

КОМПОЗИЦІЙНІ ЦЕМЕНТНІ В'ЯЖУЧІ З ВИКОРИСТАННЯМ СИНТЕЗОВАНИХ АЛЮМОСИЛІКАТІВ

COMPOSITE CEMENT BINDERS USING SYNTHESIZED ALUMOSILICATES

Сторчай Н.С. д.т.н. ORCID: 0000-0002-6600-4632 (ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро), **Пушкар'юв І.В.** асп., ORCID: 0009-0008-8736-2480 (ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро),

Storchai N.S., Dr., ORCID: 0000-0002-6600-4632 (Research Study Institute «Prydneprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture» of the Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro), **Pushkarov I.V. PG student** ORCID: 0000-0002-9384-985X (Ukrainian State University of Science and Technologie, Dnipro)

У статті представлено літературний огляд, за результатами якого встановлено, що матеріали, одержані на основі в'язучих лужної активації (геополімерів), мають низьку проникність і високий показник рН порової рідини, що забезпечує їм хорошу стійкість до хлоридної корозії арматурної сталі. Хороша стійкість геополімерів до агресивних середовищ, перепадів температури робить ці матеріали придатними до роботи у несприятливих умовах.

Abstract. The article presents a literature review, the results of which show that materials obtained on the basis of alkaline activated binders (geopolymers) have low permeability and high pH of the pore fluid, which provides them with good resistance to chloride corrosion of reinforcing steel. The good resistance of geopolymers to aggressive environments and temperature changes makes these materials suitable for operation in adverse conditions. Thus, according to literature data, geopolymers are of interest as matrices for the immobilization of toxic and radioactive waste. Compared to Portland cement, which is currently used to solidify low and medium-level nuclear waste, geopolymers provide the resulting materials with greater stability. Technological aspects of the preparation of concretes based on alkaline activated binders and their construction and technical properties are basically similar to the technology and properties of concretes based on PC, although in the synthesis of geopolymer concretes, as a rule, thermal

activation is always required. Temperature significantly accelerates the process of dissolving the initial aluminosilicate framework and thus has an important effect on the hardening of geopolymer compositions, especially in the initial reaction period. Fly ash at normal temperature reacts very slowly and even after a month of hardening under normal conditions gives insignificant strength. However, keeping a freshly prepared product at 70-90 ° C for several hours to 1 day allows you to achieve almost the final strength, which is up to 60-70 MPa (according to some data, the strength of geopolymers can reach 100 MPa and more). Among the reasons why geopolymers have not yet been widely used is their insufficient study (mostly due to the heterogeneous composition of the raw materials).

Ключові слова

Портландцемент, композиційне в'яжуче, луги, активація, механохімічна активація, алюмосилікати, геополімери

Portland cement, composite binder, alkalis, activation, mechanochemical activation, aluminosilicates, geopolymers

Вступ. В останні десятиліття світова спільнота переглянула стратегію подальшого розвитку земної цивілізації, висунувши замість домінуючого напрямку безмежного «науково-технічного прогресу» стратегію «стійкого розвитку», основні критерії якої – обмеження споживання природних ресурсів, енергозбереження, захист довкілля. Ці критерії є базовими й у стратегії розвитку будівельного комплексу. Ці умови диктують необхідність розробки в'яжучих, виробництво яких у порівнянні з виробництвом портландцементів характеризується меншим споживанням енергетичних та природних сировинних ресурсів та обсягами шкідливих викидів в атмосферу.

Згідно сучасних українських стандартів на цементі (ДСТУ Б В.2.7-46, ДСТУ Б В.2.7-66), за речовим складом цементі поділяють на п'ять типів: ЦЕМ I - портландцемент; ЦЕМ II – портландцемент з мінеральними добавками; ЦЕМ III – шлакопортландцемент; ЦЕМ IV – пуцолановий цемент; ЦЕМ V – композиційний цемент. За вмістом портландцементного клінкеру та добавок цементі типів ЦЕМ II - ЦЕМ V поділяють на підтипи А, В та С. Вітчизняний стандарт ідентичний європейському стандарту EN 197-1:2011 Цемент. Частина 1. Склад, технічні вимоги та критерії відповідності цементу загального призначення (EN 197-1:2011 Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements, IDT).

Враховуючи сучасні тенденції розвитку, найбільш ефективним стає виробництво та застосування композиційного типу цементу, який залежно від комбінації добавок, що застосовуються може мати різні назви (композиційні цементі або в'яжучі, змішані в'яжучі, модифіковані і т.д.).

Аналіз публікацій. Композиційне в'яжуче (КВ) – це продукт механохімічної активації в певних умовах портландцементу або іншої

в'яжучої речовини з хімічними модифікаторами, що містять водознижувальний компонент, та мінеральними добавками. До активних компонентів та модифікаторів можна віднести такі речовини та мінерали, як:

- комплекси хімічних модифікаторів різного призначення; дисперсні наповнювачі;
- ультрадисперсні наповнювачі-ущільнювачі та активізатори;
- компоненти для управління об'ємними змінами структури, а також компоненти, що надають бетону спеціальні властивості та дозволяють керувати реологією бетонної суміші та процесами затвердіння;
- компоненти, що дозволяють керувати фізико-хімічними процесами твердіння та регулюючи внутрішнє тепловиділення матеріалу.

Застосування різних мінеральних наповнювачів, добавок-інтенсифікаторів, а також раціональний підбір інгредієнтів та порядок їх введення та вдосконалення морфології поверхні частинок сприяє досягненню виробництва ефективних композиційних в'яжучих. Основні властивості KB визначаються хімічним та мінералогічним складом клінкерної частини, наявністю добавок та модифікаторів, а також гранулометрією та формою його частинок.

Історія в'яжучих речовин від найдавніших часів до середини XIX століття [1-5], по суті, є історією пошуку гідравлічних в'яжучих речовин, здатних утворювати штучний водостійкий камінь. Необхідність таких в'яжучих речовин виникла тисячоліття тому у зв'язку зі зростанням міст, і навіть експансією людини у північні регіони. Цей пошук, виходячи з сучасних уявлень, здійснювався у двох напрямках: шляхом надання гідравлічних властивостей традиційним в'яжучим речовинам (вапна) та шляхом високотемпературного синтезу в'яжучих речовин, що володіють необхідним рівнем таких властивостей.

Перший напрямок, що розвивається з періоду розквіту Римської імперії до теперішнього часу, базувався на розмелі та змішанні вапна зі специфічними гірськими породами, званими «пуццолановими». До таких порід відносять, наприклад, вулканічні попели, траси, а також породи осадового походження: трепели, діатоміти. У районах, дефіцитних за пуццолановими породами, гідравлічні властивості вапна в середні віки надавали шляхом її змішання з меленим гончарним і цегляним боєм («цемянкою»). Пізніше гідравлічні властивості вапна стали надавати техногенними продуктами – золою ТЕС, доменним шлаком. Незважаючи на суттєві обмеження в галузі застосування таких в'яжучих речовин (зараз їх відносять до вапняно-пуццоланових, вапняно-шлакових, вапняно-зольних та ін), вони виробляються і в даний час.

Другий напрямок створення гідравлічних в'яжучих речовин розвивався з XVIII століття і пройшов етапи від гідравлічного вапна до романцементу. У цій групі в'яжучих речовин сполуки – носії гідравлічних властивостей синтезувалися у процесі випалу, а вапно гасилося частково або зовсім не гасилося. Вінцем цієї гілки створення гідравлічних в'яжучих речовин став

портландцемент, винахід якого в зарубіжній літературі однозначно пов'язується з англійцем В. Аспдіном, який отримав в 1824 патент «Удосконалення виготовлення штучних каменів» і назвав отримане в'язуче «портландцемент». У вітчизняній науково-технічній літературі, зокрема у фундаментальній праці І.Л. Значко-Яворського [5], наводяться відомості про аналогічний цемент у вітчизняній практиці, описаному в 1825 році в книзі Є. Челієва «Полное наставление, как приготовить лучший мертель или цемент, весьма прочный для подводных строений как то: каналов, мостов, бассейнов, плотин, подвалов, погребов и штукатурки каменных и деревянных строений».

Ці в'язучі містили основні ознаки сучасної технології портландцементу: складання штучної шихти з вапняку та глини при певному їх співвідношенні, випал до повного виділення вуглекислого газу та ін. Проте синтезовані продукти не тотожні сучасному портландцементу, виробництво якого розвивається з кінця XIX століття, зокрема успішно після винаходу в 1885 році обертової печі. Таким чином, практика виробництва портландцементу охоплює порівняно невеликий період 100-150 років.

Основними ознаками складу, властивостей та технології портландцементу, що забезпечують стабільність та перспективи його виробництва (у всьому світі виробляється понад 2 млрд. т на рік), є наступні. Область (обсяг) складів фаз, від яких залежить прояв в'язучих властивостей портландцементу у системі фазових рівноваг C-A-S (C-A-S-F), невелика. Вихід межі складів фаз, що кристалізуються у цій області, призводить до появи в клінкері неприйнятних з позицій властивостей цементу фаз – $\text{CaO}_{\text{віль.}}$, C_2AS , CAS_2 , C_3S_2 . Незважаючи на обмеженість діапазону складів портландцементного клінкеру ($\text{CaO}=60\text{--}69\%$; $\text{SiO}_2=20\text{--}25\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3=4\text{--}7\%$; $\text{Fe}_2\text{O}_3=3\text{--}8\%$), ця область складів легко забезпечується при використанні широко поширеної у всьому світі природної сировини: вапняків, мергелів та глин. Світові запаси цементної сировини практично невичерпні на доступну для огляду перспективу, навіть з урахуванням певних обмежень, пов'язаних, у ряді випадків, з присутністю небажаних домішок – оксидів MgO , P_2O_5 , TiO_2 , SO_3 , R_2O та Cl^- .

З достатньою переконаністю можна стверджувати, що технологічні основи промислового виробництва портландцементного клінкеру вже створені і подальше вдосконалення технології можливе лише шляхом удосконалення обладнання для реалізації відомих технологічних процесів на всіх їх стадіях (розмелювання та гомогенізації сировини, конструкції печей та запічних теплообмінних пристроїв, помелу цементу і т. д.).

Таким чином, за сумою техніко-економічних факторів: наявності в усьому світі практично необмеженої сировинної бази, освоєного технологічного процесу та обладнання, що забезпечує виробництво портландцементу в необхідних масштабах, якості цементу, що відповідає необхідному рівню властивостей та довговічності будівельних конструкцій, портландцемент на

найближче майбутнє швидше за все назавжди, залишиться основною загальнобудівельною в'язучою речовиною.

Тим не менш, незважаючи на універсальність властивостей портландцементу як загальнобудівельного в'язучого, систематично виконувались та виконуються дослідження щодо створення цементів, альтернативних портландцементу. Слід зазначити, що спонукальними мотивами у пошуку альтернативи портландцементу, як загальнобудівельному в'язучому, є переважно економічні та екологічні чинники, а чи не його технічні характеристики. В'язучі речовини, що володіють спеціальними технічними властивостями, не характерними для ПЦ, виявилися незамінними в деяких сферах застосування, проте вони ніколи не розглядалися як його повноцінна альтернатива.

Композиційні в'язучі із застосуванням синтезованих алюмосилікатів.

Тим часом, на думку досить великої кількості дослідників, такою альтернативою в перспективі можуть стати в'язучі речовини лужної активації, більш відомі у західній науково-технічній літературі, як геополімери [6, 7]. Разом з тим не можна не визнати, що багато положень щодо сучасного значення геополімерів носять явно спекулятивний характер, у той час як технічні труднощі поки ще надто великі, щоб застосування геополімерів хоча б у віддаленій мірі відповідало застосуванню портландського цементу. І все ж таки на розгляді цих матеріалів слід зупинитися докладніше.

Під в'язучими лужною активацією (геополімерами) прийнято мати на увазі в'язучі системи на основі тонкодисперсних аморфних або кристалічних алюмосилікатних матеріалів, що зачинаються розчинами лугів або солей, що мають лужну реакцію (зазвичай розчинами гідроксидів, силікатів або алюмініатів натрію і калію) [8].

Портландцементний камінь і затверділий геополімер мають різний хімічний склад і принципово різняться структурою. Продукт гідратації портландського цементу - кальцієво-силікатний гідрогель - має шаруватий тоберморитоподібну структуру, що формується листами з кальцієво-кисневих октаєдрів і ланцюжками з тетраєдрів SiO_4 і AlO_4 , тоді як геополімерний камінь являє собою каркасний алюмосилікат з тетраєдрів SiO_4 і AlO_4 , що мають спільні вершини.

Початок робіт в галузі в'язучих лужної активації поклав П'юрдон у своєму дослідженні щодо впливу розчинів гідроксиду натрію на техногенні алюмосилікатні матеріали різного складу та морфології [9]. Розвиток цього напрямку в Україні пов'язаний насамперед із роботами наукової школи, що склалася в Київському інженерно-будівельному інституті (нині Київський національний університет будівництва та архітектури (КНУБА)) під керівництвом проф. В.Д. Глуховського [2]. Її основний напрям – синтез лужних та лужноземельних мінералів і порід (грунтоцементів) та створення теорії конденсації мінеральних систем. На основі аналізу геологічних

процесів в земній корі, в тому числі руйнування гірських порід, вперше було показано, що додавання лугів до продуктів вивітрювання гірських порід дозволяє синтезувати лужні алюмосилікатні сполуки, подібні природним водостійким мінералам, тобто забезпечувати високу довговічність створеним на основі таких в'язучих новим будівельним матеріалам [2]. Серед них – нові бетони, які було названо «грунтосилікатними» за принципом подібності природних утворенням. Науковцями цієї школи отримані спеціальні лужні цементы (проф. П.В.Кривенко, проф. К.К. Пушкарьова, проф. В.І. Гоц) [11]. Для широкого впровадження лужних цементів розроблена нормативна документація, в тому числі ДСТУ б В.2.7-181 [2]. Досягнення цієї наукової школи пов'язують з розвитком теоретичних уявлень про причини конденсації мінеральних систем, результатом яких стало відкриття «ефекту упорядкування структури силікатних речовин» (проф. Глуховський В.Д., проф. Кривенко П.В., проф. Рунова Р.Ф.) та створення загальної теорії конденсації дисперсних речовин, на підставі якої запропоновані в'язучі контактного тверднення (проф. Рунова Р.Ф.) [2].

Близькими за напрямками дослідженнями дещо пізніше став займатися Давидовиць у Франції [6], він суттєво розвинув уявлення в цій галузі – розширив число потенційних практичних застосувань, підвів наукову основу, що узагальнює різні види в'язких лужної активації під єдиним терміном – геополімери.

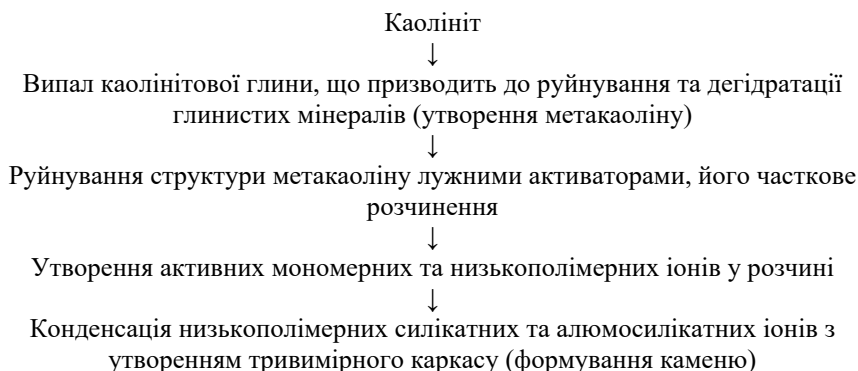
Судячи з кількості щорічно публікованих науково-дослідних робіт, присвячених геомолімерам, нині інтерес до них дуже високий, особливо за кордоном [8]. На думку деяких авторів, геополімери можуть стати альтернативою ПЦ після того, як будуть подолані труднощі технічного характеру, пов'язані з їх виробництвом. Ці припущення певною мірою можуть бути виправдані, якщо створення геополімерів розглядати насамперед як ефективний в економічному та екологічному відношенні спосіб утилізації мінеральних відходів та побічних продуктів промисловості – золи-винесення, металургійних (доменних) шлаків, золи рисового лушпиння, тощо. Здебільшого випадків саме ці матеріали розглядаються як активні тверді компоненти в синтезі геополімерів. При створенні технологій, що враховують раціональне поводження з промисловими відходами як сировиною для в'язучих речовин, широке використання в'язучих лужного типу може виявитися економічно і практично доцільним. Щорічне виробництво однієї лише золи-винесення, що виробляється ТЕС та потребує утилізації, у 2010 році складало близько 800 млн. т. В Україні утилізується не більше 10% виробленої золи-винесення; у Західній Європі та США цей показник у 3–4 рази вищий, але і його не можна вважати задовільним. Для країн Південно-Східної Азії існує проблема утилізації продукту випалу рисового лушпиння, що становить понад 10% від маси рису. Тільки однієї Індії щорічно утворюється понад 12 млн. т лушпиння [12]. Використання

перерахованих матеріалів як активних компонентів в'яжучих композицій могло б стати оптимальним способом їх утилізації.

Важливим аргументом на користь геополімерів є також та обставина, що їх виробництво пов'язане зі значно меншим утворенням парникових газів (на 80%) порівняно з виробництвом ПЦ. В даний час внесок цементної промисловості в утворення CO_2 , що надходить в атмосферу в результаті технічної діяльності людини, становить близько 5% (за цим показником цементна промисловість знаходиться на третьому місці після транспорту та енергетики) [7].

З продуктів, які є відходами виробництва, значний інтерес як основи геополімерів у дослідників викликає метакеолін ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), що одержується кальцинацією каолініту при $500\text{--}800^\circ\text{C}$ [13]. На відміну від мінеральних відходів та побічних продуктів промисловості, метакеолін різних виробників характеризується стабільністю хімічного складу, морфології та дисперсності частинок, і тому він часто використовується як модельна система при вивченні формування геополімерного каменю.

Послідовність процесів, що призводять до формування каменю при твердінні в'яжучих речовин за участю лужних активаторів, на прикладі метакеоліну, виглядає так:



У лужному середовищі відбувається фрагментація алюмосилікатних компонентів з утворенням алюмінатних і низькополімерних силікатних аніонів, з яких потім за допомогою утворення зв'язків Si-O-Al-O-Si формується тривимірний полімерний каркас (алюмосилікатний гідрогель). До його складу входять лужні катіони, що компенсують негативний заряд, створюваний при вбудовуванні тетраедрів AlO_4 між кремнекисневими тетраедрами. Участь алюмінію в утворенні гетерополімерного каркасу створює дефіцит позитивного заряду, що компенсується входженням у структуру каркасу лужних катіонів (рис. 1).

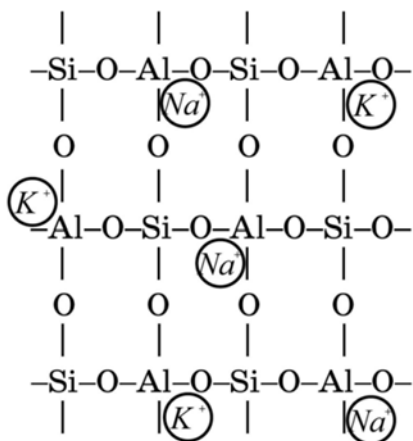


Рис. 1. Схема структури алюмосилікатного каркасу

Таким чином, лужні катіони міцно утримуються в структурі алюмосилікатного каркасу, завдяки чому матеріал в цілому має високу водостійкість і стійкість до вилигування.

Очевидно, розчинення алюмосилікатних матеріалів і перехід силікатних і алюмінієвих аніонів в рідку фазу є лімітуючою стадією в кінетиці твердіння геополімерних матеріалів. Тому чим активніше у цьому відношенні алюмосилікатний матеріал, тим вища швидкість набору міцності. Порівняно з каолінітом, продукт його випалу – метакалін – посиляє силікатні та алюмінійні іони у лужний розчин значно активніше; золи-винесення та шлаки також поступаються метакаліну в швидкості розчинення [14]. Додавання метакаліну до золи-винесення або шлаку помітним чином активізує процес лужного твердіння цих матеріалів.

Цементуючий гель геополімерів за своєю природою аналогічний алюмосилікатним гелям, одержуваним у промисловості взаємодією розчинів колоїдного кремнезему, силікатів та алюмінатів лужних металів як речовин-прекурсорів у синтезі цеолітів. Цеоліти, як відомо, утворюються в результаті кристалізації алюмосилікатних гелів у гідротермальних умовах. Тим часом, у в'язючих системах стадія кристалізації проходить лише частково і у складі цементуючого матеріалу міститься незначна кількість кристалічних фаз, у яких встановлено наявність цеолітоподібних структур. Міцність каменю, що формується, визначається складом гелю, який, у свою чергу, залежить від природи лужного активатора і твердого компонента, а також від параметрів процесу твердіння. Найкращі результати досягаються при використанні в якості лужних активаторів водних розчинів силікатів і алюмінію лужних

металів, що вже містять низькополімерні силікатні аніони і мають в'язучі властивості.

Як встановлено у дослідженнях, виконаних останнім часом, не існує принципової різниці в механізмі лужного твердіння алюмосилікатних матеріалів, що відрізняються між собою складом та особливостями структури [8]. Однак алюмосилікатні матеріали, багаті кальцієм (висококальцієві золи, шлаки), при лужній активації поряд з лужним алюмосилікатним гелем утворюють також кілька гідросилікатів кальцію і кальцієвосилікатного гідрогелю. Вплив цих речовин на формування структури каменю та його механічні властивості з'ясовано не до кінця [15]. Як правило, через утворення кальцієво-силікатного гелю структура геополімеру, що містить кальцій, відрізняється меншою однорідністю порівняно з каменем, в якому немає кальцію. У багатьох публікаціях зазначається, що мікроструктура геополімеру, отриманого лужною активацією метаксоліну, являє собою суцільний однорідний гель, в той час, як мікроструктура геополімерів, утворених зі шлаків і зол-виносу, відрізняється меншою однорідністю і є зцімтована гелем речовина, що не вступила в реакцію [16].

Технологічні аспекти приготування бетонів на основі в'язучих лужної активації та їх будівельно-технічні властивості в основному аналогічні технології та властивостям бетонів на основі ПЦ, хоча у синтезі геополімерних бетонів, як правило, завжди потрібна термічна активація. Температура значно прискорює процес розчинення вихідного алюмосилікатного каркаса і тим самим важливий вплив на твердіння геополімерних композицій, особливо в початковий період реакції [15]. Зола-винесення при звичайній температурі вступає в реакцію дуже повільно і навіть через місяць твердіння у звичайних умовах дає незначну міцність. Однак витримування свіжоприготовленого виробу при 70-90 °С протягом декількох годин до 1 доби дозволяє досягти практично кінцевої міцності, що становить до 60-70 МПа (за деякими даними, міцність геополімерів може досягати 100 МПа і більше).

Висновки. Таким чином, в результаті аналізу існуючих досліджень, спрямованих на розробку геополімерів можна зробити наступні висновки:

Матеріали, одержані на основі в'язучих лужної активації (геополімерів), мають низьку проникність і високий показник рН порової рідини, що забезпечує їм хорошу стійкість до хлоридної корозії арматурної сталі. Хороша стійкість геополімерів до агресивних середовищ, перепадів температури робить ці матеріали придатними до роботи у несприятливих умовах. Так, відповідно до літературних даних, геополімери становлять інтерес як матриці для іммобілізації токсичних і радіоактивних відходів. Порівняно з портландцементом, що використовується в даний час для затвердіння ядерних відходів низької та середньої активності, геополімери забезпечують матеріалам, що утворюються, велику стабільність. Серед причин, з яких геополімери досі не отримали широкого застосування,

вказується недостатня їх вивченість (в більшості обумовлена різномірним складом сировини).

1. Штарк Йохен, Вихт Бернд. Цемент и известь / Пер. с нем. – А.Тулаганова. Под ред. П. Кривенко. Киев, 2008, 480 с.
2. В'яжучі речовини: Підручник / [Рунова Р. Ф., Дворкін Л. Й., Дворкин О. Л., Носовський Ю. Л.] ; за ред.. докт. техн. наук, проф. Р. Ф. Рунової. – Київ. : Основа, 2012. – 448 с.
3. Дворкін Л.Й. Будівельні в'яжучі матеріали. – Рівне: НУВГП, 2019.- 622 с. .
4. Барабаш І. В., Ксьоншкевич Л. М., Стрельцов К. О. Мінеральні в'яжучі речовини: Навчальний посібник. – Одеса: ОДАБА, 2023. – 350 с. В
5. Значко-Яворський І.Л. Очерки истории вяжущих веществ от древнейших времен до середины XIX века. Изд-во АН СССР, 1963.– 500 с.
6. Davidovitz J. Geopolymer. Chemistry and applications. Saint-Quentin: Institute Geopolymer, 2008.– 592 pp.
7. Sialite technology – sustainable alternative to Portland cement// H. Sun, R. Jain, K. Nguyen, J. Zuckerman/ Clean Techn. Environ. Policy. DOI 10.1007/s10098–009–0258–8. Published online 29 Sept 2009 (www. springerlink. com).
8. Geopolymer technology: the current state of the art // P. Duxson, A. Fernandez-Jimenez, J.L. Provis и др. / J. Mater. Sci. 2007. V. 42. P. 2917–2933.
9. Purdon A.O. The action of alkalis on blast furnace slag // J. Soc. Chem. Ind. 1940. V. 59. P. 191–202.
10. Глуховський В.Д., Пахомов В.А. Шлакощелочные цементы и бетоны. Киев: «Будівельник», 1978.– 184 с.
11. П.В. Кривенко, Р.Ф. Рунова, М.А. Саницкий, И.И. Руденко Щелочные цементы: монография. – Киев: издательство ООО «Основа», 2015. – 448 с.
12. Microsilica from rice husk as a possible substitute for condensed silica fume for high performance concrete // S. Chandrasekhar, P.N. Pramada, P. Raghavan, и др. / J. Mat. Sci. 2002. V. 21. N. 6. P. 1245–1247.
13. Weng L., Sagoe-Crentsil K. Dissolution processes, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis// J. Mater. Sci. 2007. V. 42. P. 2997–3006.
14. Dissolution of aluminosilicate minerals and by-products in alkaline media// Ch. Panagiotopoulou, E. Kontori, Th. Perraki, G. Kakali / J. Mater. Sci. 2007. V. 42. P. 2967–2973.
15. Khale D., Chaudhary R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development // J. Mater. Sci. 2007. V. 42. P. 729–746.
16. Micro-structural comparison between geopolymers, alkali-activated slag cement and Portland cement // I. Lecomte, C. Henrist, M. Liegeois, и др. / J. Eur. Cer. Soc. 2006. V. 26. P. 789–3797.