

УДК 666.9:519.6

DOI: 10.20535/iwccmm2024301928

КОМП'ЮТЕРНІ РОЗРАХУНКИ СИРОВИННИХ СУМІШЕЙ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЦЕМЕНТНОГО КЛІНКЕРУ

Наталія Дорогань,
к.т.н., старший викладач
КПІ ім. Ігоря Сікорського
nataliyadorogan@ukr.net

Лев Черняк,
д.т.н., професор
КПІ ім. Ігоря Сікорського
lpchernyak@ukr.net

Валентин Свідерський,
д.т.н., професор
КПІ ім. Ігоря Сікорського
xtkm@kpi.ua

Анотація. В даній роботі розглянуто аспекти вдосконалення методики із застосуванням сучасного програмного забезпечення комп'ютерних розрахунків складу вихідних сировинних сумішей для виготовлення цементного клінкеру. Наведено принцип вирішення задачі створення нової комп'ютерної програми «Клінкер», що забезпечує оперативне визначення складу вихідних сировинних сумішей. Наведено приклади практичної реалізації програми для проведення комп'ютерних розрахунків складів двох- та трьохкомпонентних вихідних сумішей на основі хімічних складів нелімітованого числа різновидів потенційно можливої сировини. Показано, що отримані комп'ютерні розрахунки є базою для аналізу варіантів складу сумішей щодо відповідності рекомендованим модульним характеристикам, зменшення втрат при прожарюванні та відповідно викидів в атмосферу, кількості барвних оксидів та відповідно білизни, тощо. Вказується, що техніко-економічна ефективність використання створеної програми визначається можливістю розширення сировинної бази виробництва цементу з комплексним використанням природних і техногенних ресурсів, що відповідає задачам ресурсозбереження та сталого розвитку.

Ключові слова: цемент, клінкер, сировина, вихідна суміш, склад, розрахунки, характеристики.

Abstract. In this paper, the aspects of improving the methodology with the use of modern computer software for calculating the composition of raw material mixtures for the production of cement clinker are considered. The principle of solving the problem of creating a new computer program "Clinker" that provides prompt determination of the composition of raw material mixtures is presented. Examples of the practical implementation of the program for conducting computer calculations of the compositions of two- and three-component starting mixtures based on the chemical compositions of an unlimited number of varieties of potentially possible raw materials are given. It is shown that the obtained computer calculations are the basis for the analysis of options for the composition of mixtures in terms of compliance with the recommended modular characteristics, reduction of losses during firing and, accordingly, emissions into the atmosphere,

the amount of color oxides and, accordingly, whiteness, etc. It is indicated that the technical and economic efficiency of using the created program is determined by the possibility of expanding the raw material base of cement production with the integrated use of natural and man-made resources, which meets the objectives of resource conservation and sustainable development.

Key words: cement, clinker, raw materials, initial mixture, composition, calculations, characteristics.

Вступ

Практичне застосування сучасної обчислювальної техніки з середини ХХ століття стало ваговою передумовою науково-технічного прогресу. При цьому вдосконалення математичного апарату і створення нового програмного забезпечення [1-3] відкрили можливість використання комп'ютерних розрахунків для оперативного вирішення ряду технологічних задач, в тому числі стосовно виробництва будівельних в'язучих матеріалів [4-7].

Технологія виробництва цементу пов'язана з використанням значних обсягів карбонатної та глинистої сировини. Якість цементу може бути характеризувано: хімічним складом; числами коефіцієнту насичення і модулів, що відображають кількісне співвідношення основних оксидів; структурою, вмістом і морфологією основних клінкерних мінералів [8-11].

Склад сировинної суміші для отримання клінкеру є одним з головних факторів, що визначають особливості його структуроутворення і властивості цементу [12-14].

Існуюча методика визначення складу сировинної суміші тривалий час базується на розрахунках за хімічним складом 2÷4 обраних компонентів. Проте значне розширення різновидів потенційної природної та техногенної сировини для отримання цементу визначає актуальність вдосконалення методики із застосуванням сучасного програмного забезпечення комп'ютерних розрахунків складу вихідних сировинних сумішей, що стало метою даної роботи [15].

1. Принцип вирішення задачі

Склад портландцементного клінкеру характеризується: вмістом оксидів; значеннями коефіцієнту насичення **КН**, кремнеземного (силікатного) **n** та глиноземного **p** модулів; вмістом кристалічних утворень і склофази. Найбільш розповсюдженим є спосіб розрахунку сировинної суміші за заданими

значеннями $KH = 0,88 \div 0,95$, $n = 1,90 \div 3,0$, $p = 0,90 \div 2,0$. При цьому кількість сировинних компонентів суміші повинна бути на одиницю більшою, ніж кількість заданих характеристик.

Принцип оперативної оптимізації вирішення задачі на комп'ютері на основі спеціального програмного забезпечення зводиться до наступного:

1. Вводиться таблиця з хімічним складом нелімітованого числа ймовірних сировинних компонентів (≥ 4).

2. Задаються значення KH (для розрахунку двокомпонентної суміші), KH і n (для розрахунку трикомпонентної суміші (рис. 1)).

3. За прийнятими формулами розрахунку визначаються всі поєднання по два, три або чотири компоненти, які забезпечують задані характеристики клінкеру. Таким чином при будь-якій достатньо великій сировинній базі можна оперативно визначити раціональні співвідношення компонентів у вихідній сировинній суміші.

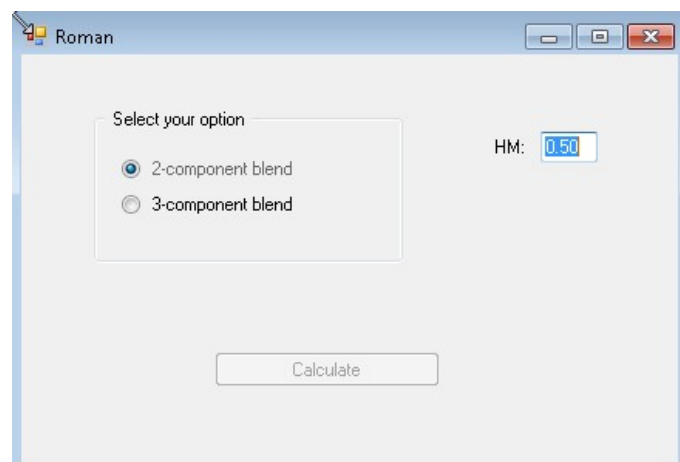


Рис. 1. Інтерактивне вікно на моніторі ПК

2. Практичне використання програми «КЛІНКЕР»

Розроблена програма «КЛІНКЕР» пройшла налагодження і ефективно використовується для кількісного визначення складу сировинних сумішей цементного клінкеру з заданими характеристиками з безлімітного числа можливих сировинних матеріалів. Крім того, операційна швидкість розрахунків дозволяє отримати значний обсяг аналітичної інформації.

Розрахунки та аналіз бінарних сировинних сумішей

Прикладом застосування програми «Клінкер» стали сировинні суміші на основі традиційної для виробництва цементу силікатної системи карбонатна порода – глина. При цьому ставилася задача оцінити залежність необхідної кількості глини від різновиду карбонатного компонента.

Для розрахунків використовували дані хімічного складу сировини, що використовується цементними заводами України: полімінеральної глини Кривинського родовища та карбонатних порід - крейди Здолбунівського родовища, вапняку Дубовецького родовища, мергеля Бахчисарайського родовища.

Згідно з відомою методикою розрахунків бінарних сумішей в програму послідовно вводили як заданий параметр значення коефіцієнту насичення клінкеру в інтервалі $KH=0,80-0,95$ із кроком $0,05$.

Отримані результати комп'ютерних розрахунків (додаток А) дозволили виявити залежність концентрації глини в суміші від різновиду карбонатного компонента та залежність модульних характеристик клінкеру від складу вихідних сумішей (рис. 2,3).

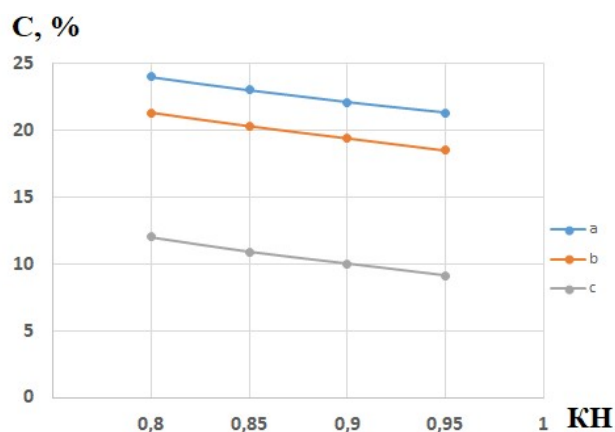
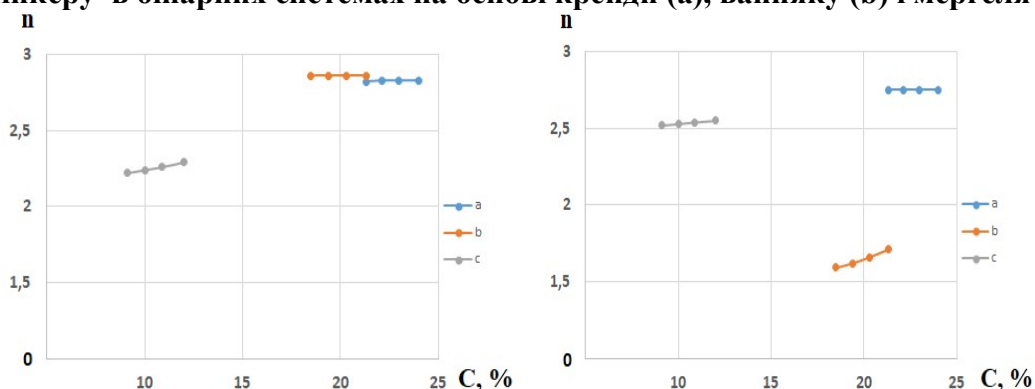


Рис. 2. Залежність вмісту кривинської глини (С) від коефіцієнту насичення КН клінкеру в бінарних системах на основі крейди (а), вапняку (b) і мергеля (с)



1

2

Рис. 3. Залежність кремнеземного n (1) і глиноземного p (2) модулів від вмісту кривинської глини (C) в бінарних системах на основі крейди (а), вапняку (б) і мергеля (с)

Очевидно, що необхідна для виготовлення клінкеру кількість глини в бінарних сумішах залежить від різновиду карбонатного компонента і в інтервалі значень $KH=0,80-0,95$ становить:

- 21,3-24,0 мас. % при використанні крейди;
- 18,5-21,3 мас. % при використанні вапняку;
- 9,1-12,0 мас. % при використанні мергелю.

При вказаних концентраціях глини бінарні суміші мають забезпечити рекомендовані значення кремнеземного модуля клінкеру $n=1,9-3,0$. Разом з тим, значення кремнеземного модуля залежать від коефіцієнту насичення та різновиду карбонатного компонента. Так, у випадку сумішей на основі крейди та вапняку в інтервалі $KH=0,80-0,95$ показники кремнеземного модуля практично не змінюються і знаходяться на приблизно однаковому рівні $n=2,83-2,86$, а у випадку сумішей на основі мергелю є суттєво меншими - $n=2,22-2,29$ і знаходяться в обернено пропорційній залежності від KH .

Значення глиноземного модуля відповідають рекомендованим $p=0,9-2,0$ у випадку сумішей на основі вапняку і змінюються у вказаному інтервалі KH та концентрації глини від 1,59 до 1,71. У випадку сумішей на основі крейди або мергелю значення глиноземного модуля дещо перевищують рекомендовані та знаходяться відповідно на рівнях $p=2,75$ і $p=2,52-2,55$.

Розрахунки та аналіз 3-компонентних сировинних сумішей

Прикладом застосування програми «Клінкер» стали сировинні суміші на основі апробованої у промисловому виробництві цементу силікатної системи карбонатна порода – глина – коригуючі добавки. При цьому ставилася задача оцінити залежність необхідної кількості різновидів добавки.

Для розрахунків використовували дані хімічного складу сировини, що використовується цементними заводами України - крейди Здолбунівського

родовища, полімінеральної глини Кривинського родовища та коригуючих добавок – відходів інших галузей промисловості. При цьому як добавки було обрано піритні недопалки (проба Pn) та відходи збагачення поліметалічної руди (проба), що значно відрізняються за хімічним складом (табл. 1).

Таблиця 1.

Код проби	Хімічний склад коригуючи добавок						
	Вміст оксидів, %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	в.п.п.
Vi	8,34	19,88	3,56	28,72	5,03	7,59	26,88
Pn	20,18	4,31	68,71	1,67	1,72	0,76	2,65

Згідно з відомою методикою розрахунків 3-компонентних сумішей в програму послідовно вводили як задані параметри значення коефіцієнту насичення клінкеру КН та кремнеземного модуля n .

Отримані результати комп'ютерних розрахунків (додаток В) дозволили виявити залежність концентрації в сировинній суміші добавок-відходів різного генезису та складу від заданих характеристик клінкеру (рис. 4,5).

Встановлено, що при кремнеземному модулі $n=2,0$ в інтервалі значень $КН=0,80-0,95$ можливий вміст добавок відходів збагачення поліметалічної руди становить 9,2 – 10,2 мас. %, а піритних недопалків – 3,3-3,7 мас. %.

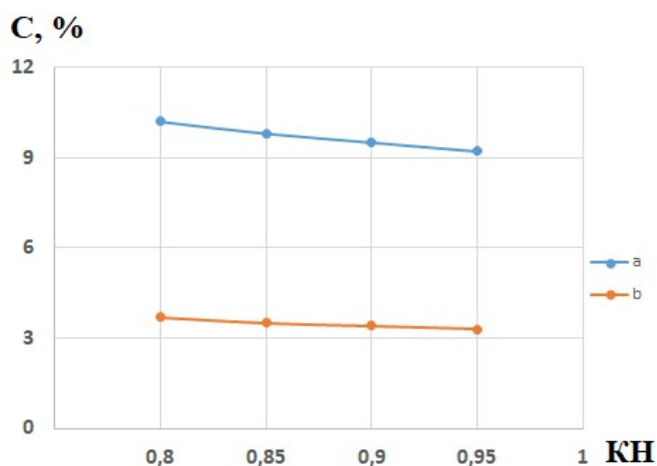


Рис. 4. Залежність вмісту відходів Ві (а) та Pn (б) від коефіцієнту насичення КН клінкеру в суміші на основі системи крейда-глина при $n=2,0$

Значення глиноземного модуля відповідають рекомендованим $p=0,9-2,0$ у випадку сумішей із застосуванням піритних недопалків і у вказаному інтервалі КН та концентрації добавки знаходяться на рівні $p=1,07$. У випадку сумішей із

застосуванням добавок-відходів Ві значення глиноземного модуля перевищують рекомендовані та знаходяться відповідно на рівні $p=3,36 - 3,40$.

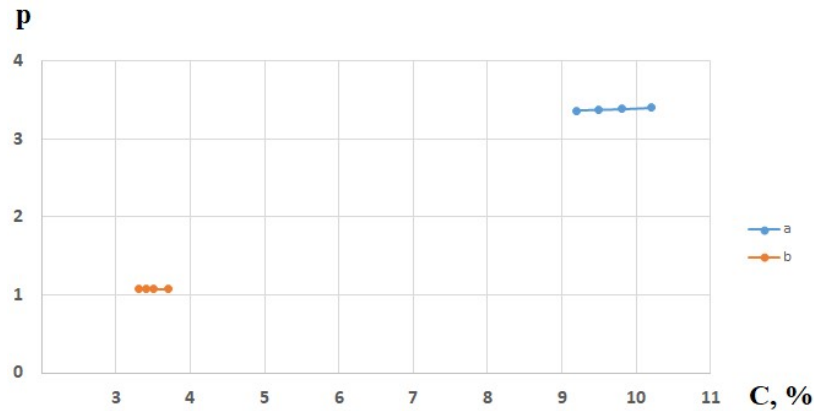


Рис. 5. Залежність глиноземного модуля p від вмісту відходів Ві (а) та Pn (b) в суміші на основі системи крейда-глина при $n=2,0$

При рекомендованому $KH=0,90$ в інтервалі значень кремнеземного модуля $n=1,9-2,5$ в можливий вміст добавок відходів збагачення поліметалічної руди становить 3,2 – 11,0 мас. %, а піритних недопалків – 1,1-4,0 мас. % (рис. 6,7).

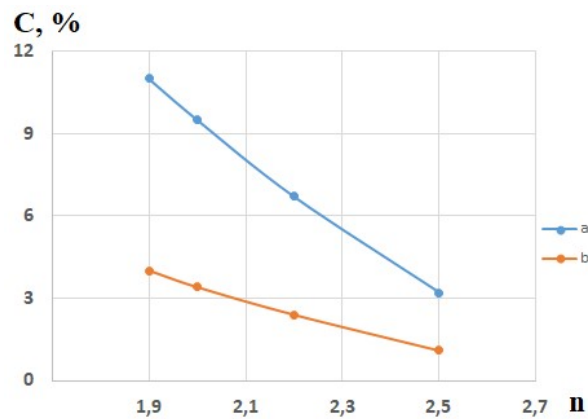


Рис. 6. Залежність вмісту відходів Ві (а) та Pn (b) від кремнеземного модуля n в суміші на основі системи крейда-глина при $KH=0,90$

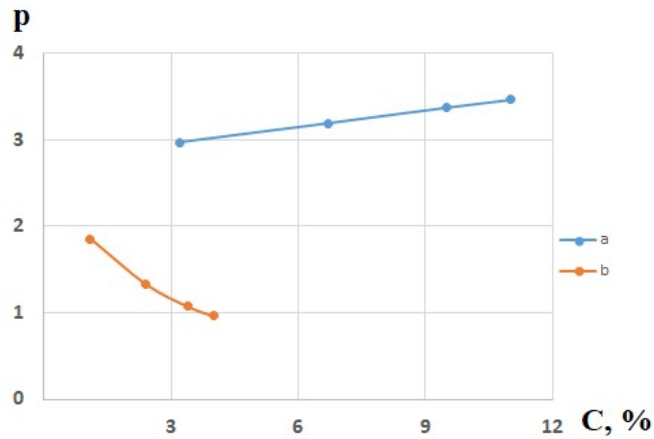


Рис. 7. Залежність глиноземного модуля p від вмісту відходів V_i (а) та P_n (b) в суміші на основі системи крейда-глина при $КН= 0,90$

Значення глиноземного модуля відповідають рекомендованим $p=0,9-2,0$ у випадку сумішей із застосуванням піритних недопалків і у вказаному інтервалі $КН$ та концентрації добавки знаходяться на рівні $p=0,96-1,85$. У випадку сумішей із застосуванням добавок-відходів V_i значення глиноземного модуля перевищують рекомендовані та знаходяться відповідно на рівні $p=2,97 - 3,46$.

Розрахунки та аналіз сировинних сумішей білого цементу

Аналіз результатів комп'ютерних розрахунків дозволяє прогнозно оцінити як вказані вище кількісні залежності складу вихідної суміші та характеристик клінкеру, так і його певні якісні характеристики.

Так, на основі результатів розрахунків трикомпонентних сумішей для отримання білого портландцементного клінкеру з волчеярівської крейди, володимирського каоліну та авдіївського кварцового піску встановлено ряд залежностей.

Із зміною співвідношення вказаних компонентів вихідної суміші при варіюванні числа коефіцієнту насичення та кремнеземного модулю суттєво змінюється концентрація барвних оксидів $Fe_2O_3 + TiO_2$ у клінкері та відповідно його білизна (рис. 8). Найменша концентрації барвних оксидів на рівні 0,46-0,51 мас. % досягається при значеннях $КН=0,90-0,95$ і $n=3,0-3,5$.

Відзначається, що із збільшенням кремнеземного модуля зменшується глиноземний модуль p (рис. 9). Для $КН = 0,80$ при збільшенні n від 2,0 до 3,5

числа глиноземного модуля зменшується з 19,70 до 17,36 або на 11,9 %, для $KH = 0,95$ при збільшенні n від 2,5 до 3,5 - з 18,70 до 16,54 або на 11,6 %.

За прогнозними розрахунками вмісту кристалічних фаз (згідно ДСТУ Б В.2.7-46:2010) клінкеру з мінімальною кількістю барвних оксидів дорівнює 0,46-0,50 мас. % характеризується утворенням 1,12-1,19 мас. % C_4AF , при цьому із збільшенням числа коефіцієнту насичення вірогідна кількість C_3S зростає, а C_2S – зменшується.

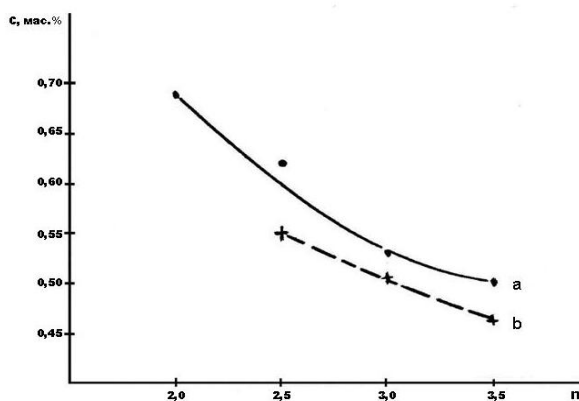


Рис. 8. Залежність вмісту барвних оксидів (C) від кремнеземного модуля (n) клінкеру при коефіцієнті насичення $KH=0,80$ (a) і $KH=0,95$ (b)

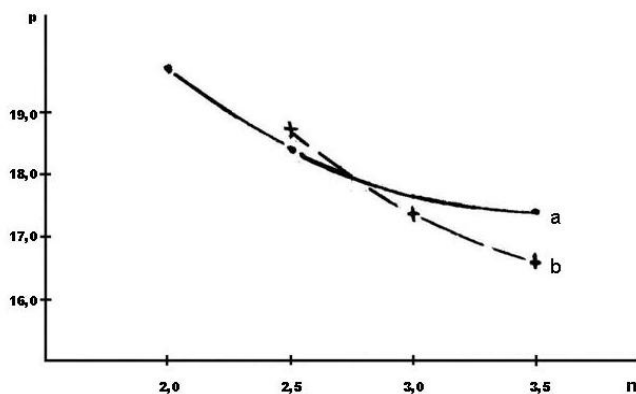


Рис. 9. Залежність глиноземного модуля (p) від коефіцієнту насичення (KH) клінкеру при коефіцієнті насичення $KH=0,80$ (a) і $KH=0,95$ (b)

ВИСНОВКИ

1. Створена комп'ютерна програма «Клінкер» забезпечує оперативне визначення складу вихідних сировинних сумішей для виготовлення цементного клінкеру.

2. Програма реалізує проведення комп'ютерних розрахунків складів двох- та трьохкомпонентних вихідних сумішей на основі хімічних складів нелімітованого числа різновидів потенційно можливої сировини.

3. Отримані комп'ютерні розрахунки є базою для аналізу варіантів складу сумішей щодо відповідності рекомендованим модульним характеристикам, зменшення втрат при прожарюванні та відповідно викидів в атмосферу, кількості барвних оксидів та відповідно білизни, тощо.

4. Техніко-економічна ефективність використання створених програм визначається можливістю розширення сировинної бази виробництва цементу з комплексним використанням природних і техногенних ресурсів, що відповідає задачам ресурсозбереження та сталого розвитку.

Список літератури:

1. Gabbrielli, M. & Martini, S. (2010). *Programming Languages: Principles and Paradigms*. Springer.

2. Tanenbaum, A.S. & Wetherall, D.J. (2011) *Computer Networks* (5th Edition). Prentice Hall. <https://balka-book.com/ua/author/andrew-s-tanenbaum-268039.htm>

3. Thomas, D. & Hunt, A. (2019). *The Pragmatic Programmer*. Addison-Wesley.

4. Ghasem, N. (2021). *Computer Methods in Chemical Engineering*. Taylor & Francis. <https://www.routledge.com/search?author=Nayef%20Ghasem>

5. Concrete Technology: New Trends, Industrial Applications: Proceedings of the International RILEM workshop. (1994). *Taylor & Francis*. <https://www.routledge.com/Concrete-Technology-New-Trends-Industrial-Applications-Proceedings-of-the-International-RILEM-workshop/Aguado-Gettu-Shah/p/book/9780367863685>

6. Dewar, J. (1999). *Computer Modelling of Concrete Mixtures*. CRC Press.

7. Vishtak, O., Golova, T., Vishtak N., Shtyrova, I., Mikheyev, I. (2022). Software module for automating the calculation of building structures. *Procedia Computer Science*, (213), 301–306.

8. *Теорія цементу*. под ред. Пащенко, А.А. (1991). Будівельник.
9. Taylor, H.F.W. (1997). *Cement Chemistry* (2 edition). Thomas Telford Publishing.
10. Kurdowski, W. (1991). *Chemia cement*. Warszawa: PWN.
11. Hewlett, P.C. (2004). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* (4 edition). London: Butterworth-Heinemann.
12. Шабанова, Г.М., & Корогодська, А.М. (2012). *В'язучі матеріали. Текст лекцій*. Харків: НТУ «ХП».
13. Черняк, Л.П. (2013). Особливості структуроутворення дисперсних систем у технології портландцементу. *Технологический аудит и резервы производства*. Т(6.- 5(14)), 8-10. http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=Tatrv_2013_6-5_4
14. Chernyak, L., Sviderskyu, V., Tokarchuk, V., Dorogan, N. (2020). To the Question of Structure Formation of Dispersed Systems in Cement Technology. *World Journal of Applied Chemistry*, (5/3), 41-46. <http://dx.doi.org/10.11648/j.wjac.20200503.11>
15. Свідоцтво про реєстрацію авторського права №49371 Комп'ютерна програма «КЛІНКЕР» / Дорогань, Н. О., Свідерський, В.А., Черняк, Л.П. (2013).