

УДК 666.9.022.3+691.33

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ АКТИВАЦІЇ МАТЕРІАЛУ У ВІБРАЦІЙНО-ВАЛКОВОМУ ПЕРЕРОБНИКУ

Доктори техн. наук О. Ю. Крот, В. І. Вінниченко, канд. техн. наук О. Г. Савченко, асист. Д. В. Супряга, асп. А. В. Ручка

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА АКТИВАЦИИ МАТЕРИАЛА В ВИБРАЦИОННО-ВАЛКОВОМ ПЕРЕРАБОТЧИКЕ

Доктора техн. наук А. Ю. Крот, В. И. Винниченко, канд. техн. наук А. Г. Савченко, ассист. Д. В. Супряга, асп. А. В. Ручка

EXPERIMENTAL RESEARCH THE PROCESSING OF THE MATERIAL IN ACTIVATOR VIBRATORY-ROLLER TYPE

Doctor of Technical Sciences A. Y. Krot, V. I. Vinnichenko, PhD. tehn. Sciences A. G. Savchenko, Assist. D. V. Supryaga, graduate student A. V. Ruchka

Підтверджено можливість створення та ефективність застосування вібраційно-валкового активатора для підготовки будівельних сумішей на базі барабанно-валкової машини. Проведено кількісний експериментальний аналіз впливу вібрації на ефективність активації.

Ключові слова: механічна активація, барабанно-валкова машина, вібраційно-валкова активація, будівельні суміші, багатофакторний планований експеримент, регресійна модель.

Подтверждена возможность создания и эффективность использования вибрационно-валкового активатора для подготовки строительных смесей на базе барабанно-валковой машины. Проведен количественный экспериментальный анализ влияния вибрации на эффективность активации.

Ключевые слова: механическая активация, барабанно-валковая машина, вибрационно-валковая активация, строительные смеси, многофакторный планируемый эксперимент, регрессионная модель.

Was analyzed ways to improve the reactivity and the activity of the materials. The perspective is the activation of prepared and wet mixture. The possibility of the creation and efficient use of an activator for the preparation of building mixtures based on drum-roll machine. Was describes the design of the machine - drum-roll activator with mechanical vibration of roller. Was planned and executed a three-factor orthogonal experiment of the second order. Found regression equation. Confirmed its adequacy in accordance with Fisher criterion. Was determined the significance of the regression coefficients of the equation by Student's test. As a criterion of the effectiveness of activation was accepted the strength of the samples from the recycled material. It was determined that the activation efficiency increased significantly with increasing frequency and amplitude of the oscillations, but optimal values under the conditions of this experiment were not achieved. Optimum cement content was about 11%.

Keywords: mechanical activation, drum-roller machine, activator vibratory-roller type, building mix, multivariate planned experiment regression model.

Вступ. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Все більш популярною останнім часом стає ідея активації речовин з метою зміни їх властивостей для використання в різних сферах виробництва і науки. Багато інформації в науково-технічних джерелах присвячується технології і машинам для активації в'язучих речовин. Популярним є напрям модифікації речовин внаслідок їх активації хімічними впливами, зокрема активація силікатних матеріалів [1]. Ефект від хімічної активації силікатних матеріалів автоклавного твердіння може проявлятися, наприклад, у зниженні температури автоклавування [2]. Суттєвий вплив хімічна активація створює і на властивості матеріалів, одержуваних на основі силікатних сумішей [3]. При активації бетонних (у тому числі силікатних) сумішей важливим є і досягнення оптимального гранулометричного складу з точки зору найкращого укладання для досягнення максимальної густини [4]. Значно більшу ефективність впливу здатний забезпечити спільний вплив на речовину хімічної та механічної активації. Найбільш відомими машинами, де відбувається механічна активація речовини, є кульові млини [5]. Та поряд з перевагами такого типу машин є суттєвий недолік – малий к к д, який за різними даними для різних кульових млинів складає від 2 % до 20 %. У технології силікатних матеріалів відомим у СРСР і у світі було виробництво силікальциту з застосуванням дезінтеграторів, широкому розповсюдженню якого перешкождали їх технічні особливості.

Переважає більшість відомих технологій механічної активації – «сухі» технології, з нульовим або мінімальним вмістом вологи у суміші. Значно менше прикладів реалізації в обладнанні активації всієї суміші, разом із заповнювачем і зволоженою кінцевою кількістю води [6]. Така активація дозволяє розв'язувати багато проблем, що впливають на якість товарних виробів чи матеріалів: якісне

змішування компонентів, активація заповнювача з досягненням більш ефективної його форми, поточне корегування гранулометричного складу та ін.

На кафедрі механізації будівельних процесів Харківського національного університету будівництва та архітектури (ХНУБА) розроблено конструкцію барабанно-валкової машини (рис. 1), яку запропоновано застосовувати як активатор будівельних сумішей [7].

Машина складається із циліндричного барабана, який встановлений на котках і обертається з надкритичною швидкістю від спеціального привода. В середині барабана розташовано валок, здатний котитися по внутрішній поверхні барабана. Валок притискається до барабана. У верхній частині до барабана притискається ніж.

Матеріал (будівельна суміш) завантажується в барабан через лотік, прокатується між валком і барабаном, піддається механічному тиску, піднімається разом з барабаном, зрізається ножом, падає і знову піддається дії валка. Цей цикл багаторазово повторюється, після чого матеріал відводиться за межі барабана (розвантажується). Завантажується і розвантажується матеріал суцільною порцією.

Інший варіант виконання машини – конструкція безперервної дії, в якій матеріал безперервно пересувається вздовж барабана.

Тиск у матеріалі під валком значно (на порядок) менший, ніж у млинах схожої конструкції. Найбільший тиск у матеріалі може становити 1 МПа. Товщина шару матеріалу між валком і барабаном, яка залежить від їх розмірів, має бути значною – у кілька разів більшою за розмір найбільшого шматка в перероблюваній суміші.

Механічна активація суміші у машинах такого типу охоплює багато процесів, що відбуваються з матеріалом, а виражається вона у поліпшенні властивостей сумішей та збільшенні міцності виробів, сформованих з них.

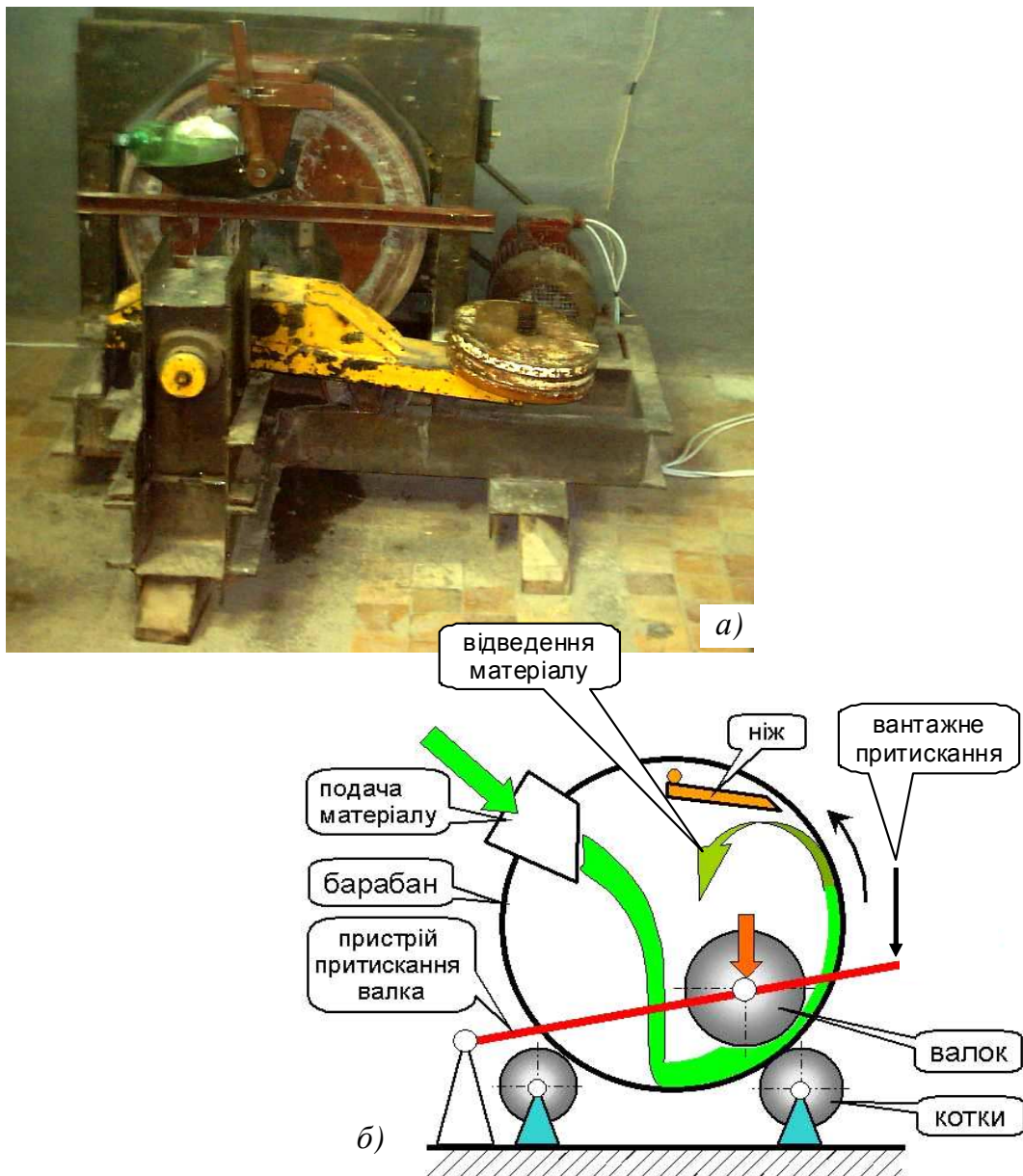


Рис. 1. Напівпромисловий зразок барабанно-валкового активатора періодичної дії: а)фото; б)схема

Більш відомою з літературних джерел є вібраційна активація будівельних матеріалів [8]. З метою оцінки поєднання позитивного впливу на матеріал прокатування під валком та вібрації створена лабораторна установка барабанно-валкової машини періодичної дії з примусовою вібрацією системи “важіль – валок” (рис. 2).

Мета статті – підтвердити ефективність застосування вібраційно-валкового активатора для підготовки будівельних сумішей; провести кількісний експериментальний аналіз впливу вібрації на ефективність активації.

Для одночасного вивчення впливу параметрів процесу вібраційно-валкової активації на ефективність переробки був

обраний планований багатofакторний експеримент. Математичні методи планування експерименту дають змогу досліджувати й оптимізувати складні процеси, забезпечуючи високу ефективність досліджень і точність визначення досліджуваних факторів [9]. Більш простий план першого порядку неможливо використовувати у зв'язку з тим, що результати експериментів першого етапу з визначення ефективності переробки свідчать про істотну нелінійність впливу факторів на функцію відгуку.

Методика досліджень. Як план експерименту був обраний ортогональний план другого порядку, що забезпечує рівність нулю всіх коваріацій між коефіцієнтами в рівнянні регресії і найвищу точність поблизу центра плану. Для оцінки ефективності вібраційно-валкової активації була обрана цементно-піщана суміш як найбільш доступна, стабільна за якістю і така, що не вимагає автоклавної обробки.

Ефективність активації оцінювалась за міцністю зразків, МПа сформованих з активованої суміші.

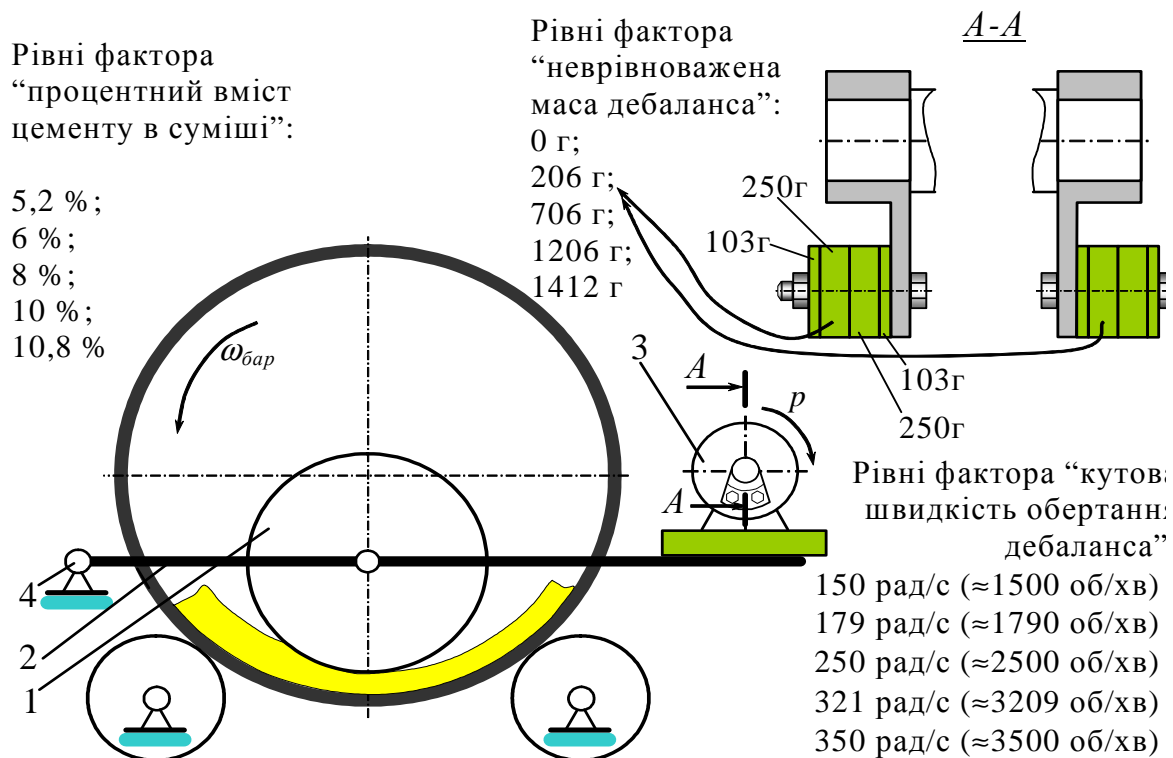


Рис. 2. Схема машини періодичної дії з примусовою вібрацією системи “важіль – валок”; вибір інтервалів варіювання факторів

Методика проведення експерименту:

1) підготовка машини до роботи шляхом активації порції зволоженої до 10÷12 % цементно-піщаної суміші протягом 4-5 хвилин для розігрівання робочих органів та їх зволоження;

2) підготовка суміші згідно з планом експерименту (табл. 2);

3) завантаження порції суміші в машину при піднятому валку для рівномірного розподілу і початок відліку тривалості процесу активації після

завершення завантаження; опускання валка;

4) активація суміші протягом 1 хв.;

5) відбір порцій активованої суміші (≈ 1 кг), для формування зразків (не менш ніж 5 штук);

6) повне розвантаження машини;

7) витримування зразків 7 днів при нормальних умовах ізольованими від зовнішнього середовища;

8) визначення міцності зразків на стиск.

Аналіз результатів попередніх досліджень дав можливість вибрати три основних фактори, що впливають на ефективність переробки, їхні нульові значення й інтервали варіювання.

Фактори:

- Кутова швидкість обертання дебалансу p (рис. 2), у межах від $p = 179$ рад/с до $p = 321$ рад/с (зоряні точки 150 рад/с і 350 рад/с).

- Неврівноважена маса дебалансу $m_{деб}$, у межах від $m_{деб} = 206$ г до $m_{деб} = 1206$ г (зоряні точки 0 г і 1412 г).

- Процентний вміст цементу в суміші C , у межах від $C = 6$ % до $C = 10$ % (зоряні точки 5,2 % і 10,8 %).

План експерименту складений для околу точок усередині зазначеної межі значень перемінних (основного рівня).

$$P_{ср\text{ед}} = \frac{179 + 321}{2} = 250 \text{ рад/с};$$

$$m_{деб_ср\text{ед}} = \frac{206 + 1206}{2} = 706 \text{ г}; \quad (1)$$

$$C_{ср\text{ед}} = \frac{6 + 10}{2} = 8 \text{ \%}.$$

Кожний з факторів набував одною з п'яти значень (для кодових рівнів "+1", "0", "-1" і зоряних точок "+1,414" і "-1,414"), що обчислюються за формулою

$$X_j = x_j \cdot \Delta x_j + x_j^0, \quad (2)$$

де X_j – натуральне значення фактора;

x_j – кодове значення фактора;

Δx_j – інтервал варіювання j -го фактора;

x_j^0 – значення j -го фактора на нульовому рівні.

У табл. 1 подано координати центра плану, інтервали варіювання і рівні дослідження.

Таблиця 1

Основні характеристики плану експерименту

Характеристика	Кодове значення фактора	Кутова швидкість обертання дебалансу p , рад/с	Неврівноважена маса дебалансу $m_{деб}$, г	Процентний вміст цементу в суміші C , %
Інтервал варіювання	Δx_j	71	500	2
Верхній рівень	+1	321	1206	10
Основний рівень	0 (x_j^0)	250	706	8
Нижній рівень	-1	179	206	6
Зоряні точки	+1,414	350	0	10,8
	-1,414	150	1412	5,2

Був здійснений перехід від фізичних перемінних " p , $m_{деб}$, C " до безрозмірних кодованих перемінних " x_1 , x_2 , x_3 ",

нормованих так, щоб вони набували значення "+1" для верхнього рівня і "-1" для нижнього рівня.

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{p - p_{cp}}{\Delta p} = \frac{p - 250}{71} \\ x_2 &= \frac{m_{деб} - m_{деб_{сред}}}{\Delta m_{деб}} = \frac{m_{деб} - 706}{500} \\ x_3 &= \frac{Ц - Ц_{сред}}{\Delta Ц} = \frac{Ц - 8}{2} \end{aligned} \right\} (3)$$

У табл. 2 подано матрицю планування експерименту. Число дослідів при цьому визначається за формулою:

$$N = 2^k + 2 \cdot k + n_0 \text{ (при } k < 5), \quad (4)$$

$$N = 2^3 + 2 \cdot 3 + 4 = 8 + 6 + 4 = 18.$$

Тут n_0 – кількість нульових точок;

K – кількість факторів.

Лінійне перетворення квадратичних стовпців x_j^2 проводилося за формулою:

$$x_j' = x_j^2 - \bar{x}_j^2 = x_j^2 - \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2}{N}. \quad (5)$$

У кожній серії дослідів експеримент проводився тричі і визначалося середнє значення функції відгуку.

Для визначення помилки відтворюваності, необхідної для оцінки значимості коефіцієнтів при перевірці адекватності математичної моделі, були виконані чотири рівнобіжних досліди на нульових рівнях факторів (рядки 15-18 у табл. 2).

Таблиця 2

Вихідні дані і результати проведення багатofакторного експерименту

Номер досліду	Код	Значення	Код	Значення	Код	Значення	Марочність зразків, середнє значення
	0	250	0	706	0	8	
	Δ	71	Δ	500	Δ	2	
	+	321	+	1206	+	10	
	–	179	–	206	–	6	
		p , рад/с		$m_{деб}$, Г		$Ц$, %	y
1	–	179	–	206	–	6	80,5
2	+	321	–	206	–	6	147,5
3	–	179	+	1206	–	6	146,5
4	+	321	+	1206	–	6	153,5
5	–	179	–	206	+	10	133,5
6	+	321	–	206	+	10	154,5
7	–	179	+	1206	+	10	147,5
8	+	321	+	1206	+	10	268,5
9	–1,414	150	0	706	0	8	127,9
10	+1,414	350	0	706	0	8	204
11	0	250	–1,414	0	0	8	114,7
12	0	250	+1,414	1412	0	8	185,3
13	0	250	0	706	–1,414	5,2	121,4
14	0	250	0	706	+1,414	10,8	160
15	0	250	0	706	0	8	160,5
16	0	250	0	706	0	8	159,3
17	0	250	0	706	0	8	158
18	0	250	0	706	0	8	162

За результатами експериментів розраховані коефіцієнти регресії і їхні помилки. Завдяки ортогональності матриці всі коефіцієнти регресії визначалися незалежно один від одного за формулою

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{ji} \cdot y_i)}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2} \quad (6)$$

У результаті розрахунків по матриці отримане рівняння виду

$$Y = b'_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{23} x_2 x_3 + b_{31} x_3 x_1 + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (7)$$

Для переходу до звичайного запису b_0 визначали за формулою

$$b_0 = b'_0 - b_{11} \cdot \bar{x}_{11}^2 - b_{22} \cdot \bar{x}_{22}^2 - b_{33} \cdot \bar{x}_{33}^2 \quad (8)$$

Значимість коефіцієнтів рівняння регресії перевірялася за критерієм Стьюдента:

$$t_j = \frac{b_j}{S_{b_j}} \quad (9)$$

де S_{b_j} – дисперсія коефіцієнтів.

Значення коефіцієнтів регресії і дисперсії цих коефіцієнтів, а також значення критерію Стьюдента подано в табл. 3.

Таблиця 3

Основні дані рівнянь регресії

Індекс j	Значення коефіцієнтів регресії, дисперсій цих коефіцієнтів, а також значення критерію Стьюдента		
	b_j	S_{b_j}	$ t_j $
0	157,94	0,481	321,7
1	26,97	0,589	45,8
2	25,0	0,589	42,4
3	19,22	0,589	32,6
11 (4)	5,33	0,683	7,8
22 (5)	-2,72	0,683	4,0
33 (6)	-7,42	0,683	10,9
12 (7)	5,0	0,721	6,9
23 (8)	7,0	0,721	9,7
13 (9)	8,51	0,721	11,8
123 (10)	20,01	0,721	27,7
$S^2_{восп} = 4,16 \quad S^2_{адек} = 12,21 \quad F_p = 2,93$			

У результаті обробки експериментальних даних було отримано повне рівняння регресії у вигляді:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{23}x_2x_3 + b_{31}x_3x_1 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (10)$$

де b – коефіцієнт регресії;
 x – кодовані перемінні чи фактори, визначені за формулою (3).

Усі коефіцієнти регресії (рівняння (10)) є значимими.

Була перевірена адекватність рівняння регресії за критерієм Фішера:

$$F_p \leq F, \quad (11)$$

де F_p – розрахункове значення критерію Фішера, $F_p = 2,93$; (табличне значення $F=8,8$).

$$F_p = \frac{S_{адек}^2}{S_{восп}^2}, \quad (12)$$

$S_{адек}$ – дисперсія адекватності, визначена за формулою

$$S_{адек}^2 = \frac{1}{N - B} \times \sum_{j=1}^N (y_{j_{екс}} - y_{j_{расч}})^2, \quad (13)$$

$y_{j_{екс}}$, $y_{j_{расч}}$ – експериментальне і розрахункове значення функції відгуку;

B – число членів рівняння регресії;

N – число дослідів повного факторного експерименту (у даному випадку 18).

$F_p \leq F$ виконується, оскільки ($2,93 < 8,8$);

рівняння регресії адекватно.

Визначення рівняння регресії і перевірка його адекватності проводилися за описаною вище методикою на ЕОМ.

У результаті отримане адекватне рівняння регресії:

$$Y = 157,94 + 26,97x_1 + 25x_2 + 19,22x_3 + 5,33x_1^2 - 2,72x_2^2 - 7,42x_3^2 + 5x_1x_2 + 7x_2x_3 + 8,5x_3x_1 + 20x_1x_2x_3. \quad (14)$$

Підставляючи у рівняння (14) значення x_1 , x_2 , x_3 з виразу (3), можна перейти до рівняння регресії у фізичних перемінних.

$$Y = 157,94 + 26,97 \cdot \frac{p-250}{71} + 25 \cdot \frac{m_{деб} - 706}{500} + 19,22 \cdot \frac{Ц-8}{2} + 5,33 \cdot \left(\frac{p-250}{71}\right)^2 - 2,72 \cdot \left(\frac{m_{деб} - 706}{500}\right)^2 - 7,42 \cdot \left(\frac{Ц-8}{2}\right)^2 + 5 \cdot \left(\frac{p-250}{71}\right) \cdot \left(\frac{m_{деб} - 706}{500}\right) + 7 \cdot \left(\frac{m_{деб} - 706}{500}\right) \cdot \left(\frac{Ц-8}{2}\right) + 8,5 \cdot \left(\frac{Ц-8}{2}\right) \cdot \left(\frac{p-250}{71}\right) + 20 \cdot \left(\frac{p-250}{71}\right) \cdot \left(\frac{m_{деб} - 706}{500}\right) \cdot \left(\frac{Ц-8}{2}\right). \quad (15)$$

Для фіксованих у центрі плану двох факторів побудовані двовимірні графіки (рис. 3, а, б, в) функції відгуку від третього фактора. Зроблено висновки щодо виконаних досліджень та визначено перспективи майбутніх досліджень.

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Використання вібрації при валковій активації істотно підвищує ефективність активації.

У досліджених інтервалах зміни дебалансних мас і частоти вібрації

ефективність активації, що виражається в марочності зразків, збільшувалася з зростанням значень цих параметрів; найбільш ефективні значення цих параметрів не визначені у зв'язку з неможливістю конструктивної реалізації в межах даної фізичної моделі. З графіка (рис. 3, б) очевидно, що маса невірноважених частин дебалансів має оптимальне значення, і воно було майже досягнуте. Проте вміст цементу має оптимальне значення (близько 11 %).

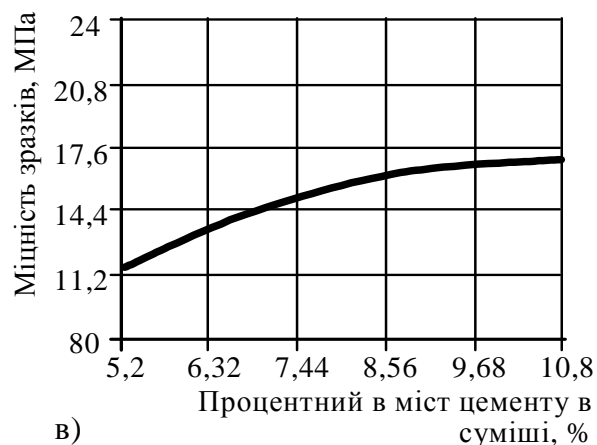
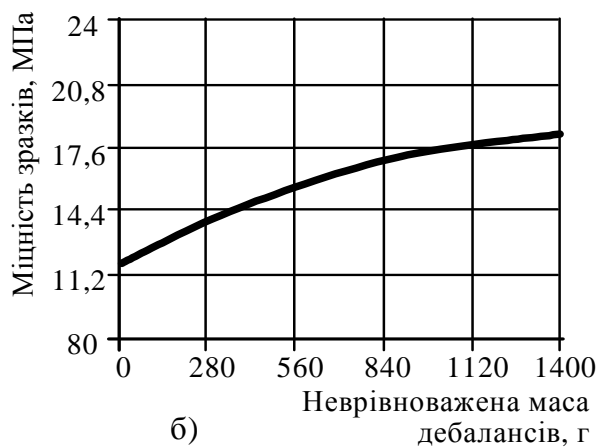


Рис. 3. Залежності міцності зразків від кутової швидкості обертання дебалансів (а), невірноваженої маси дебалансів (б), процентного вмісту цементу в суміші (в)

Список використаних джерел

1. Shabanova, G.N. Intensification of Phase Formation in the CaO – SiO₂ – H₂O System [Text] / G.N. Shabanova, S.A. Kiseleva, D.N. Shabanov //18 International Baustofftagung. 12-15 September, 2012. – Tagungsbericht. – Band 2. – Weimar, 2012. – P. 1248 – 1253.
2. The Influence of Structure Modification of Silicate Materials after Hardening in Non-autoclave Conditions on Their Coefficient of Heat Conductivity [Text]: Proceeding of International

Conference “Alkali Activated Materials – Research, Production and Utilization”. / Shinkevich E, Lutskin Y. – Prague, 2007. – P. 621-635.

3. Kubátová, D. The Effect of Mechanical Activation of Lime Putty on Properties of the Autoclaved Calcium Hydrosilicate Materials [Text] / D. Kubátová, M. Boháč, R. Nečas // Procedia Engineering – 2016. – Volume 151. – P. 18–25

4. Roelfstra, P.E. Le beton numerique [електроний ресурс] / P.E. Roelfstra, H. Sadouki, H. Wittman // Material Structure. – 1985. – №18. – P. 327–335. – Режим доступу: \www/ URL: https://www.researchgate.net/publication/225518224_Le_beton_numerique.

5. HIEN, T.T.T. Mechanical modification of silica powders [Text] / Tran Thi Thu HIEN, Takashi SHIRAI and Masayoshi FUJI // Journal of the Ceramic Society of Japan. – 2012. – № 120. – P.429-435.

6. V. Vinnichenko, A. Krot, N. Vitsenko. Theoretical and experimental research into manufacturing of silicate products without thermal treatment // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Technology organic and inorganic substances, 2016. – Vol 5, № 6 (83). – P. 29-36.

7. Крот, О. Ю. Наукові основи створення обладнання для механічної активації та пресування будівельних сумішей [Текст]: автореф. дис... д-ра техн. наук: спец. 05.05.02 / О. Ю. Крот. – Харків, 2013. – 36 с.

8. Штаерман, Ю. Я. Виброактивация цемента [Текст] / Ю. Я. Штаерман. – Тбилиси: «Техника да шрома», 1957. – 43 с.

9. Кафаров, В. В. Математическое моделирование основных химических производств [Текст] / В. В. Кафаров, М. Б. Глебов. – М.: Высшая школа, 1991. – 400 с.

Крот Олександр Юлійович, д-р техн. наук, професор кафедри механізації будівельних процесів Харківського національного університету будівництва і архітектури. Тел.: (098) 619-691-7. E-mail: tanko_drom@rambler.ru.

Вінниченко Варвара Іванівна, д-р техн. наук, професор кафедри механізації будівельних процесів Харківського національного університету будівництва і архітектури. Тел.: (050) 167-97-05. E-mail: vvinnichenko@ukr.net.

Савченко Олександр Григорович, канд. техн. наук, професор кафедри механізації будівельних процесів Харківського національного університету будівництва і архітектури. Тел.: (066) 813-53-09. E-mail: savchenko-ag@mail.ru.

Супряга Дмитро Вікторович, асистент кафедри механізації будівельних процесів Харківського національного університету будівництва і архітектури. Тел.: (066) 292-43-53. E-mail: supdima@ukr.net.

Ручка Артем Володимирович, аспірант кафедри механізації будівельних процесів Харківського національного університету будівництва і архітектури. Тел.: (093) 99-39-869. E-mail: ruchka-v117@mail.ru.

Krot Alexander, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of mechanization of construction processes, Kharkiv National University of Construction and Architecture. Tel.: (098) 619-691-7. E-mail: tanko_drom@rambler.ru.

Vinnichenko Varvara, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of mechanization of construction processes, Kharkiv National University of Construction and Architecture. Tel.: (050) 167-97-05. E-mail: vvinnichenko@ukr.net.

Savchenko Alexander, PhD. tehn., Professor of the Department of mechanization of construction processes, Kharkiv National University of Construction and Architecture. Tel.: (066) 813-53-09. E-mail: savchenko-ag@mail.ru.

Supryaga Dmitry, assistant Professor of the Department of mechanization of construction processes, Kharkiv National University of Construction and Architecture. Tel.: (066) 292-43-53. E-mail: supdima@ukr.net.

Ruchka Artem, graduate student of the Department of mechanization of construction processes, Kharkiv National University of Construction and Architecture. Tel.: (093) 99-39-869. E-mail: ruchka-v117@mail.ru.

Стаття прийнята 12.12.2016 р.