

УДК 622.793.5; 669.2; 666.949; 666.946.2

І.М. Трус, Г.Ю. Флейшер, В.В. Токарчук, М.Д. Гомеля, В.І. Воробйова

УТИЛІЗАЦІЯ ОСАДІВ РЕАГЕНТНОГО ОЧИЩЕННЯ МІНЕРАЛІЗОВАНИХ ШАХТНИХ ВОД В СКЛАДІ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

В даній роботі досліджено ефективність демінералізації води реагентними методами при її вапнуванні з використанням алюмінієвих коагулянтів. Встановлено, що при сумісному використанні в якості алюмінієвих коагулянтів алюмінату натрію та гідроксохлориду алюмінію (ГОХА) відбувається ефективно знесолення мінералізованих вод. Крім того, застосування даного методу дозволяє одержати воду з відносно невисокими значеннями залишкової лужності і мінімальним вторинним забрудненням води хлоридами. Ефективність очищення води від сульфатів та її пом'якшення при постійній дозі вапна та ГОХА зі збільшенням дози алюмінату натрію підвищується. При виборі оптимальних доз реагентів ефективність вилучення сульфатів становила 76–92% при ступені пом'якшення води на рівні 95–97%. При обробленні води вуглекислотою ефективність очищення води від сульфатів суттєво не підвищується. При використанні реагентних методів відбувається осадження осаду у вигляді суміші сульфату кальцію, сульфогідроксоалюмінату кальцію та гідроксиду магнію. Високий вміст ангідриду сульфату кальцію дозволяє застосовувати осади в якості розширливої добавки та сульфатного активатора тверднення у складі цементів. Розширення цементів відбувається внаслідок гідратації частини сульфату кальцію з утворенням двоводного сульфату кальцію, а також реакції взаємодії сульфату кальцію з трикальцієвим алюмінатом у лужному середовищі з утворенням гідросульфоалюмінату кальцію. Встановлено, що оптимальні концентрації осаду знаходяться в межах до 5,0 мас.%. При цьому розширення цементного каменя становить 2,9%, а сама залежність величини розширення від концентрації носить екстремальний характер. У складі шлакопортландцементу осад у кількості 2,5 мас.% прискорює тверднення цементу і збільшує його міцність на 28 добу.

Ключові слова: демінералізація води, пом'якшення, коагулянт, вапно, алюмінат натрію, гідроксохлорид алюмінію, осад, сульфатна активація.

Вступ

На сьогоднішній день відбувається значне забруднення водних ресурсів, що призводить до їх кількісного і якісного виснаження. Внаслідок цього в багатьох регіонах України відчувається значний дефіцит водних ресурсів. Найбільш гостро це відчувається в промислових регіонах, які мають велику кількість підприємств, в результаті роботи яких утворюються великі об'єми мінералізованих вод. Скидання шахтних вод без демінералізації у річкову мережу значно погіршує екологічну ситуацію, викликає замулювання, засолення і закислення водоймищ і водотоків. Багато великих і середніх річок практично втрапили водогосподарське значення і рекреаційну

цінність. Скоротилися запаси, погіршилася якість, зріс дефіцит питних і технічних вод. Така ситуація характерна для більшості вугільних басейнів всього світу.

Якісний склад шахтних вод різноманітний і істотно змінюється по вугільних басейнах, родовищах і районах. Шахтні води забруднені за вислими і розчиненими мінеральними речовинами, домішками органічного і бактеріального походження. Мінеральні домішки – це піщані і глинисті частинки, мінеральні включення вугілля, інертний пил, розчинені солі, що також містяться в шахтних водах, луги і кислоти. Органічні забруднення – частинки чистого вугілля, мінеральні масла та інші нафтопродукти,

вживані мастила для гірських машин і механізмів, продукти життєдіяльності живих організмів, розкладання деревини тощо. Шахтні води характеризуються підвищеною кислотністю, великою концентрацією різноманітних солей та високим вмістом сульфат-іонів. Отже, необхідно шукати різноманітні шляхи і засоби для очищення стічних вод до значень менших ГДК. Все це переконливо свідчить про необхідність розробки і якнайшвидшого впровадження ефективних методів знесолення мінералізованих вод для реабілітації навколишнього середовища. В роботі [1] наведено огляд різних методів очищення від сульфатів стічних вод гірничих підприємств на основі вітчизняного і закордонного досвіду, показано доцільність використання реагентних методів. При застосуванні реагентних методів доцільно використовувати вапно. Основною перевагою використання даного реагенту є низька собівартість процесу, до недоліків варто віднести зниження концентрації сульфатів лише до 1500 мг/дм^3 , що зумовлено розчинністю гіпсу та утворенням шламів [2]. Тому при вапнуванні води необхідно використовувати алюмінієві коагулянти для підвищення ефективності процесу [3,4], а також знайти можливі шляхи утилізації відходів, що утворюються при знесоленні води.

Мета даної роботи полягає у розробці безвідходного способу очищення шахтних вод від сульфатів при вапнуванні і використанні алюмінієвмісних коагулянтів з подальшою утилізацією одержаного осаду у будівельній промисловості.

Методика експерименту

В процесі досліджень використовували воду з шахти Кремінна Луганської області із вмістом сульфатів $20,8 \text{ мг-екв/дм}^3$, хлоридів $35,7 \text{ мг-екв/дм}^3$, жорсткістю $39,0 \text{ мг-екв/дм}^3$, лужністю $9,5 \text{ мг-екв/дм}^3$. Як реагенти використовували вапно, гідроксоалюмінат натрію та $2/3$ гідроксохлорид алюмінію (ГОХА), синтезований в лабораторії. При обробленні води вапном та алюмінієвими коагулянтами враховували витрату вапна та коагулянтів в залежності від вмісту сульфатів, жорсткості і лужності води. Воду при перемішуванні обробляли розрахованою кількістю вапна і коагулянтів. Через 3 год осад відділяли на фільтрі, в фільтраті визначали вміст сульфатів, жорсткість та лужність.

Для дослідження можливих шляхів утилізації осаду в будівельній промисловості його висушили в лабораторній печі при температурі 200°C до постійної маси. Далі досліджувався вплив утвореного осаду на рядовий і композиційний цемент. В роботі використовували ря-

довий портландцемент типу I марки 500 виробництва «Волинь Цемент». Для приготування композиційних цементів використовувалися активні мінеральні добавки: шлак доменний, зола-винесення, відходи вуглезбагачення.

Суміші для дослідження готувалися наступним чином. Окремі компоненти (цемент, активна мінеральна добавка, осад) перемішувалися у лабораторному кульовому млині протягом 20 хв. Співвідношення компонентів композиційного цементу (цемент:активна мінеральна добавка) становило 60:40.

Вплив осаду на властивості цементів оцінювався за наступними характеристиками: нормальна густина, строки тужавіння, міцність на стиск, розширення. Нормальна густина і строки тужавіння визначалися на міні приладі Віка згідно зі стандартною методикою. Міцність на стиск визначалася за допомогою пресу на зразках-кубиках розмірами $20 \times 20 \times 20 \text{ мм}$ за стандартною методикою.

Результати та обговорення

Очищення води від сульфатів при одночасному її пом'якшенні дозволяє вирішувати проблему демінералізації води. На даний час досить широко для вилучення сульфатів застосовуються реагентні методи. Для осадження гідроксосульфоалюмінатів кальцію широко використовують такі алюмінієві коагулянти, як гідроксохлориди алюмінію та алюмінат натрію.

З гідроксохлоридами алюмінію у воду додатково вносяться хлориди. В той час, як при використанні алюмінату натрію з вапном, при очищенні води від сульфатів та при її пом'якшенні, є великі значення залишкової лужності води, що зумовлені надлишком луку в даному реагенті. При сумісному використанні алюмінату натрію і гідроксохлориду алюмінію дані недоліки вдалось значною мірою зменшити. Одним з найважливіших факторів, від якого залежить ефективність процесу реагентного пом'якшення води, є саме доза реагентів. Важливо визначити оптимальну дозу коагулянта, при якій буде відбуватись ефективне пом'якшення води та вилучення з неї сульфатів [5–7]. На першому етапі досліджень витрату $2/3$ ГОХА та алюмінату натрію брали постійними, дозу вапна змінювали від 100 до 125% від стехіометрично розрахованої. При надлишку вапна 110% (доза $89,4 \text{ мг-екв/дм}^3$) ефективність вилучення сульфатів та пом'якшення води є максимальною (табл. 1).

В подальших дослідженнях дозу вапна брали рівною $89,4 \text{ мг-екв/дм}^3$ і змінювали дозу $2/3$ ГОХА в діапазоні $4,1\text{--}8,9 \text{ мг-екв/дм}^3$ (табл. 2).

Таблиця 1

Вплив витрати вапна на ефективність пом'якшення та знесолення води при дозі 2/3 ГОХА 7,4 мг-екв/дм³; алюмінату натрію 2,9 мг-екв/дм³

Доза СаО, мг-екв/дм ³	SO ₄ ²⁻ , мг-екв/дм ³		Ж, мг-екв/дм ³		СГ, мг/дм ³	Л, мг-екв/дм ³ (ОН ⁻ ; загальна)	
	I	I	I	II		I	II
81,0	3,4	2,3	2,9	1,8	1533	2,25; 10,5	0,0; 6,0
85,2	2,6	2,5	3,5	2,0	1535	2,30; 9,8	0,0; 6,0
89,4	1,4	1,4	2,5	1,2	1541	2,80; 8,8	0,0; 7,5
102,0	3,2	2,3	14,4	4,3	1532	15,40; 18,3	0,0; 7,8

Примітка: I – після реагентного оброблення, II – після продування CO₂.

Таблиця 2

Вплив витрати вапна на ефективність пом'якшення та знесолення води при дозі СаО 89,4 мг-екв/дм³; алюмінату натрію 2,9 мг-екв/дм³

Доза 2/3 ГОХА мг-екв/дм ³	SO ₄ ²⁻ , мг-екв/дм ³		Ж, мг-екв/дм ³		СГ, мг/дм ³	Л, мг-екв/дм ³ (ОН ⁻ ; загальна)	
	I	I	I	II		I	II
4,1	9,5	8,2	25,6	20,8	1425	2,25; 10,5	0,0; 21,0
5,3	6,3	6,1	4,3	3,5	1464	2,30; 9,8	0,0; 6,5
6,1	6,2	5,9	4,0	3,1	1480	2,80; 8,8	0,0; 8,3
7,4	1,4	1,4	2,5	1,2	1541	2,80; 8,8	0,0; 7,5
8,2	2,6	2,5	2,3	2,0	1550	2,90; 8,9	0,0; 7,7

Примітка: I – після реагентного оброблення, II – після продування CO₂.

Застосування 2/3 гідроксохлориду алюмінію майже не вплинуло на вміст хлоридів у воді.

При обробленні води вуглекислою ефективність очищення води від сульфатів суттєво не підвищується. Оскільки використання вуглекислоти значно ускладнює технологічний процес, то в подальших дослідженнях воду обробляли лише вапном та алюмінієвими коагулянтами.

Здійснені дослідження дозволили встановити, що найбільш ефективно очищення мінералізованих вод відбувається при надлишку 2/3 ГОХА 180% та вапна 110% від стехіометрично розрахованих значень. В подальших дослідженнях було вивчено вплив витрати алюмінату натрію на ефективність вилучення сульфатів і знесолення води. При збільшенні дози алюмінату натрію від 1,9 до 3,9 мг-екв/дм³ при постійній дозі вапна та гідроксохлориду алюмінію спостерігається підвищення ефективності вилучення сульфатів з води, також збільшується ступінь пом'якшення води (рис. 1). В кращих дослідах було досягнуто зниження жорсткості води до 1,3 мг-екв/дм³ без оброблення води вуглекислою. Концентрацію сульфатів було знижено до 1,7 мг-екв/дм³. При цьому гідратна

лужність води була відсутня, а загальна сягала 7,5 мг-екв/дм³.

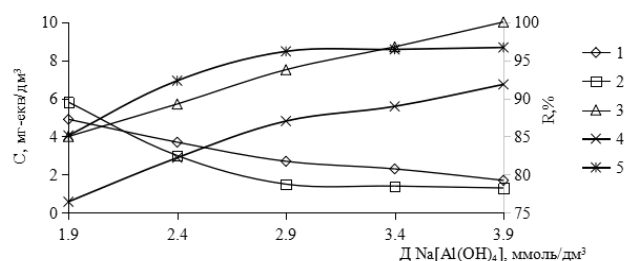


Рис. 1. Залежність залишкової концентрації сульфатів (1), жорсткості (2), лужності (3), ефективності вилучення сульфатів (4) та пом'якшення (5) розчину від дози гідроксоалюмінату натрію (доза гідроксохлориду алюмінію 7,4 мг-моль/дм³, вапна 89,4 мг-екв/дм³)

Високий ступінь очищення води від сульфатів та її ефективне пом'якшення можна досягти при виборі оптимальних доз реагентів, з урахуванням складу води.

Осади, які утворюються після очищення води, мають наступний мінералогічний склад, мас. %: сульфат кальцію – 50,5–70,2, сульфогідроксоалюмінати – 27,6–49,2, гідроксид магнію

– 0,2–2,2. Переважну кількість становить ангідрит сульфату кальцію, який здатний до гідратації з утворенням двоводного сульфату кальцію. З даної точки зору осад можуть знайти застосування у будівельній промисловості в якості двох типів добавок для цементів.

Існують дві форми розширення цементів: оксидна і гідросульфоалюмінатна [8–11]. З цієї точки зору ангідрит сульфату кальцію може знайти застосування в якості розширливої добавки, яка сприяє розширенню одразу за двома формами. Густина ангідриту сульфату кальцію становить близько $2,93 \text{ г/см}^3$, двоводного сульфату кальцію – $2,60\text{--}2,75 \text{ г/см}^3$. Таким чином, внаслідок гідратації збільшується загальний об'єм системи. При цьому гідроксид кальцію, який утворюється внаслідок гідратації цементу, використовується як каталізатор гідратації ангідриту сульфату кальцію. Таким чином здійснюється оксидний механізм розширення. Одночасно з цим, ангідрит сульфату кальцію вступає у взаємодію з клінкерним мінералом (трикальцієвим алюмінатом) у лужному середовищі і утворює гідросульфоалюмінат кальцію. Зростання призматичних кристалів гідросульфоалюмінату кальцію сприяє розширенню цементної системи. Таким чином здійснюється гідросульфоалюмінатний механізм розширення.

Іншим типом добавок є активатори тверднення шлакопортландцементів. У складі шлакопортландцементу сульфат кальцію реагує з іонами алюмінію з утворенням у твердій фазі гідросульфоалюмінату кальцію. Внаслідок цього послаблюються зв'язки в кристалічній решітці мінералів шлаку, що підвищує активність взаємодії шлаку з водою. В розчині за присутності сульфат-іонів утворюються голчаті кристали гідросульфоалюмінату кальцію, які сприяють додатковому зміцненню цементного каменя [12,13].

Для оцінювання дії осаду в якості вказаних добавок дослідження здійснювалось на цементному тісті нормальної густини. Терміни тужавлення та нормальна густина визначалися на міні-приладі Віка, а міцність на стиск на кубках цементного каменя з розміром ребра 2 см (рис. 2).

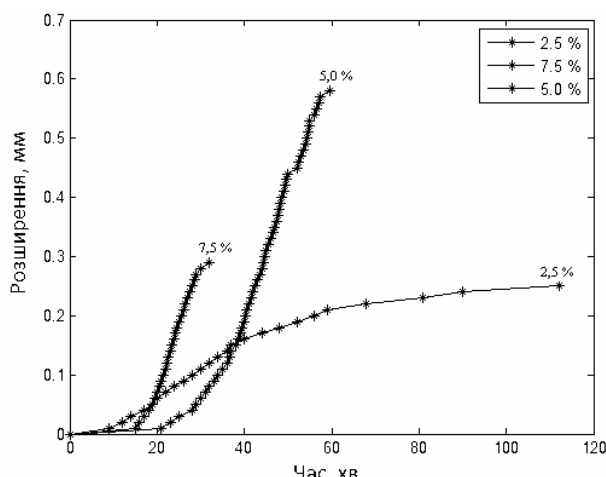


Рис. 2. Залежність розширення цементу з добавкою ОСАД від вмісту добавки

Розширення цементу з 2,5 мас.% осаду становить 1,3%, з 5 мас.% – 2,9%, а з 7,5 мас.% – 1,5%. З даних графіка можна побачити, що оптимальним складом з точки зору розширення є склад з 5,0 мас.% добавки. Даний склад має вдвічі більшу величину розширення (2,9%), ніж склади цементу з 2,5 та 7,5 мас.% добавки. Однак, сама величина розширення невелика, тому осад можна використовувати у складі безсадочних цементів для компенсації зсідання цементу в процесі тверднення (табл. 3).

Згідно з даними міцності на стиск оптимальний вміст осаду в такому композиційному цементі – 2,5 мас.%. При цьому міцність на першу добу спадає не значно, на третю добу трохи зростає, на 28 добу спостерігається значний приріст міцності – на 28%. Тобто, осад у кількості 2,5% від маси шлакопортландцементу здатний активізувати тверднення та, зокрема, на 28% збільшити міцність цементу на 28-му добу.

Експериментальні дані підтверджують, що осад, які утворюються внаслідок очищення води можуть знайти застосування у складі цементу в якості розширливої добавки для компенсації зсідання цементу та в якості активіза-

Таблиця 3

Фізико-механічні показники шлакопортландцементу

Склад, мас.%		Нормальна густина, %	Терміни тужавіння		Міцність на стиск, МПа, у віці, діб		
цемент	осад		початок	кінець	1	3	28
100,0	0	25,0	0–50	7–05	12,4	19,9	29,3
97,5	2,5	26,0	1–20	8–40	11,3	22,9	37,5
95,0	5,0	26,5	1–15	8–20	10,8	19,9	29,6
92,5	7,5	28,5	0–55	8–15	8,9	21,3	26,8

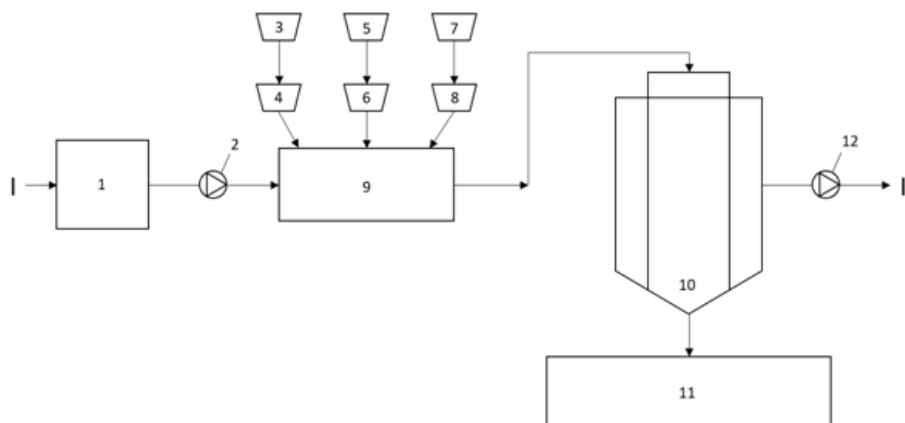


Рис. 3. Принципова технологічна схема комплексного очищення шахтних (стічних) вод (концентратів) реагентним методом: 1 – усереднювач шахтних (стічних) вод (концентратів); 2, 12 – насоси; 3, 5, 7 – розчинні баки алюмініату натрію, ГОХА і вапна; 4, 6, 8 – витратні баки алюмініату натрію, ГОХА і вапна; 9 – камера реакції; 10 – відстійник; 11 – осад на перероблення. I – подача шахтної (стічної) води (концентрату); II – очищена вода

тора тверднення шлакопортландцементів.

Один із варіантів реалізації розроблених процесів проілюстрований принциповою технологічною схемою очищення шахтних, стічних вод і концентратів при повному переробленні відходів, що при цьому утворюються (рис. 3).

Після усереднювача 1 шахтні (стічні) води потрапляють до камери реакції 9, куди дозується вапно, алюмінат натрію та гідроксохлорид алюмінію. Даний процес забезпечує глибоке пом'якшення води до 3,0–1,3 мг-екв/дм³ та вилучення сульфатів до 1,7 мг-екв/дм³. Після відстійника 10 одержуємо пом'якшену воду одночасно з її освітленням та знебарвленням. Осад, що утворюється в процесі знесолення води, відділяється та направляється на перероблення в якості розширливої добавки для цементів та сульфатного активатора для шлакопортландцементів.

Висновки

В роботі визначено ефективність вилучення сульфатів та ефективність пом'якшення в залежності від доз вапна та алюмінієвого коагулянта. Показано переваги взаємного використання алюмініату натрію та 2/3 гідроксохлориду алюмінію на ефективність очищення води від сульфатів та її пом'якшення при обробленні вапном. Показано, що за певних співвідношень можна досягти ефективного очищення води без оброблення її на останній стадії вуглекислою.

Осад, який утворюється внаслідок пом'якшення та очищення шахтних вод, складається переважно з ангідриду сульфату кальцію, здатного до гідратації з утворенням двоводного сульфату кальцію. Показано, що осад може бути застосований в якості розширливої добавки для

цементів і сульфатного активатора для шлакопортландцементів. Ефект розширення досягається внаслідок суттєвої зміни об'єму при перетворенні ангідриду у двоводний сульфат кальцію. Ефект активації досягається внаслідок аморфізації кристалічної решітки мінералів шлаку. Виявлено, що оптимальні концентрації добавки осаду знаходяться в межах до 5,0 мас. %.

Комплексне перероблення шахтних вод дозволяє створити маловідходні технології знесолення мінералізованих вод з повним переробленням осадів, що при цьому утворюються.

Подяки

Публікація містить результати досліджень, здійснених за грантом Президента України за конкурсним проектом Ф-70 Державного фонду фундаментальних досліджень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Методы* снижения концентрации сульфатов в сточных водах горнорудных предприятий / Маслобоев В.А., Вигдергауз В.Е., Макаров Д.В., Светлов А.В., Некипелов Д.А., Селезнев С.Г. // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2017. – № 1 (9). – С.99-115.
2. *International network for acid prevention (INAP)*. treatment of sulfate in mine effluents. LoraxEnvironmental. – 2003. – 129 p.
3. *Gomelya M., Trus I., Shablyy T.* Application of aluminium coagulants for the removal of sulphate from mine water // Chemistry and Chemical Technology. – 2014. – Vol.8. – No. 2. – P.197-203.
4. *Гомеля Н.Д., Трус И.Н., Носачева Ю.В.* Очистка воды от сульфатов известкованием при добавлении реагентов содержащих алюминий // Химия и технология воды. – 2014.

– № 2. – C.129-137.

5. Bae H., Kim S., Kim Y.J. Decision algorithm based on data mining for coagulant type and dosage in water treatment systems // *Water Science and Technology*. – 2006. – Vol.53. – P.321-329.

6. Wu G.-D., Lo S.-L. Predicting real-time coagulant dosage in water treatment by artificial neural networks and adaptive network-based fuzzy inference system // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2008. – Vol.21. – P.1189-1195.

7. Deveughele S., Do-Quang Z. Neural networks: an efficient approach to predict on-line the optimal coagulant dose // *Water Science and Technology: Water Supply*. – 2005. – Vol.4. – P.87-94.

8. El Dessoukii A., Mitri H. Rock breakage using expansive cement // *Engineering*. – 2011. – Vol.3. – P.168-173.

9. Ghosh S.N. *Cement and concrete science and technology*. – Thomas Telford, 1991. – 494 p.

10. Parashchuk L., Kochubei V., Yakymchko Y. The use of granulated modified lime for expansive cement with high-energy self-tension // *Chemistry and Chemical Technology*. – 2011. – Vol.5. – P.341-345.

11. Nagataki S., Gomi H. Expansive admixtures (mainly ettringite) // *Cement and Concrete Composites*. – 1998. – Vol.20. – P.163-170.

12. *Activation of ground granulated blast furnace slag cement by calcined alunite* / Kim H.-S., Park J.-W., An Y.-J., Bae J.-S., Han C. // *Materials transactions*. – 2011. – Vol.52. – P.210-218.

13. Aimin X., Sarkar S.L. Microstructural study of gypsum activated fly ash hydration in cement paste // *Cement and Concrete Research*. – 1991. – Vol.21. – P.1137-1147.

Надійшла до редакції 07.09.2017

UTILIZATION OF THE RESIDUES OBTAINED DURING THE PROCESS OF PURIFICATION OF MINERAL MINE WATER AS A COMPONENT OF BINDING MATERIALS

I.M. Trus, H.Y. Fleisher, V.V. Tokarchuk, M.D. Gomelya, V.I. Vorobyova

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

The efficiency of water desulphatization during the lime softening process with aluminium coagulant was estimated in the article. The joint use of sodium aluminate and aluminium hydroxychloride as complex coagulants was stated to be efficient for the purpose of water purification. Water treated with chemical reagent has a lower level of the residual alkalinity and minimal level of the secondary chloride contaminants. The efficiency of water desulphatization and softening increases with an increase in the sodium aluminate dosage and at constant dosages of lime and aluminium hydroxychloride. The efficiency of desulphatization reached 76–92% and water softening was 95–97% at optimal contents of the reagents. The treatment of water with carbon dioxide does not result in a significant increase in the efficiency of water desulphatization. The waste product of the chemical water softening process is a precipitate which contains calcium sulphate, calcium sulphohydroxyaluminate and magnesium hydroxide. Due to a high content of calcium sulphate, it is expedient to use the residue as an expansive admixture and a sulphate activator for cements. Cement

expansion results from the hydration of calcium sulphate and its transformation into gypsum. In addition, calcium sulphate reacts partially with tricalcium aluminate in a highly alkaline medium forming calcium hydrosulphoaluminate. It is determined that the optimal dosage of the residue is up to 5 wt.%, the magnitude of the expansion being up to 2.9%. The dependence of the expansion on residue concentration is extreme. The presence of 2.5% residue accelerates the hardening of slag blended cement and increases its strength on the twenty-eighth day.

Keywords: water desulphatization; softening; coagulant; lime; sodium aluminate; aluminium hydroxychloride; residue; sulphate activation.

REFERENCES

1. Masloboev V.A., Vigdergauz V.E., Makarov D.V., Svetlov A.V., Nekipelov D.A., Seleznev S.G. Metody snizheniya kontsentratsii sul'fatov v stochnykh vodakh gornorudnykh predpriyatii [The methods of reducing sulphate concentrations in the waste water of mining enterprises]. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 1, no. 9, pp. 99-115. (in Russian).

2. *International Network for Acid Prevention (INAP). Treatment of sulfate in mine effluents*. Lorax Environmental. 2003. 129 p.

3. Gomelya M., Trus I., Shablyi T. Application of aluminium coagulants for the removal of sulphate from mine water. *Chemistry & Chemical Technology*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 197-203.

4. Gomelya N.D., Trus I.N., Nosacheva Yu.V. Ochistka vody ot sul'fatov izvestkovaniem pri dobavlenii reagentov, soderzhashchikh al'yuminii [Water purification from sulfates by liming when adding reagents containing aluminium]. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 2014, vol. 2, pp. 129-137. (in Russian).

5. Bae H., Kim S., Kim Y.J. Decision algorithm based on data mining for coagulant type and dosage in water treatment systems. *Water Science and Technology*, 2006, vol. 53, no. 4-5, pp. 321-329.

6. Wu G.-D., Lo S.-L. Predicting real-time coagulant dosage in water treatment by artificial neural networks and adaptive network-based fuzzy inference system. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2008, vol. 21, pp. 1189-1195. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2008.03.015>.

7. Deveughele S., Do-Quang Z. Neural networks: an efficient approach to predict on-line the optimal coagulant dose. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2005, vol. 4, no. 5-6, pp. 87-94.

8. El Dessoukii A., Mitri H. Rock breakage using expansive cement. *Engineering*, 2011, vol. 3, no. 2, pp. 168-173.

9. Ghosh S.N., *Cement and concrete science and technology*. Thomas Telford, 1991. 494 p.

10. Parashchuk L., Kochubei V., Yakymchko Y. The use of granulated modified lime for expansive cement with high-energy self-tension. *Chemistry & Chemical Technology*, 2011, vol. 5, no. 3, pp. 341-345.

11. Nagataki S., Gomi H. Expansive admixtures (mainly ettringite). *Cement and Concrete Composites*, 1998, vol. 20, pp. 163-170.

12. Kim H.-S., Park J.-W., An Y.-J., Bae J.-S., Han C. Activation of ground granulated blast furnace slag cement by calcined alunite. *Materials Transactions*, 2011, vol. 52, pp. 210-218.

13. Aimin X., Sarkar S.L. Microstructural study of gypsum activated fly ash hydration in cement paste. *Cement and Concrete Research*, 1991, vol. 21, pp. 1137-1147.