюватиме значенню зазору, який існує між нею та лопаттю, об яку вона б'ється. Цей зазор неможливо задавати, його автоматично встановлює динамічна система, але ми можемо зафіксувати його експериментально. Тому назвемо його **установлений зазор**.

Саме в цей момент, момент удару відбувається активація суміші. Цей процес здійснюється як безпосередньо на поверхні лопаті, так і на деякій глибині суміші – відстані від поверхні лопаті. Значення цієї відстані – теж важливий показник ефективності віброактивації. Очевидно, що вона буде пропорційна до квадрата швидкості (енергії руйнування поверхонь) та обернено пропорційна до сил дисипації цієї енергії, а саме сили в'язкості.

Визначивши певне значення установленого зазору та розв'язавши рівняння (3), (4) і нерівність (5), ми отримаємо значення основного параметра ефективності процесу віброактивації – швидкості зіткнення лопаті та суміші.

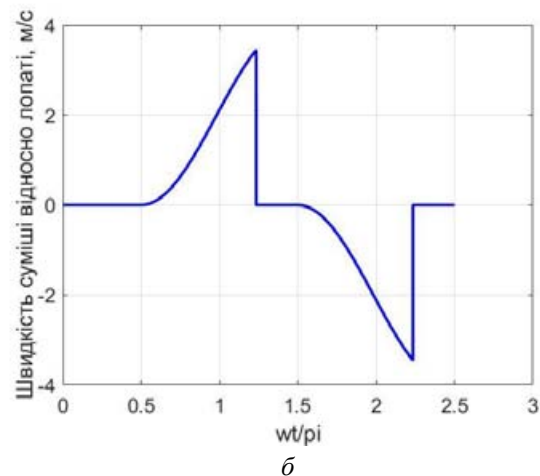
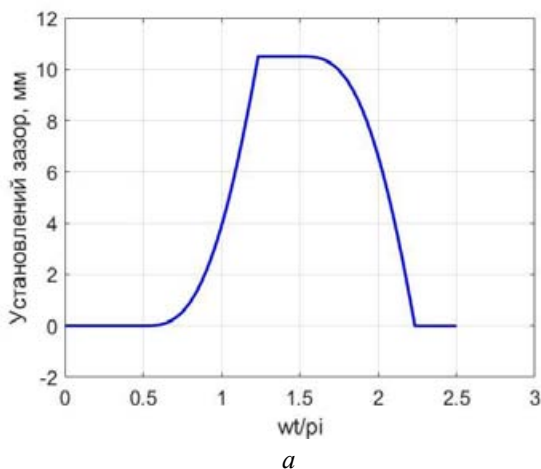


Рис. 3. Результати дослідження моделі: а – відносне переміщення суміші; б – відносна швидкість суміші

На рис. 3, *а* подано графічну залежність відносного переміщення суміші від фазового кута процесу за устанавленого зазору 10,5 мм, а на рис. 3, *б* – графічну залежність відносної швидкості суміші. Вертикальна лінія відображає швидкість зіткнення суміші та лопаті.

На рис. 2 та 3 відображено два удари суміші та лопаті протягом одного періоду коливання, усталений рух якого відбувається у фазових кутах від $0,5\pi$ до $2,5\pi$. Як видно із рисунків, етап удару закінчується етапом сумісного руху, що вказує на усталене вібропереміщення.

Етап удару відбувається миттєво і його можна описати встановленням певного значення прискорення

$$\frac{d^2x_c}{dt^2} = -1 \times 10^6 \frac{m}{c^2}. \quad (6)$$

Значення цього прискорення достатньо необґрунтоване і потребує окремого дослідження, але саме такому значенню відповідають розв'язки рівнянь (1)–(6), відображені на рис. 2 та рис. 3.

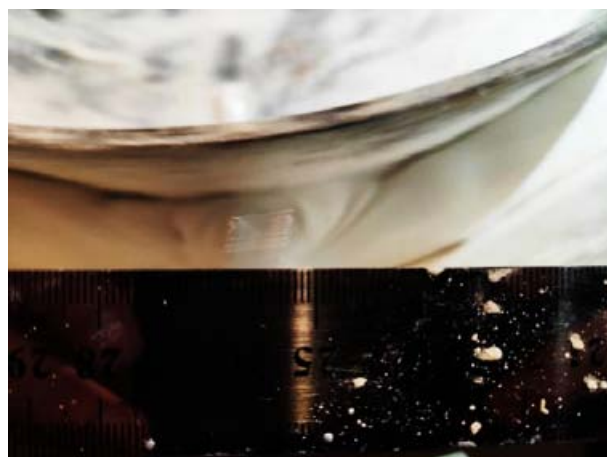
Інші параметри досліджуваного віброактиватора: амплітуда коливань 7 мм, частота 50 Гц, динамічна в'язкість суміші 12,5 Па·с.

Експериментальні роботи виконано на віброактиваторі, конструкцію якого наведено на рис. 1, а фотографії робочого органа активатора під час віброактивації суміші – на рис. 4.

На рис.4, *а* наведено статичне зображення процесу віброактивації – фотографію, виконану із максимально короткою витримкою часу. Внаслідок цього отримано чітке (нерухоме) зображення, на якому видно біля лопатей хвилясті горбики суміші, геометричні параметри яких можна виміряти за допомогою лінійки або штангенциркуля. Збільшення часової витримки затвора фотоапарата (рис. 4, *б*) дає реальнішу картину процесу, звичну для людського ока. На цій фотографії видно крайні значення лопаті (розмах коливань) та устанавлений зазор між сумішшю і лопаттю. Значення розмаху коливань (подвійна амплітуда) та устанавленого зазору вимірювали штангенциркулем (рис. 4, *в, г*).



а



б



в



г

Рис. 4. Робочий орган активатора в процесі активації суміші: *а* – статичне зображення; *б* – динамічне зображення; *в* – вимірювання розмаху коливань; *г* – вимірювання устанавленого зазору

Як відомо із попередніх досліджень [6], процес активації суміші – це безперервне утворення нових поверхонь, які поглинають воду, що призводить до зростання динамічної в'язкості суміші.

Графічну залежність наростання в'язкості суміші, яка зазнає віброактивації, подано на рис. 5.

Як видно із рис. 5, перші 5 хв обробки (зона 1) не впливають на зміну в'язкості, що свідчить про відсутність процесу активації суміші. Однак із часом в'язкість суміші починає зростати (зона 2) і через 80 хв спостерігається сповільнення активації (зона 3). Це може пояснюватись як впливом високого значення динамічної в'язкості (демпфування енергії), так і завершенням процесу активації через досягнення певного розміру частинок, характерного для певного значення енергії.

Тому під час віброактивації гідратованого вапна виконано аналогічні експериментальні роботи з визначення динамічної в'язкості вібраційним методом [8]. Узагальнені результати досліджень наведено в табл. 1.

Як видно із аналізу табличних даних, в'язкість суміші із часом зростає, а установлений зазор переходить через максимум, причому протягом перших 10 хв віброактивації установленого зазору між сумішшю та лопатями не спостерігається, тобто його значення дорівнює нулеві або близьке до нуля.

Щоб оцінити ефективність процесу віброактивації суміші, експериментальні дані (> 10 хв) з табл. 1 вводили в математичну модель, побудовану на основі рівнянь (1)–(6). Результати обчислень подано на рис. 6 та рис. 7.

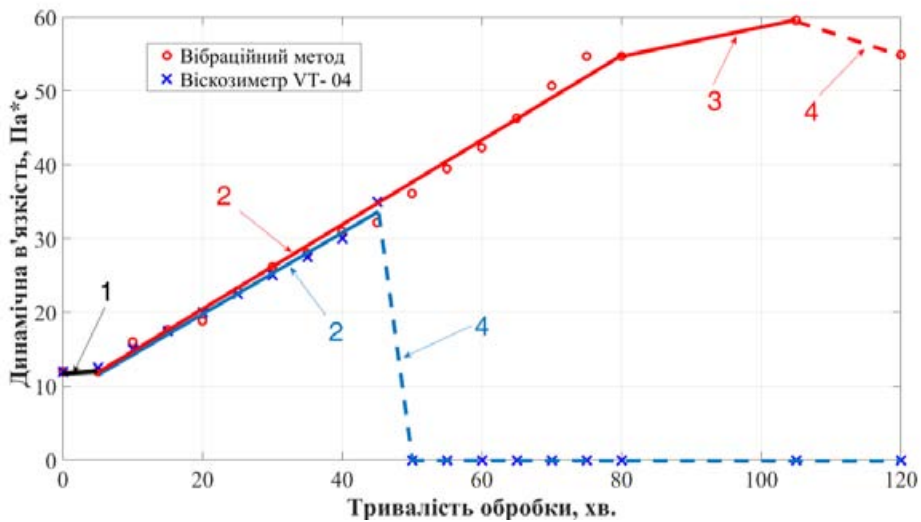


Рис. 5. Значення в'язкості вапняного тіста під час віброактивування:

1 – зона постійної в'язкості; 2 – зона пропорційного зростання;

3 – зона зменшеного зростання; 4 – зона нечутливості приладу

Таблиця 1

Узагальнені результати експериментальних досліджень

Тривалість обробки, хв	Амплітуда коливань А, мм	Значення установленого зазору Δ, мм	Динамічна в'язкість суміші μ, Па·с
< 10	5,1	не спостерігається	12,2
10	5,1	7,5	15,5
20	5,1	10,0	19,1
30	5,0	12,5	25,5
40	4,9	10,1	32,0

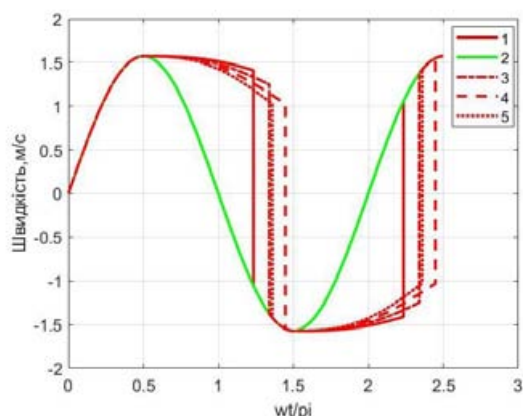


Рис. 6. Результати дослідження моделі – графічна залежність швидкості суміші та робочого органа віброактиватора під час його коливань:
 1 – $\mu=15,5$ Па·с, $\Delta=7,5$ мм; 3 – $\mu=19,1$ Па·с, $\Delta=10$ мм;
 4 – $\mu=25,5$ Па·с, $\Delta=12,5$ мм; 5 – $\mu=32$ Па·с, $\Delta=10,1$ мм

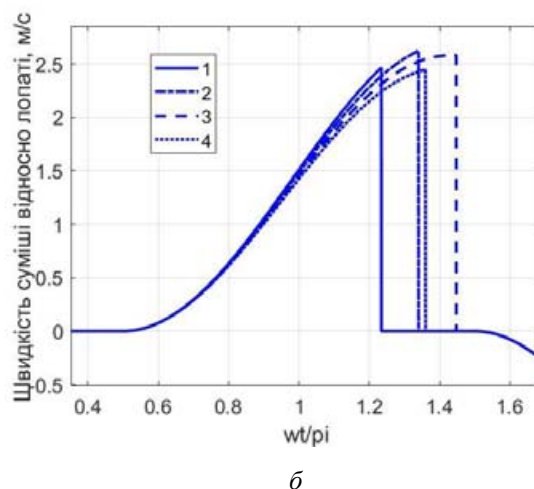
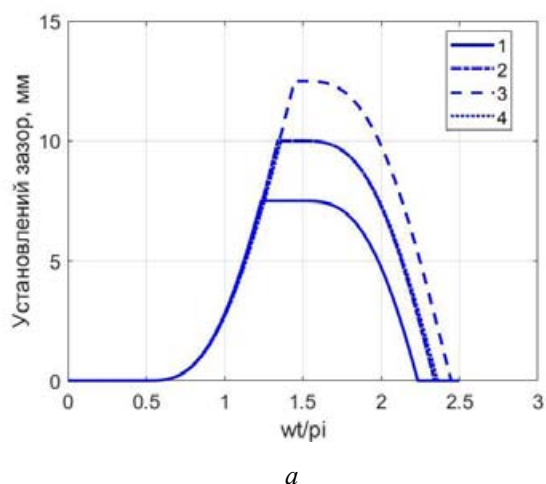


Рис. 7. Результати дослідження моделі: а – відносне переміщення суміші; б – відносна швидкість суміші;
 1 – $\mu=15,5$ Па·с, $\Delta=7,5$ мм; 2 – $\mu=19,1$ Па·с, $\Delta=10$ мм; 3 – $\mu=25,5$ Па·с, $\Delta=12,5$ мм; 4 – $\mu=32$ Па·с, $\Delta=10,1$ мм

Враховуючи фактор негативного впливу в'язкості суміші на її активацію, перевагу необхідно віддавати режимам 1 та 2, а не 3 та 4. Тобто суміш потрібно обробляти доти, доки її в'язкість не досягне значення 19 Па·с (крива 2), а потім додавати розпилену форсунками воду, поки її в'язкість не опуститься до значення 15,5 Па·с (крива 1) і так продовжувати процес до закінчення активації суміші, тобто допоки її в'язкість не перестане зростати.

Переміщення суміші в каналі активатора визначено за допомогою п'єзокерамічного акселерометра АНС-014-03 із частотним діапазоном 1–125 Гц та чутливістю 10,5 мВс²/м. Відносна похи-

бка ± 10 %. Давач прикріплено до металевої лінійки, нижній кінець якої (рис. 8, а) занурено в суміш, а верхній закріплено до штатива за допомогою лежат.

Амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) давача з лінійкою подано на рис. 8, б. Як бачимо, частота першої форми коливань становить 0,5 Гц, а другої – 8 Гц.

Штатив із давачем встановлювали як в безпосередній близькості від лопати (25 мм), так і посередині між лопатями (190 мм).

Сигнал із давача віброприскорення знімали цифровим осцилографом (OWON) і записували в цифровому форматі на комп'ютер. Оброб-

лення сигналу, а саме подвійне інтегрування та перетворення Фур'є, виконували в системі MATLAB.

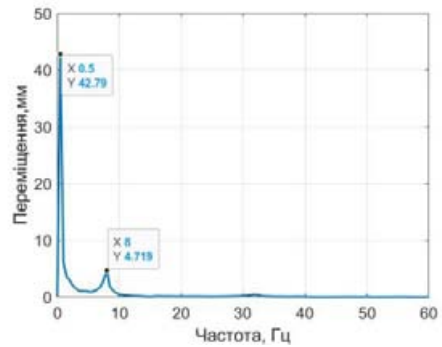
Коливання давача на лінійці (переміщення) подано на рис. 9, а, для різних значень динамічної в'язкості суміші, що досягаються різною тривалістю віброактивації суміші (табл. 1), а саме: 1–10 хв оброблення (15,5 Па·с); 2–20 хв (19,1 Па·с); 3–40 хв (32 Па·с). Лінійку встановлено посередині між лопатями на відстані 190 мм від кожної.

На рис. 9, б наведено АЧХ сигналів для цих самих значень в'язкості суміші в діапазоні 0–60 Гц, а на рис. 9, в і 9, з – фрагменти тієї самої АЧХ для діапазонів 0–2 Гц та 48–52 Гц.

Як видно із рис. 9, а, зростання в'язкості суміші призводить до зростання амплітуди коливань лінійки та височастотних коливань, амплітуда яких теж зростає із підвищенням в'язкості суміші.

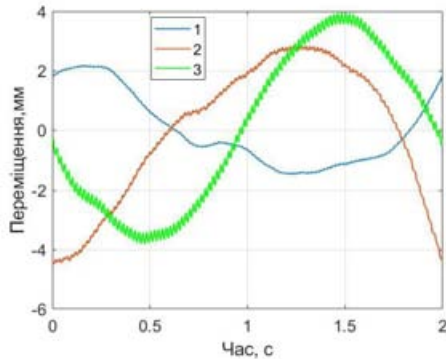


а

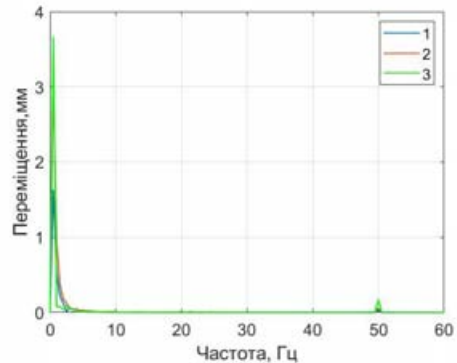


б

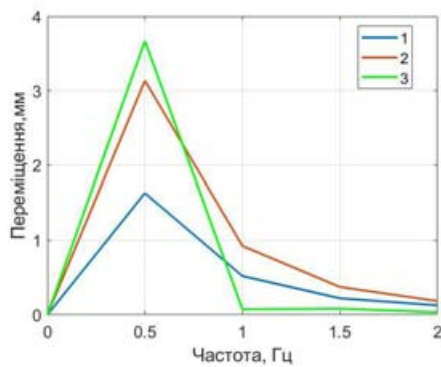
Рис. 8. Експериментальна установка для вимірювання параметрів руху суміші: а – давач із консольно закріпленою лінійкою; б – АЧХ давача



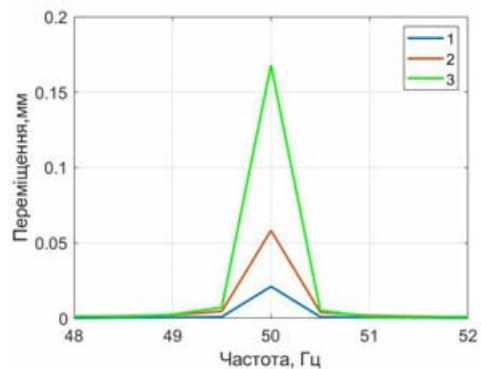
а



б



в



з

Рис. 9. Оброблений сигнал давача: а – переміщення кінця лінійки; б–г – АЧХ сигналу; 1–10 хв оброблення (15,5 Па·с); 2–20 хв (19,1 Па·с); 3–40 хв (32,0 Па·с)

Як видно із рис. 9, б, сигнали двочастотні. Низька частота – максимум лежить на 0,5 Гц, а висока – на 50 Гц.

На рис. 9, в подано сигнали в низькочастотному діапазоні (0–2 Гц). Як видно із рис. 9, сигнали із низькою в'язкістю 1 та 2 мають частоти 0,5; 1; 1,5 Гц, а сигнал із високою в'язкістю – лише 0,5 Гц, тобто тільки резонансну частоту лінійки з давачем. Амплітудні значення переміщень на резонансній частоті зростають зі збільшенням в'язкості, причому це зростання непропорційне.

В області високочастотних коливань (рис. 9, з), частота яких відповідає частоті коливань віброактиватора (50 Гц), амплітудні значення коливань лінійки зростають пропорційно до збільшення в'язкості суміші. Що вище значення в'язкості суміші, то більше захоплюється суміш каналом активатора (рис. 6) і сильнішою буде взаємодія суміші та лінійки давача.

Наближення лінійки приладу до лопаті повинно призводити до зростання коливань лінійки з-за активного впливу лопаті на рух суміші. На рис. 10, а подано криві, що характеризують переміщення лінійки приладу на різних відстанях від лопаті для суміші, значення динамічної в'язкості якої становить 19,1 Па·с (20 хв оброблення). Синя крива 1 характеризує переміщення кінця лінійки на відстані 190 мм від лопаті, червона – 25 мм.

Як видно із рис. 10, амплітуда коливань лінійки, розташованої поблизу лопаті, у п'ять разів більша від амплітуди коливань віддаленішої.

На рис. 10, б зображено АЧХ сигналів. Як бачимо, високі значення амплітуд припадають на діапазон частот 0–10 Гц, тобто це низькочастотні коливання. Причому із наближенням до лопаті зростає ширина частотного спектра сигналу (рис. 10, в).

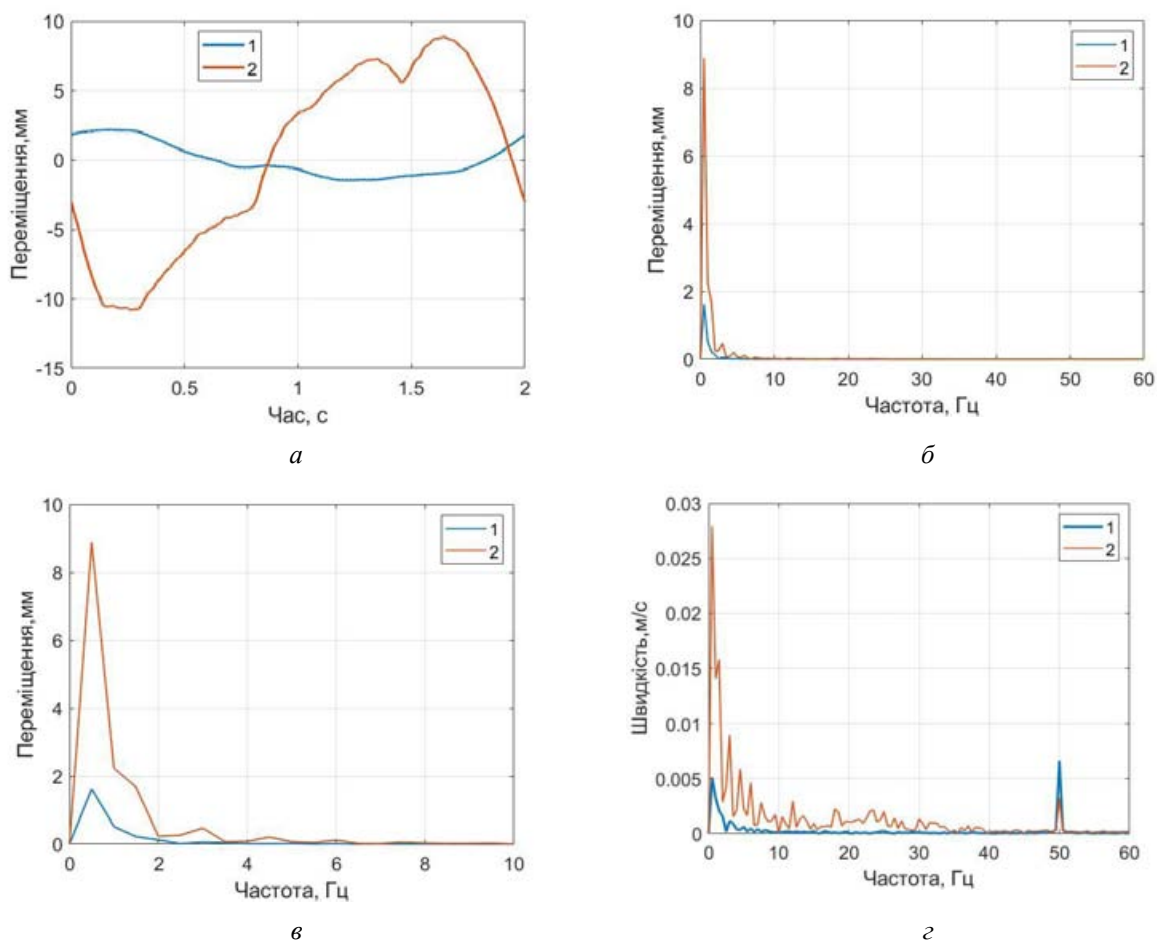


Рис. 10. Параметри руху суміші залежно від відстані до лопаті: а – коливання лінійки; б, в – АЧХ коливань лінійки за переміщенням; з – АЧХ коливань лінійки за швидкістю; 1 – відстань від лінійки до лопаті 190 мм; 2 – відстань від лінійки до лопаті 25 мм

Сили в'язкості пропорційні до різниці швидкостей між сумішню та лінійкою (формула (2)). Для встановлення причини такого явища розглянемо залежність амплітуди швидкості коливань лінійки від їх частоти, що зображено на рис. 10, з.

Як бачимо, амплітудні значення швидкості коливань лінійки, розміщеної поблизу лопаті, займають увесь низько- та середньочастотний діапазон (0–30 Гц), і це не можуть бути робочі коливання активатора (50 Гц). Зазначимо, що частота коливань, значення якої становлять 0,5 Гц, є резонансною частотою лінійки з давачем, і саме тому амплітуда на цій частоті найвища, тобто активні низькочастотні коливання суміші в прилопатевій зоні активатора можуть характеризувати ефективність процесу активації суміші.

Висновки

Ефективна вібраційна активація пастоподібної суміші гідратного вапна з водою можлива тільки у разі віброударного режиму роботи активатора, тобто наявності встановленого зазору між сумішню та лопатями, який самоутворюється лише за певних фізико-механічних параметрів суміші, а саме: мінімально допустимих масових концентрацій твердої фази та динамічної в'язкості суміші.

Ефективність вібраційної активації прямо пропорційна до швидкості удару суміші об лопаті та обернено пропорційна до її в'язкості.

Вібраційну активацію суміші необхідно здійснювати в певному оптимальному діапазоні значень її в'язкості, а саме 15–25 Па·с.

Оптимальна відстань між лопатями для цієї суміші становить 50–60 мм.

References

1. Kolchunov V. I. (2004). *Teoretychna ta prykladna hidromekhanika: Pidruchnyk. Posibnyk*. K.: NAU. 336s. [in Ukrainian].
2. Dribnohidratovane vapno vid Kalk Kontor. Rezhym dostupu: <https://www.kalk-kontor.de/> [in Ukrainian].

3. Voznyak L. V., Himer P. R., Merdukh M. I., Panevnyk O. V. (2012). *Hidravlika*. Ivano-Frankivs'k: IFNTUNH. [in Ukrainian].

4. DSTU B V.2.7-90: 2011 Vapno budivel'ne. Tekhnichni umovy [in Ukrainian].

5. DSTU B V.2.7-100-2000 Dobavky aktyvni, mineral'ni dlya tsementiv. Metody vyprobuvan' [in Ukrainian].

6. Zahrai A. I., Borovets Z. I., Lutsuk I. V., Novitsky Ya. M. (2020). Kryterii doslidzhennia protsesu dysperhuvannia systemy hidratne vapno-voda. *Khimiya, tekhnolohiya rehovyn ta yikh zastosuvannya*. (3), 23–27.

7. Zahray A. I., Borovets' Z. I., Novyts'kyi Ya. M., Chekaylo M. V., Yakimechko Ya. B. (2019). Vplyv dyspersnoho vapna na zatverdinnya tsementnoho kamenu. *Khimiya, tekhnolohiya rehovyn ta yikh zastosuvannya*, 2 (2), 55–61 [in Ukrainian].

8. Zahrai A. I., Borovets Z. I., Lutsuk I. V., Novitsky Ya. M. (2021). Vstanovlennia optimalnykh parametriv vibroaktyvuvannia hidratnoho vapna *Pytannia khimii ta khimichnoi tekhnolohii*. (6), 25–31. (SciVerse SCOPUS) [in Ukrainian].

9. Kuznyetsova H. V., Morozova N. N., Khozin V. H. (2015). Karbonatni poroshky pry vyrobnytstvi sylikatnoyi tsehly na vapni bez dobavok, (7), 10–12 [in Ukrainian].

10. Mamytov A. S. (2016). Doslidzhennia vlastyvyostey tsementiv z vapnyakovym napovnyuvachem, (1), 244–248 [in Ukrainian].

11. Fomina Ye. V., Strokovva V. V., Kuderyarova N. P. (2013). Osoblyvosti vykorystannya nehashenoho vapna v hazobetonni avtoklavnoho tverdinnya, (5), 29–34 [in Ukrainian].

12. Kurdowski W. (2014). *Cement and concrete chemistry*. Poland, Krakow.

13. Lea F M, Hewlett P. C., Martin Liska (2019). *Lea's chemistry of cement and concrete*. United Kingdom, Oxford: Butterworth-Heinemann.

14. Samanta A., Chanda D. K., Das P. S., Ghosh J., Mukhopadhyay A. K., Dey A. (2016). Synthesis of nano calcium hydroxide in aqueous medium *J. Am. Ceram. Soc.* (99), 787–795.

15. Yakymechko Ya., Lutsyuk I., Jaskulski R., Dulnik J., Kropyvnytska T. (2020). The Effect of Vibro-Activation Time on the Properties of Highly Active Calcium Hydroxide *Buildings*. (10), 1–8.

16. Yakymechko Ya., Jaskulski R., Lutsyuk I. (2019). New ways of utilizing lime in modern building technology *Mater. Struct. Technol.* (2), 61–69.

A. I. Zahrai¹, Ya. M. Novitskyi²,

Lviv Polytechnic National University,

¹ Department of Chemical Technology of Silicates,

² Department of Technical Mechanics and Dynamics of Machines

STUDY OF THE EFFICIENCY OF THE PROCESS OF VIBROACTIVATION OF HYDRATE LIME

The efficiency of the process of mechanical activation of hydrated lime in the vibratory activator of the bunker type is considered in the work. This makes it possible to use highly active hydrated lime as a modifying reinforcing additive to cements. Also, the introduction of additives has a positive impact on the economic and environmental effects in the production of mortars and concrete structures. Theoretical and experimental studies of the vibrational regimes of the mixture and their influence on the rate and degree of dispersion of hydrated lime have been performed. Parameters of existence of effective modes of vibroactivation are established.

Key words: highly active hydrated lime; vibration activator; vibration activation efficiency; dynamic viscosity; vibroactivated lime; lime dispersion.