

РОЗДІЛ IV. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

УДК 624:622.012

DOI: 10.25140/2411-5363-2021-1(23)-175-187

Ярослав Ляшок, Сергій Подкопаєв, Олексій Повзун,
Валерій Калиниченко, Кирило Деменко

БУДІВЕЛЬНИЙ МАТЕРІАЛ НА ОСНОВІ ВІДХОДІВ ГІРНИЧОРУДНОГО ВИРОБНИЦТВА

У роботі доведено доцільність використання відходів залізистих кварцитів (хвостів) I стадії збагачення як кремнеземистий компонент газобетонних сумішей. Уперше встановлено нові й уточнено наявні закономірності зміни активності взаємодії залізородних відходів мокрої магнітної сепарації ПрАТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат» та ПрАТ «Інгулецький гірничо-збагачувальний комбінат» з в'язучими речовинами газобетону автоклавного тверднення на їх основі.

Ключові слова: газобетон; кремнеземистий компонент; відходи збагачення залізистих кварцитів.

Рис.: 1. Табл.: 7. Бібл.: 26.

Актуальність теми дослідження. Розширення мінеральної сировинної бази для виготовлення будівельних матеріалів може бути забезпечено не лише шляхом пошуку нових родовищ нерудних корисних копалин, але й у результаті використання вторинних продуктів виробництва (техногенних відходів). Це дозволяє значно підвищити економічну ефективність виробництва і знизити собівартість сучасних матеріалів. Навіть часткова заміна природних сировинних матеріалів відходами виробництв може дати значний економічний ефект. Тому розроблення теоретичних основ модифікації будівельних матеріалів за рахунок реалізації ефективної дії вторинних продуктів виробництва є актуальним завданням.

Постановка проблеми. Вирішення проблеми утилізації промислових відходів має велике науково-практичне значення, що дасть змогу здобути нові відомості про структуру і властивості модифікованих будівельних матеріалів, дозволить розширити сировинну базу і сприятиме екологічному оздоровленню навколишнього середовища. До вторинних продуктів виробництва належать великотоннажні відходи збагачення залізистих кварцитів гірничо-збагачувальних комбінатів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У процесі виробничого технологічного циклу на гірничо-збагачувальних і перероблювальних підприємствах України утворюється щороку близько 600 млн м³ (або понад 1 млрд т) мінерально-сировинних відходів, у тому числі 75-80 млн м³ відходів збагачення [1]. За різними оцінками, у хвостосховищах гірничо-збагачувальних комбінатів Криворізького залізородного басейну, який є одним із найбільших гірничодобувних регіонів світу, міститься до 6 млрд т відходів збагачення бідних залізних руд [2], які використовують незначною мірою [3].

Розроблення технологічних рішень щодо переробки й використання тонкодисперсних хвостів здійснюється (переважно) за двома напрямками [4]:

1) дозбагачення з метою додаткового вилучення залізовмісних мінералів і виробництва додаткової кількості концентрату;

2) виготовлення будівельних матеріалів і закладних сумішей для заповнення техногенних пустот при підземній розробці корисних копалин.

Нині в Україні відомо лише два проекти, де дозбагачуються відходи залізистих кварцитів: переробка лежалих пісків шламсховища Центрального гірничо-збагачувального комбінату (м. Кривий Ріг) і виробництво концентрату з хвостів на потужностях дослідно-промислового комплексу «Жовті води» (Дніпропетровська область) [4].

Відходи мокрої магнітної сепарації застосовують (обмежено) для виробництва будівельних матеріалів.

Порошкоподібні відходи збагачення залізистих кварцитів (вміст фракції менше $71 \cdot 10^{-6}$ м не менше ніж 60 %) у глиняній масі є не лише спіснювальною добавкою, а й підвищують спіклькість черепка керамічної цегли, а також її міцність до марки не менше М150 та морозостійкість з F15 до F50 [5].

Хвости збагачення можуть бути використані як сировина для виробництва скла (чистий кварцовий пісок є важливим стратегічним компонентом у скляній промисловості) [4].

Відходи збагачення залізних руд при активації їх вапном і цементом дозволяють одержати композиційні в'язучі міцністю до 10 МПа. При активізації силікатами натрію – до 40 МПа, а при активації силікатами натрію і техногенним склом – до 60 МПа. Роль в'язучого в таких матеріалах виконують активатори тверднення, дисперсні складові хвостів і продукти окислення сульфідів [6].

Під час підземної розробки залізної руди в надрах землі утворюються техногенні пустоти – камери, кожна об'ємом 50-120 м³. Закладення виробленого простору твердіючими сумішами не лише дозволить залишати в *цїликах* мінімальну кількість корисної копалини, але й поліпшить екологічну ситуацію залізородного регіону, якщо в їхніх складах застосовувати техногенні відходи. *Цїлики* – частини пластів корисних копалин, які не витягнуто з надр землі або такі, що тимчасово не видобуваються під час розробки родовища. Найвищі значення міцності на стиск у віці 7 діб та 28 діб мала закладна суміш на композиційному в'язучому з використанням цементу (40 % за масою), відходів збагачення залізистих кварцитів (30 % за масою), доменного гранульованого шлаку (30 % за масою) та пластифікатора (0,7 % від маси цементу) – 16,1 МПа і 30,1 МПа відповідно [7].

За водоцементного відношення В/Ц = 0,23 водопоглинання за масою бетону становить 2,5 %. Стираність на лабораторному колі ЛКС становить до 7,4 кг/м². Міцність на стиск зростає до 69,5 МПа. Після 30 і 45 циклів заморожування-відтавання (що є еквівалентним морозостійкості F150 та F200 відповідно) зовнішніх ознак руйнування бетону не виявлено [8]. Склад дрібнозернистої бетонної суміші для виготовлення тротуарної плитки такий: портландцемент М500, відходи збагачення мокрої магнітної сепарації залізистих кварцитів, відсів гранітної фракції 2,5-0,16 мм, добавка – суперпластифікатор С-3 [8].

Зі збільшенням крупності кварцово-залізистого піску (хвостів збагачення) водоспоживання цементного бетону зменшується. Витрата цементу на одиницю міцності бетону на збагачених відходах менша, ніж на природному кварцовому піску аналогічного складу [9]. При тужавленні за природних умов бетону на збагачених відходах питома витрата цементу становить 85-95 % від питомої витрати цементу в бетоні на природному піску; після термовологісної обробки – 74-93 %. Застосування класифікованих відходів дозволяє економити 50-100 кг цементу на 1 м³ бетону порівняно з дрібнозернистими природними пісками. Опір розтягненню бетону на заповнювачі з відходів гірничо-збагачувальних комбінатів на 30 % більший, ніж бетону на заповнювачі з піску [9].

Легкі бетони на актипорориті (штучному пористому заповнювачі на основі техногенних відходів збагачення залізистих кварцитів зі хвостосховищ Кривбасу) в порівнянні з керамзитобетоном мають більшу частку умовно закритих пор при більшому значенні загальної пористості. Тому і водопоглинання актипороритобетону на 19-20 % менше, ніж керамзитобетону [10]. Витрати цементу у складах таких легких бетонів класів міцності В3,5 – В7,5 менші за нормативні на 50-60 %. Морозостійкість конструкційно-теплоізоляційного легкого бетону на актипорориті коливається від F35 до F150. Коефіцієнт теплопровідності актипороритобетону на 15-20 % менший, ніж для керамзитобетону. Такий матеріал має істотні переваги в застосуванні в житловому будівництві [10].

Несуча здатність залізобетонних конструкцій із бетонів на хвостах на 10-12 % вища за розрахункову несучу здатність залізобетонних елементів. Для залізобетонних балок на бетоні з використанням відходів збагачення залізистих кварцитів (порівняно з бетоном

на кварцовому піску): руйнівний згинальний момент на 15,3 % вищий; момент утворення тріщин на 20 % вищий; ширина розкриття тріщин в елементах на 27 % менша, прогини балок на 20 % менші, зчеплення з арматурою на 15-20 % краще [9; 11].

Хвости збагачення можна використовувати у виробництві щільних і поризованих силікатних матеріалів гідротермального тверднення як альтернативу природному кварцовому піску, запаси якого є небезмежні [4].

При неповній заміні річкового піску рядовими (всі фракції) хвостами збагачення залізистих кварцитів (а лише частковій з добавкою поліспирту), можна досягти значного підвищення міцності будівельних розчинів [6].

Водопоглинання дрібнозернистого бетону на основі відходів мокрої магнітної сепарації (ММС) залізистих кварцитів в укріплених основах автомобільних доріг методом укочення з використанням тонкомеленого цементу й суперпластифікатора С-3 майже у 2,2 раза менше, ніж бетону на портландцементі. Межа міцності на стиск становить 6,2 МПа. Витрата клінкерної складової знижується майже вдвічі за одночасного підвищення якості такого бетону. Загальний вміст відходів ММС залізистих кварцитів досягає 1850 кг на 1 м³ бетону [12].

Коефіцієнт адгезійної стійкості бітуму нафтового дорожнього (за методом адсорбції барвника) до відходів ММС залізистих кварцитів значно вищий, ніж такий до кварцового піску (0,89 проти 0,72). Міцності на стиск асфальтобетону на мінеральному порошку з відходів ММС залізистих кварцитів при температурах 50 °С і 20 °С вищі, ніж на кварцовому піску (1,85 МПа проти 1,40 МПа та 5,15 МПа проти 4,00 МПа відповідно); а при температурі 0 °С навпаки – міцність менша (9,9 МПа проти 10,2 МПа), що свідчить про вищу деформативність асфальтобетону на хвостах збагачення порівняно з асфальтобетоном на кварцовому піску [13].

Із хвостів збагачення залізистих кварцитів можна одержати дешевий пігмент з різною кольоровою гамою і використовувати як товари народного споживання, наприклад, у побілках, шпаклівках, лакофарбових матеріалах, для фарбування цементу, силікатної цегли, бетонів, як пігменти-наповнювачі при виробництві лінолеуму, кольорового асфальтобетону тощо. Утворювана плівка хромоформу (гетит FeOОН) на поверхні частинок SiO₂ настільки міцна, що не змивається водою, не розчинюється в кислотах, світло- і термостійка. Термостійкість, визначена як втрата за масою після прожарювання при 1200 °С впродовж двох годин, становить 0,098 %. Кислотостійкість, визначена як втрата маси під час обробки 1 г пігменту, наприклад, 75 % H₂SO₄, дорівнює 0,0023 % [14].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Відсутні дослідження впливу гранулометричного складу відходів мокрої магнітної сепарації залізних руд гірничо-збагачувальних комбінатів Кривбасу на фізико-механічні властивості газобетону автоклавного тверднення з їх використанням.

Постановка завдання. Метою роботи є встановлення нових і уточнення існуючих закономірностей зміни активності взаємодії відходів збагачення залізистих кварцитів ПрАТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат» та ПрАТ «Інгулецький гірничо-збагачувальний комбінат» з в'язучими речовинами газобетону автоклавного тверднення на їх основі.

Виклад основного матеріалу. На всіх гірничо-збагачувальних комбінатах способи збагачення залізних руд принципово однакові. За допомогою магнітної сепарації з послідовно подрібнюваної залізної руди видаляється порода, залишаючи максимальний відсоток заліза. При збагаченні залізистих кварцитів методом мокрої магнітної сепарації виділяється велика кількість дрібнодисперсних відходів. Вони являють собою суспензію твердих частинок у воді й поділяються на відходи поточного виходу, які після збагачення руди не викинуто у відстійники, і хвости, що направляються у вигляді пульпи гідротранспортом у сховища, де відбувається осадження твердих частинок [9].

Для приготування газобетонної суміші використовували такі матеріали, як кремнеземистий компонент – відходи збагачення залізистих кварцитів (хвости), портландцемент М500, вапно кальцієве комове негашене, газоутворювач – пудра алюмінієва ПАП-1 (пігментна), поверхнево-активна речовина – сульфанол; вода відповідала вимогам ДСТУ Б В.2.7-273:2011.

Вапняно-кремнеземисте в'язуче готували в лабораторному млині сумісним помелом вапна та відходів збагачення у співвідношенні 1:1, активність якого визначали за [15]. Підбір і розрахунок газобетону проводили для марки D600 за середньою густиною (згідно з [16]) і коригували на основі характеристик бетону, виготовленого при пробних замісах. Оптимальним є склад ніздрюватого бетону (газобетону) заданої марки за середньою густиною, що забезпечує необхідний клас бетону за міцністю і марку за морозостійкістю при мінімальній витраті в'язучих. Відношення маси кремнеземистого компонента до в'язучого (цемент, вапно) приймали відповідно до табл. 2 [16].

Алюмінієву суспензію готували в змішувачі шляхом безперервного перемішування алюмінієвої пудри, поверхнево-активної речовини й води. Витрати алюмінієвої пудри (0,08-0,1 % від витрати сухих компонентів), сульфанола (4 % від маси алюмінієвої пудри) та співвідношення вміст алюмінієвої пудри: вода (1:6) відповідали вимогам [16]. Газобетонну суміш готували в лабораторному змішувачі, перемішуючи компоненти впродовж 2-3 хвилин при водотвердому відношенні В/Т = 0,50-0,52. Текучість газобетонної суміші визначали за діаметром розпливу конуса на вискозиметрі Суттарда [17] за методикою [18].

Температура газобетонної суміші на цементно-вапняному в'язучому в момент вивантаження у форму (при ударному способі формування) відповідала вимогам [16] і становила 40 °С. Формували зразки-куби з ребром 0,07 м, які при досягненні необхідної пластичної міцності сирцю піддавали автоклавній обробці за режимом: прогрів та підйом тиску пари до 1 МПа – 3 години; витримання при тиску пари 1 МПа – 6 годин; зниження тиску пари – 2 години (загальна тривалість автоклавної обробки – 11 годин). Перед випробуванням зразків-кубів 0,07×0,07×0,07 м на середню густину в сухому стані та міцність на стиск їх висушували в електрошафі за температури (105±10) °С до постійної маси (п. 3.1.13 [19]).

Дослідження відходів гірничо-збагачувальних комбінатів Кривбасу за стадіями їх збагачення

Методом сухого розсіву на лабораторних ситах з діаметрами отворів від 3,0 мм до 0,05 мм визначено гранулометричні склади відходів збагачення залізистих кварцитів за стадіями збагачення (табл. 1–5).

Таблиця 1. Гранулометричний склад відходів збагачення залізистих кварцитів (часткові залишки на ситах, %) 1-10 секцій РЗФ*-1 ПівдГЗК

Назва продукту	Класи крупності*, мм						
	-3,0 +1,0	-1,0 +0,5	-0,5 +0,25	-0,25 +0,16	-0,16 +0,071	-0,071 +0,05	-0,05
Хвости I стадія, I прийом	0,3	3,0	8,6	11,2	5,7	7,2	84,0
Хвости I стадія, II прийом	0,1	4,1	11,2	7,6	7,8	5,6	63,6
Хвости II стадія	-	1,2	8,6	15,8	6,8	5,1	62,5
Хвости III стадія, I прийом	-	0,2	1,4	15,2	13,4	11,4	58,4
Хвости III стадія, II прийом	-	0,3	1,6	14,8	13,5	12,0	57,8
Хвости IV стадія	-	-	0,2	0,8	7,6	8,2	83,2
Злив дешламатора, I прийом	-	-	0,2	0,3	0,4	2,4	95,7
Злив дешламатора, II прийом	-	-	-	0,2	0,4	0,6	98,8
Хвости загальні	0,1	1,3	6,3	8,1	6,0	8,1	70,1

Примітки: *РЗФ – рудозбагачувальна фабрика;

**класи крупності – це продукти з точно визначеними розмірами зерен, які позначають зі знаком плюс "+" або мінус "-", а також двома числовими показниками, що означають мінімальний і максимальний розміри зерен у цьому класі [20]. Матеріал, що пройшов через отвори сита, позначають зі знаком "-"; матеріал, що залишився на ситі, позначають зі знаком "+".

Таблиця 2. Гранулометричний склад відходів збагачення залізістих кварцитів (часткові залишки на ситах, %) 1-4 секцій РЗФ*-2 ПівдГЗК

Назва продукту	Класи крупності**, мм						
	-3,0 +1,0	-1,0 +0,5	-0,5 +0,25	-0,25 +0,16	-0,16 +0,071	-0,071 +0,05	-0,05
Хвости I стадія, I прийом	0,9	2,4	7,3	11,0	8,3	6,1	64,0
Хвости I стадія, II прийом	0,5	2,7	6,1	13,0	10,2	5,5	62,0
Хвости II стадія	-	2,8	10,9	16,0	19,0	6,3	45,0
Хвости III стадія, I прийом	-	0,1	2,8	14,2	11,9	9,0	62,0
Хвости III стадія, II прийом	-	0,1	3,0	15,0	12,9	8,0	61,0
Хвости IV стадія	-	-	0,2	1,4	7,1	13,8	77,5
Злив дешламатора, I прийом	-	-	0,2	1,0	2,9	7,9	88,0
Злив дешламатора, II прийом	-	-	-	0,2	0,4	0,4	94,0
Хвости загальні	0,5	1,5	5,4	12,1	9,5	8,2	62,8

Таблиця 3. Гранулометричний склад відходів збагачення залізістих кварцитів (часткові залишки на ситах, %) 5-10 секцій РЗФ*-2 ПівдГЗК

Назва продукту	Класи крупності**, мм						
	-3,0 +1,0	-1,0 +0,5	-0,5 +0,25	-0,25 +0,16	-0,16 +0,071	-0,071 +0,05	-0,05
Хвости I стадія, I прийом	0,1	2,4	12,7	9,4	5,3	6,3	63,9
Хвости I стадія, II прийом	0,1	3,1	12,1	7,4	4,5	5,1	67,8
Хвости II стадія	-	0,8	8,6	11,3	7,0	7,4	64,9
Хвости III стадія, I прийом	-	0,1	3,0	14,9	11,6	11,6	58,9
Хвости III стадія, II прийом	-	0,2	4,3	18,3	12,4	11,2	53,6
Хвости IV стадія	-	0,1	1,0	8,4	8,8	9,7	72,0
Хвости V стадія	-	-	0,2	2,9	9,0	13,1	74,8
Злив дешламатора, I прийом	-	0,1	0,3	0,4	0,9	5,6	92,7
Злив дешламатора, II прийом	-	-	0,2	0,8	1,2	5,0	92,8
Хвости загальні	0,1	1,5	7,5	8,2	6,2	7,7	68,8

Встановлено, що поточні відходи збагачення на Південному ГЗК представлені (у відсотках за масою) на 0,2-15,4 % фракцією розміром >0,25 мм; на 0,2-18,3 % – фракцією 0,25-0,16 мм; на 0,4-19,0 % – 0,16-0,071 мм; на 51,33 % – розміром <0,071 мм; на 45,0-98,8 % – розміром <0,05 мм (табл. 1-3).

Хвости на Інгулецькому ГЗК мають такий гранулометричний склад (у відсотках за масою): частинок розміром >0,25 мм – 0,1-5,2 %; частинок фракції 0,25-0,16 мм – 0,1-11,0 %; частинок фракції 0,16-0,071 мм – 0,4-20,2 %; частинок розміром <0,071 мм – 61,7-98,6 %; частинок розміром <0,05 мм – 53,6-95,6 % (табл. 4, 5).

Таблиця 4. Гранулометричний склад відходів збагачення залізістих кварцитів (часткові залишки на ситах, %) РЗФ*-1 ІнГЗК

Назва продукту	Класи крупності**, мм						
	+1,0	-1,0 +0,56	-0,56 +0,25	-0,25 +0,16	-0,16 +0,071	-0,071 +0,05	-0,05
Хвости I стадія, I прийом	0,8	2,6	13,0	8,0	10,0	6,1	59,5
Хвости I стадія, II прийом	0,6	3,0	11,2	2,6	9,9	5,4	62,3
Хвости II стадія	-	1,2	8,5	11,0	17,6	8,1	53,6
Хвости III стадія, I прийом	-	0,5	1,0	8,0	19,6	13,0	57,9
Хвости III стадія, II прийом	-	0,1	0,6	7,1	20,2	12,6	59,4
Хвости IV стадія	-	0,1	0,2	1,3	8,5	10,0	79,9
Хвости V стадія, I прийом	-	-	-	0,4	2,7	5,3	91,6
Хвости V стадія, II прийом	-	-	-	0,1	1,9	5,0	93,0
Злив дешламатора, I прийом	-	0,1	0,1	0,1	1,8	9,0	88,9
Злив дешламатора, II прийом	-	-	0,1	0,1	1,6	4,2	94,0
Хвости загальні	2,8	0,6	1,8	2,8	6,7	8,9	77,1

Таблиця 5. Гранулометричний склад відходів збагачення залізистих кварцитів (часткові залишки на ситах, %) РЗФ* - 2 ІнГЗК

Назва продукту	Класи крупності**, мм					
	+0,56	-0,56 +0,25	-0,25 +0,16	-0,16 +0,071	-0,071 +0,05	-0,05
Хвости I стадія, I прийом	0,6	4,7	4,2	8,1	8,0	74,4
Хвости I стадія, II прийом	0,6	4,6	5,0	8,2	7,0	74,6
Хвости II стадія	0,1	0,5	1,4	3,0	5,4	89,6
Хвости III стадія, I прийом	-	0,1	0,5	3,8	8,0	87,6
Хвости III стадія, II прийом	-	0,2	0,2	2,2	8,0	91,4
Хвости III стадія, III прийом	-	0,1	0,2	1,1	3,0	95,6
Злив дешламатора	-	0,1	0,1	0,4	1,8	92,6
Хвости загальні	0,4	1,7	2,7	7,3	7,2	80,7

Таким чином, відходи збагачення залізистих кварцитів на Південному ГЗК крупніші за такі на Інгулецькому ГЗК. Починаючи з фракції 0,16-0,071 мм, кількість частинок якої на обох комбінатах є однаковою (0,4-19,0 % і 0,4-20,2 % відповідно), частка зерен розміром <0,071 мм та <0,05 мм на Інгулецькому ГЗК на 10 % більша. Розподіл матеріалу за фракціями визначений мінеральним складом, розміром зерен та характером зростків магнетиту з іншими нерудними мінералами у вихідних залізистих кварцитах, а також ступенем подрібнення мінеральної сировини на збагачувальних фабриках [21].

Спостерігається чітка закономірність: чим пізніша стадія збагачення, тим суттєво вищий відсоток частинок хвостів найдрібнішого розміру (<0,05 мм) у пробах обох гірничо-збагачувальних комбінатів (табл. 1–5). Максимальна кількість зерен найдрібнішого розміру (<0,05 мм) міститься у хвостах останньої стадії збагачення і коливається від 95,6 % (табл. 5) в пробах Інгулецького ГЗК до 74,8 % (табл. 3) в пробах Південного ГЗК.

Розроблення складу газобетону на основі хвостів збагачення Південного та Інгулецького гірничо-збагачувальних комбінатів

Питома поверхня вапняно-кремнеземистого в'язучого (що визначена на приладі системи Ходакова ПСХ-2 за методикою [22]) становила 510 м²/кг. Його активність (відповідно до [15]) дорівнювала 38 %.

Портландцемент прийнято марки М500 з питомою поверхнею 320 м²/кг; строки тужавлення (згідно з ДСТУ Б В.2.7-185:2009): початок тужавлення – 3 год 20 хв, кінець тужавлення – 5 год 05 хв.

Активність вапна кальцієвого комового негашеного становила 76 % (вапно III сорту [15]); час гашення – 15 хв (вид вапна за тривалістю гашення – середнього гашення; індекс часу гашення – Б).

Текучість газобетонної суміші, що визначена на віскозиметрі Сутгарда [17; 18] при ударному способі формування становила 170 мм для марки ніздрюватого бетону за середньою густиною D600 відповідно до [16].

Склади сировинних сумішей (розраховані за методикою [16] і кориговані пробними замісами) та вологість газобетону з використанням відходів збагачення залізистих кварцитів наведено в табл. 6, 7.

Як показано в табл. 6, 7, витрати компонентів на 1 м³ газобетонної суміші майже однакові. Оскільки крупність відходів Інгулецького ГЗК менша, ніж таких Південного ГЗК (кількість частинок <0,071 мм дорівнює 61,7-98,6 % проти 51,3-99,4 % відповідно (табл. 1–5), то на цих відходах утворено більше новоутворень (гідросилікатів 2CaO·SiO₂·nH₂O, гідроалюмінатів 3CaO·Al₂O₃·6H₂O, гідроферитів 4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃·4·nH₂O кальцію тощо) з більшою кількістю хімічно залученої води. Отже, незв'язаної води в бетонах на відходах Інгулецького ГЗК залишилось менше порівняно з Південним ГЗК. Тому вологість газобетону на хвостах Південного ГЗК більша за таку бетону на хвостах Інгулецького ГЗК (у середньому на 4,4 %).

Таблиця 6. Склади сировинних сумішей і вологість газобетону на основі хвостів Південного ГЗК

№ з/п	Витрати компонентів, кг на 1 м ³ газобетонної суміші			Водотверде відношення, В/Т	Вологість газобетону, % за масою
	вапно	портландцемент	відходи збагачення		
1	131	110	369	0,5	29
2	136	113	382	0,5	29
3	127	106	357	0,5	28
4	125	105	352	0,52	30
5	129	108	364	0,52	31

Таблиця 7. Склади сировинних сумішей і вологість газобетону на основі хвостів Інгулецького ГЗК

№ з/п	Витрати компонентів, кг на 1 м ³ газобетонної суміші			Водотверде відношення, В/Т	Вологість газобетону, % за масою
	вапно	портландцемент	відходи збагачення		
1	128	107	375	0,5	24
2	132	110	388	0,5	21
3	122	102	357	0,51	24
4	124	105	355	0,5	25
5	133	84	393	0,5	31

Середня густина досліджуваних газобетонів із використанням хвостів ГЗК Кривбасу становила від 580 до 630 кг/м³ (рис. 1).

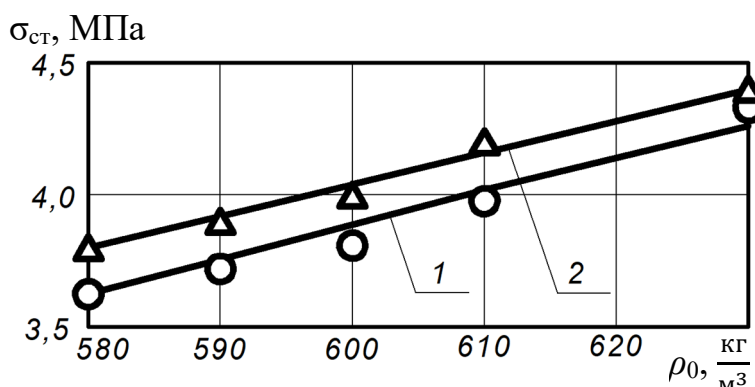


Рис. 1. Залежність міцності на стиск газобетону $\sigma_{ст}$ від середньої густини газобетону ρ_0 на основі хвостів:
1 – Південний ГЗК; 2 – Інгулецький ГЗК

Згідно з [23, табл. 1] такий бетон належить до марки D600 за середньою густиною. Міцність на стиск цих бетонів змінювалась від 3,65 МПа до 4,40 МПа (рис. 1). Відповідно до [23, табл. 2 зміни № 2] такий бетон відноситься до класу С 2,5; С 3,5 за міцністю на стиск і належить до теплоізоляційно-конструкційного виду [23, табл. 3].

Фізико-механічні властивості бетону в значній мірі залежать від міцності зчеплення цементного каменя з поверхнею заповнювачів і наповнювачів [24], а також від розміру їхніх частинок [25]. Реальна поверхня твердої речовини завжди біфункціональна, оскільки є сукупністю центрів Бренстеда та Льюїса як *основного*, так і *кислотного* типу [26].

Згідно з визначенням Бренстеда, *кислотою* називають речовину, яка є донором протона. Речовина, яка є акцептором протона, називається *основою* (тобто головна ознака кислоти – присутність протона в її молекулі). Льюїс визначив кислоту як речовину, яка для формування сталої електронної оболонки здатна акцептувати вільну пару електронів іншої молекули. Основа, за Льюїсом, – це речовина, яка, маючи вільну пару електронів, може стати їх донором для утворення стійкої електронної конфігурації іншого атома. Таким чином, кислоти й основи Льюїса можуть не містити протонів, тобто бути апротонними [26].

Отже, основи Бренстеда і Льюїса – це ті самі частинки й молекули. Однак основність за Бренстедом – це здатність приєднувати лише протон, у той час як основність за Льюїсом – поняття більш широке й означає здатність до взаємодії з будь-якою частинкою, що має низько лежачу вільну орбіталь [26].

Відповідно до [24], іони поверхні кремнезему є і кислотними внаслідок наявності вільних орбіталей (кремній), і основними, маючи донорні властивості (кисень) центрів Льюїса. При гідроксилуванні поверхні кремнезему на ній з'являються протонодонорні і протоноакцепторні центри Бренстеда.

Кількісно силу кислот і основ оцінюють константою протолітичних (реакція передачі протона від кислоти до основи) рівноваг (pK_a), що визначають експериментально, і яка являє собою від'ємний десятковий логарифм добутку молярних концентрацій іонів води $[H^+]\cdot[OH^-]$ (p – початкова літера німецького слова *potenz* – показник математичного ступеня; індекс a – *acid*, кислота).

Міцність бетону підвищується зі збільшенням вмісту бренстедівських кислотних центрів ($pK_a = 0-7$) і льюїсівських основних центрів ($pK_a = -4,4-7$). Зі зростанням вмісту з pK_a від -4,4 до 7 поліпшуються механічні показники композитів та підвищується ступінь гідратації цементу. Наповнювачі, що мають центри достатньої інтенсивності в областях з $pK_a =$ від 4,4 до 7 і понад 13, здатні каталітично активувати гідратацію в'язучого. Акцепторні властивості поверхні твердих фаз з $pK_a > 13$ сприяють підвищенню пластичної міцності цементу (а, значить, і бетону). З підвищенням дисперсності заповнювача збільшується вміст льюїсівських основних і сумарних центрів [24]. Це пояснює зростання міцності композитів зі зменшенням розміру частинок матеріалу, а також прогнозує підвищення ступеня гідратації в'язучого.

Відходи збагачення залістистих кварцитів на Інгулецькому ГЗК дрібніші за такі на Південному ГЗК (табл. 1–5). Тому і міцність газобетону з використанням хвостів Інгулецького ГЗК вища за таку на хвостах Південного ГЗК (рис. 1).

На міцність газобетону також впливає розчинність кремнезему, яка природно є низька. У технології автоклавних матеріалів велике значення має крупність кремнеземистого компонента – чим він дрібніший (вище його питома поверхня), тим більше кремнезему переходить у розчин для сполучення з вапном і тим більше створюється новоутворень під час автоклавної обробки. Халцедоновидна, реакціонометаморфозована, а також частково динамометаморфічна генерація кварцу відходів мокрої магнітної сепарації залістистих кварцитів інтенсивно зв'язує гідроксид кальцію в дрібнокристалічні нерозчинні гідросилікати кальцію, що сприяє зменшенню кількості дефектів, зниженню кристалізаційного тиску і оптимізації структури матеріалу.

Висновки. Відходи збагачення залістистих кварцитів на Південному ГЗК крупніші за такі ж на Інгулецькому ГЗК.

Вологість газобетону (в середньому) на хвостах Південного ГЗК на 4,4 % більша за таку ж вологість бетону на хвостах Інгулецького ГЗК.

Згідно з ДСТУ Б В.2.7-45:2010 досліджуваний газобетон відноситься до марки D600 за середньою густиною, а відповідно до Зміни 2 ДСТУ Б В.2.7-45:2010 – до класів C 2,5; C3,5 за міцністю на стиск і належить до теплоізоляційно-конструкційного виду.

Вироби, виготовлені на основі відходів збагачення залістистих кварцитів, відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.7-45:2010 «Бетони ніздруваті. Загальні технічні умови» та ДСТУ Б В.2.7-137:2008 «Блоки з ніздруватого бетону стінові дрібні. Технічні умови».

Екологічна ефективність виробництва відходів збагачення залістистих кварцитів гірничо-збагачувальних комбінатів сприяє ліквідації хвостосховищ і вивільнює площі кори-

сних земель (тим самим знижуючи навантаження на природне середовище в залізорудних регіонах). Перевагами використання хвостів є: можливість їх утилізації у виробництві газобетонів; низька вартість матеріалів на основі цих відходів.

Подальша робота буде присвячена практичному впровадженню результатів наукових досліджень у виробництво.

Список використаних джерел

1. Перспективы вовлечения техногенных месторождений (на примере Украины и Грузии) / Копач П. И. и др. *Екологія і природокористування*. 2013. Вип. 16. С. 210-218.
2. Перегудов В. В., Григор'єв І. Є., Григор'єв Ю. І. Дослідження взаємозв'язків параметрів техногенних родовищ насипного типу. *Гірничий вісник*. 2019. Вип. 105. С. 29-34.
3. Єфіменко В. І., Єфіменко В. В., Ягодкіна О. О. Аналіз доцільності комплексного використання відходів гірничо-видобувних підприємств на виробництво нерудних будівельних матеріалів. *Вісник Криворізького національного університету*. 2014. Вип. 36. С. 159-165.
4. Соколова В. П., Учитель А. Д. Переработка шламовых отходов обогащения железной руды. *Збагачення корисних копалин*. 2017. Вип. 66(107). С. 3-12.
5. Ермолович Е. А. Технология переработки отходов обогащения железных руд как способ борьбы с источником негативного экологического воздействия. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2009. № 12. Т. 12. С. 375-379.
6. Шишкин А. А., Шишкина А. А., Щерба В. В. Особенности использования отходов горно-обогатительных комбинатов в производстве строительных материалов. *Вісник Донбаської національної академії будівництва та архітектури*. 2013. Вип. 1(99). С. 8-12.
7. Закладочные смеси / Агеева М. С. и др. *Modern problems and ways of their solution in science, transport, production and education, SWorld-2014*. URL: <http://www.sworld.com.ua/index.php/conference/the-content-of-conferences/archives-of-individual-conferences/2014>.
8. Ермолович Е.А. Утилизация отходов обогащения железистых кварцитов в мелкозернистой бетонной смеси для тротуарной плитки. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2013. № 8. С. 23-25.
9. Використання гірничорудної промисловості у промисловому, цивільному та транспортному будівництві / Валовой О.І. та ін. *Гірничий вісник*. 2020. Вип. 107. С. 142-147.
10. Коверніченко Л.М., Хільченко О.П. Бетони на штучному пористому заповнювачі – актипорориті із техногенних відходів промислових підприємств Кривого рогу. *Гірничий вісник*. 2019. Вип. 105. С. 118-122.
11. Валовой О. І., Єрмоменко О. Ю., Валовой М. О. Корозійна стійкість бетонів на заповнювачах з відходів металургійної промисловості. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць*. Рівне, 2016. Вип. 32. С. 15-22.
12. Лесовик Р. В. Техногенный песок в дорожном строительстве. *Строительные материалы*. 2009. № 12. С. 48-50.
13. Ядыкина В. В. Повышение эффективности асфальто- и цементобетонов на основе техногенного сырья. *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2004. № 1. С. 45-47.
14. Тарасова Г. И., Свергузова Ж. А. Разработка способа утилизации хвостов обогащения железистых кварцитов. URL: <http://conf.bstu.ru/conf/docs/0011/0222.doc>.
15. ДСТУ Б В.2.7-90:2011. Вапно будівельне. Технічні умови. [Чинний від 01.10.2012]. Київ : Мінбуд України, 2012. 26 с.
16. ДСТУ-НБ В.2.7-308:2015. Настанова з виготовлення виробів з ніздрюватого бетону. [Чинний від 01.10.2016]. Київ : Мінбуд України, 2016. 52 с.
17. Дворкін Л. Й., Житковський В. В. Технологія опоряджувальних, теплоізоляційних та гідроізоляційних матеріалів: навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2010, 227 с.
18. ДСТУ Б В.2.7-82:2010. В'язучі гіпсові. Технічні умови. [Чинний від 01.03.2011]. Київ : Мінбуд України, 2011. 29 с.
19. ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання і водонепроникності. [Чинний від 01.07.2009]. Київ : Мінбуд України, 2009. 36 с.

20. Кравець В. Г., Білецький В. С., Смирнов В. О. Техніка і технологія збагачення корисних копалин. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 286 с.
21. Губіна В. Г., Заборовський В. С. Особливості речовинного складу відходів збагачення залізистих кварцитів. *Геохімія та рудоутворення*. 2015. Вип. 35. С. 56-62.
22. Дворкін Л. Й., Скрипник І. Г. Фізико-хімічні і фізичні методи досліджень будівельних матеріалів : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2006. 220 с.
23. ДСТУ Б В.2.7-45:2010. Бетони ніздрюваті. Загальні технічні умови. [Чинний від 01.11.2010]. Київ : Мінбуд України, 2010. 45 с. (зі Зміною № 2 від 14.06.2016. [Чинна від 01.01.2017]. Київ: Мінбуд України, 2017. 4 с.).
24. Шангина Н. Н. Прогнозирование физико-механических характеристик бетонов с учетом донорно-акцепторных свойств поверхности наполнителей и заполнителей : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05 / Петербургский государственный университет путей сообщения. Санкт-Петербург, 1998. 372 с.
25. Нечипоренко А. П., Шевченко Г. К. Исследование влияния термообработки и дисперсности образца на кислотно-основные свойства поверхности кремнезема. *Журнал общей химии*. 1985. Т. 55. Вып. 2. С. 244-253.
26. Танабе К. Твердые кислоты и основания. Москва : Мир, 1973. 183 с.

References

1. Kopach, P. I., Yakubenko, L. V., Romanenko, V. N., Shmatkov, H. H., Chykhradze, N. M., Khomeryky, S. K., Mykhelson, R. V., Mataradze, E. D. (2013). Perspektivy вовлечeniya tehnogennykh mestorozhdenij (na primere Ukrainy i Gruzii) [Prospects for involving technogenic deposits (on the example of Ukraine and Georgia)]. *Ekolohiia i pryrodokorystuvannia – Ecology and nature management*, 16, pp. 210-218.
2. Pehudov, V. V., Hryhoriev, I. Ie., Hryhoriev, Yu. I. (2019). Doslidzhennia vzaiemozviazkiv parametriv tekhnogennykh rodovysheh nasypnoho typu [Research of interrelations of parameters of technogenic deposits of bulk type]. *Hirnychiy visnyk – Mining Bulletin*, 105, pp. 29-34.
3. Yefimenko, V. I., Efimenko, V. V., Yahodkina, O. O. (2014). Analiz dotsilnosti kompleksnoho vykorystannia vidkhodiv hirnycho-vydobuvnykh pidpriemstv na vyrobnytstvo nerudnykh budivelnykh materialiv [Analysis of the feasibility of integrated use of waste from mining enterprises for the production of non-metallic building materials]. *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu – Bulletin of Kryvyi Rih National University*, 36, pp. 159-165.
4. Sokolova, V. P., Uchitel, A. D. (2017). Pererabotka shlamovykh othodov obogashheniia zheleznoi rudy [Processing of sludge waste from iron ore dressing]. *Zbahachennia korysnykh kopalyn – Enrichment of minerals*, 66(107), pp. 3-12.
5. Ermolovich, E. A. (2009). Tehnologiiia pererabotki othodov obogashheniia zheleznykh rud kak sposob borby s istochnikom negativnoho ekologicheskogo vozdeistviia [Enrichment of minerals]. *Gornyi informacionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskij zhurnal) – Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 12(12), pp. 375-379.
6. Shishkin, A. A., Shishkina, A. A., Shherba, V. V. (2013). Osobennosti ispolzovaniia othodov gorno-obogatitelnykh kombinatov v proizvodstve stroitelnykh materialov [Features of the use of waste from mining and processing plants in the production of building materials]. *Visnyk Donbaskoi natsionalnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury – Bulletin of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 1(99), pp. 8-12.
7. Aheeva, M. S., Bohusevych, H. H., Sopyn, D. M., Bohusevych, V. A., Honcharov, R. S. (2014). *Zakladochnye smesi [Laying mixtures]. Modern problems and ways of their solution in science, transport, production and education, SWorld-2014.* <http://www.sworld.com.ua/index.php/conference/the-content-of-conferences/archives-of-individual-conferences>.
8. Ermolovich, E. A. (2013). Utilizaciya othodov obogashheniia zhelezistykh kvartsitov v melkozernistoi betonnoi smesi dlia trotuarnoi plitki [Utilization of waste of concentration of ferruginous quartzites in fine-grained concrete mixture for paving slabs]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskij zhurnal) – Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, (8), pp. 23-25.

9. Valovoi, O. I., Astakhov, V. I., Afanasiev, V. V., Valovoi, M. O., Yeremenko, O. Yu. (2020). Vykorystannia hirnychorudnoi promyslovosti u promyslovomu, tsyvilnomu ta transportnomu budivnytstvi [Use of the mining industry in industrial, civil and transport construction]. *Hirnychiy visnyk – Mining Bulletin*, 107, pp. 142-147.

10. Kovrnichenko, L. M., Khilchenko O. P. (2019). Betony na sztuchnomu porystomu zapovniuvachi – aktypororyti iz tekhnohennykh vidkhodiv promyslovykh pidpriemstv Kryvoho Rohu [Concretes on artificial porous aggregate – actipororites from technogenic wastes of the industrial enterprises of Krivoy Rog. *Hirnychiy visnyk – Mining Bulletin*, 105, pp. 118-122.

11. Valovoi, O. I., Ieromenko, O. Iu., Valovoi, M. O. (2016). Koroziiina stiikist betoniv na zapovniuvachakh z vidkhodiv metalurhiinoi promyslovosti [Corrosion resistance of concrete on aggregates from wastes of the metallurgical industry]. *Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy – Resource-saving materials, structures, buildings and structures*, 32, pp. 15-22.

12. Lesovik, R. V. (2009). Tehnogennyj pesok v dorozhnom stroitel'stve [Man-made sand in road construction]. *Stroitel'nye materialy – Construction Materials*, (12), pp. 48-50.

13. Iadykina, V. V. (2004). Povyshenie jeffektivnosti asfal'to- i cementobetonov na osnove tehnogenogo syr'ja [Increasing the efficiency of asphalt and cement concrete based on technogenic raw materials]. *Nauka i tehnika v dorozhnoi otrasli – Science and technology in the road industry*, (1), pp. 45-47.

14. Tarasova, G. I., Svergzuzova, Zh. A. *Razrabotka sposoba utilizacii hvostov obogashhenija zhelezistykh kvarcitolv [Development of a method for disposal of ferruginous quartzite dressing tailings]*. <http://conf.bstu.ru/conf/docs/0011/0222.doc>.

15. Minbud Ukrainy [Ministry of Construction of Ukraine]. (2012). *Vapno budivelne [Building lime]* (DSTU B V.2.7-90:2011).

16. Minbud Ukrainy [Ministry of Construction of Ukraine]. (2016). *Nastanova z vyhotovlennia vyrobiv z nizdriuvatoho betonu [Instructions for the manufacture of products from cellular concrete]* (DSTU-HB B.2.7-308:2015).

17. Dvorkin, L. I., Zhytkovskyi, V. V. (2010). *Tekhnolohiia oporiadzhuvalnykh, teploizoliatsiinykh ta hidroizoliatsiinykh materialiv [Technology of finishing, heat-insulating and waterproofing materials]*. NUVHP.

18. Minbud Ukrainy [Ministry of Construction of Ukraine]. (2011). *Viazhuchi hipsovi [Gypsum binders. Specifications]* (DSTU BB.2.7-82:2010).

19. Minbud Ukrainy [Ministry of Construction of Ukraine]. (2009). *Betony. Metody vyznachennia serednoi hustyny, volohosti, vodopohlynannia i vodonepronyknosti [Concrete. Methods for determining the average density, humidity, water absorption and water resistance]* (DSTU B V.2.7-170:2008).

20. Kravets, V. H., Biletskyi, V. S., Smyrnov, V. O. (2019). *Tekhnika i tekhnolohiia zbahachennia korysnykh kopalyn [Technique and technology of mineral beneficiation]*. KPI im. Ihoria Sikorskoho.

21. Hubina, V. H., Zaborovskyi, V. S. (2015). Osoblyvosti rehovynnoho skladu vidkhodiv zbahachennia zalizystykh kvartsytiv [Features of the material composition of iron quartzite enrichment waste]. *Heokhimiia ta rudoutvorenna – Geochemistry and ore formation*, 35, pp. 56-62.

22. Dvorkin, L. I., Skrypnyk, I. H. (2006). *Fyzyko-khimichni i fizychni metody doslidzhen budivelnykh materialiv [Physico-chemical and physical methods of research of building materials]*. NUVHP.

23. Minbud Ukrainy [Ministry of Construction of Ukraine]. (2017). *Betony nizdriuvati. Zahalni tekhnichni umovy [Aerated concrete. General technical conditions]* (DSTU B V.2.7-45:2010).

24. Shangina, N. N. (1998). *Prognozirovanie fiziko-mekhanicheskikh harakteristik betonov s uchetom donorno-akceptornykh svoystv poverhnosti napolnitelej i zapolnitelej [Prediction of the physical and mechanical characteristics of concretes, taking into account the donor-acceptor properties of the surface of fillers and aggregates]* [Doctor's thesis, Petersburg State Transport University].

25. Nechiporenko, A. P., Shevchenko, G. K. (1985). Issledovanie vlijanija termoobrabotki i dispersnosti obrazca na kislotno-osnovnye svoystva poverhnosti kremnezema [Investigation of the effect of heat treatment and sample dispersion on the acid-base properties of the silica surface]. *Zhurnal obshhej himii – Journal of General Chemistry*, 55(2), pp. 244-253.

26. Tanabe, K. (1973). *Tverdye kisloty i osnovaniya [Solid acids and bases]*. Mir.

UDC 624:622.012

Yaroslav Liashok, Serhii Podkopaiev, Oleksii Povzun,
Valerii Kalynychenko, Kyrylo Demenko

CONSTRUCTION MATERIAL BASED ON THE MINING PRODUCTION WASTE

Creating of effective process for treatment and usage of industrial materials, which will enable a derivation of operative construction materials for different industry fields, is an actual task. Industrial material usually requires a cost-effective treatment and complex evaluation using progressive methods and technologies that ensure its overall usage with maximal protection of the environment.

The ferric quartz rock refuse (tailings) of mining complexes is marginally used in the raw mixes for production of ceramic bricks, compositional binders, embedding massifs for filling-in of mined-out underground space (caves) of mining, cement-concrete mix, artificial porous filler – actipororite, fine-grain concrete mixture for construction of highway foundations, hydrocarbon concrete mixtures for arrangement of the top structure layers of the road coating, and as loading pigments in various materials as well.

The impact of the grain composition of waste resulting from the wet magnet separation of the iron stone from the mining complexes of Kryvbas on physical mechanical properties of the autoclaved aerated concrete is unresearched.

The mission is to see an existing logic and define a new one for change of the interactivity of ferric quartz washery refuse (from “Pivdenny mining complex” and “Inguletsky mining complex”) with binders of autoclaved aerated concrete on their basis.

The grain composition of tailings from the mining complexes of Kryvbas were defined by stages of their concentration; there was also defined the content of ferrum (total and magnetic one), together with hard weight fraction in them. The practicability of usage of the ferric quartz rock refuse (1st concentration stage) as a silicic component for aerated concrete mixtures has been proved. The researched aerated concrete corresponds to the requirements of Ukrainian national standards by its physical mechanical properties.

The ferric quartz washery refuse from Pivdenny mining complex is larger than those from Inguletsky mining complex. The maximal output of tailings is formed at the 1st stage of concentration. The tailings of Inguletsky mining complex have greater ferrum concentration than those of Pivdenny mining complex. Because of greater hard weight fraction in slurry tailings, it is reasonable to use the ferric quartz washery refuse of the 1st concentration stage for preparation of aerated concrete mixture – this will decrease the power consumption for densification and dehydration of the material.

Following the increase of magnetic intensity, the weight fraction of total iron and hard iron in the mine refuse get decreased. The lowest concentration of total iron is equal to 6 % (by mass), while the magnetic induction is 1,5 T. The weight fraction of the magnet iron at the same value of magnet induction is 0,2 %. Humidity of the aerated concrete (averagely) on the tailings of Pivdenny mining complex is 4,4 % more than that of Inguletsky mining complex. As per DSTU B V.2.7-45:2010, the researched aerated concrete is classified as grade D600 by medium density, while as per the Change 2 of DSTU B V.2.7-45:2010 – as class C2,5; C3,5 by the compressive strength and is classified as heat insulating structure type.

Ecological efficiency of the ferric quartz rock refuse industry of the mining complexes supports the tailings disposal and frees useful ground space (thus, decreasing the impacts on nature within the iron-oxide areas). The advantages of use of tailings are possibility of their utilization in the aerated concrete industry; low cost of materials based on these refuse.

Key words: aerated concrete; siliceous component; waste enrichment of ferrous quartzites.

Fig.: 1. Table: 7. References: 26.

Ляшок Ярослав Олександрович – доктор економічних наук, професор, ректор, Донецький національний технічний університет (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).

Liashok Yaroslav – Doctor of Economic Sciences, Professor, Rector, Donetsk National Technical University (2 Shibankova Sq., 85300 Pokrovsk, Ukraine).

SCOPUS Author ID: 57204864586

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7643-8485>

Web of Science: M-9725-2019

Подкопаяв Сергій Вікторович – доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи, Донецький національний технічний університет (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).

Podkopaiev Serhii – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector in Scientific work, Donetsk National Technical University (2 Shibankova Sq., 85300 Pokrovsk, Ukraine).

SCOPUS Author ID: 6602529316

Web of Science: B-7422-2019

Повзун Олександр Іванович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електромеханіки та машинобудування, Донецький національний технічний університет (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).

Povzun Oleksii – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Electrical Mechanics and Machine Building Department, Donetsk National Technical University (2 Shibankova Sq., 85300 Pokrovsk, Ukraine).

E-mail: povzun.aleksey@gmail.com

SCOPUS Author ID: 57215584638

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8183-9585>

Калниченко Валерій Вікторович – кандидат технічних наук, завідувач кафедри електромеханіки та машинобудування, Донецький національний технічний університет (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).

Kalynychenko Valerii – PhD in Technical Sciences, Head of Electrical Mechanics and Machine Building Department, Donetsk National Technical University (2 Shibankova Sq., 85300 Pokrovsk, Ukraine).

E-mail: valerii.kalynychenko@donntu.edu.ua

SCOPUS Author ID: 57215577915

Деменко Кирило Олександрович – магістрант факультету машинобудування, екології та хімічних технологій, Донецький національний технічний університет (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).

Demenko Kyrylo – postgraduate student of Faculty of Mechanical Engineering, Ecology and Chemical Technologies, Donetsk National Technical University (2, Shibankova Sq., Pokrovsk, Donetsk Region, Ukraine).

E-mail: garrusvakan7@gmail.com