

УДК 691.3

Кузю М. Т., д.т.н., професор, Житковський В. В., к.т.н., доцент,
(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ ПОДРІБНЕННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ВАЖКОГО БЕТОНУ ТА БУДІВЕЛЬНИХ РОЗЧИНІВ

В статті розглянуто результати досліджень бетонів і розчинів із застосуванням відходів подрібнення гірських порід. Запропоновано методики проектування складів важких бетонів з використанням відсівів подрібнення, а також складів сухих будівельних сумішей з використанням пилу аспіраційних установок.

Ключові слова: відсів, пил, відходи, бетон, розчин, граніт.

Основні види відходів та їх характеристика. Отримання високоякісних бетонів та розчинів пов'язане з необхідністю використання кондиційних матеріалів, котрі забезпечують високу міцність, а також мінімальну водопотребу та пустотність. Забезпечення промисловості такою сировиною пов'язане зі значними затратами: як технічними, так і з транспортними. Одним зі шляхів вирішення такої проблеми є використання відходів нерудної промисловості, таких як відсів подрібнення гірських порід на щебін, а також пил аспіраційних установок. Кар'єри нерудних матеріалів, зазвичай, містять значну кількість таких відходів і тому необхідність їх утилізації є гострою як економічною, так і екологічною проблемою (рис. 1).

Одним із основних видів відходів при переробці гірських порід на щебін є **відсів**, вихід яких становить близько 30...35% від кількості щебеню, що виробляється.

Відсів являють собою зерна розміром від 0 до 5 мм з деякою кількістю зерен більше 5 мм. Використання відсівів подрібнення вивержених порід замість природного піску для будівельних робіт регламентується ДСТУ Б В.2.7-210:2010 «Пісок із відсівів дроблення вивержених гірських порід для будівельних робіт. Технічні умови». Головний можливий напрямок утилізації відсівів у цементних бетонах – це використання його як дрібного заповнювача у важких бетонах та основно – у дрібнозернистих.



Рис. 1. Відвали гранітних відсівів-відходів виробництва щебеню

Основною особливістю відсівів, що обмежує його використання як заповнювача бетону, є підвищений вміст пилюватих і глинистих частинок, який визначається способом відмулення (рис. 2). Згідно ДСТУ Б В.2.7-210:2010 допустимий вміст таких частинок становить не більше 3...5% залежно від напрямку застосування. Підвищений вміст таких частинок викликає суттєве збільшення водопотреби бетонних сумішей і, відповідно, зниження міцності бетону [1].

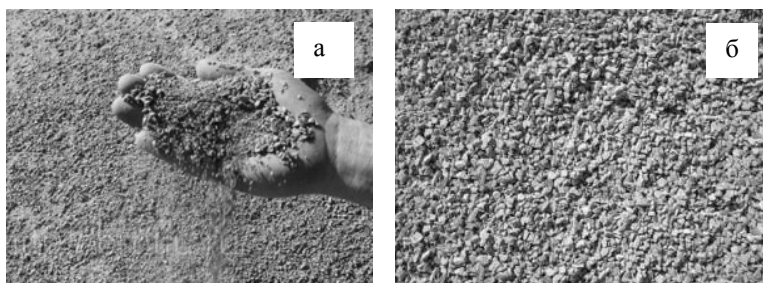


Рис. 2. Гранітні відсіві: (а) – до збагачення; (б) – після збагачення

За погодженням зі споживачем згідно ДСТУ Б В.2.7-210:2010 виробники піску з відсівів можуть постачати матеріал з підвищеним вмістом пилюватих і глинистих часток. За умови, що дані домішки представлені в основному пилюватими частинками вихідних гірських порід і не містять значної кількості глини, використання таких відсівів в бетонах можливе, однак більш раціонально одночасно використовувати методи, що дозволяють нівелювати негативний вплив дисперсних час-

тинок на водопотребу бетонної суміші: застосування ефективних суперпластифікаторів (рис. 4) або сумішей підвищеної жорсткості (вологість 6...8%) з подальшим їх ущільненням силовими методами (пресуванням, вібропресуванням) [2].

Наші дослідження показали, що при обмеженні зростання водопотреби бетонних сумішей пиловидні часточки заповнювачів і, зокрема, відсівів можуть виконувати корисну структуруючу роль при твердненні бетонів, сприяти підвищенню їх щільності і міцності.

При використанні відсівів як заповнювача цементних бетонів важливою характеристикою є зерновий склад, оскільки часто такий заповнювач має підвищену пористість. Пісок з відсівів, що використовується в якості заповнювача дрібнозернистого чи важкого бетону, повинен характеризуватись зерновим складом, що відповідає наведеному на рис. 3.

Коректування зернового складу відсівів можливо додаванням до них необхідної кількості кварцового піску певної крупності.

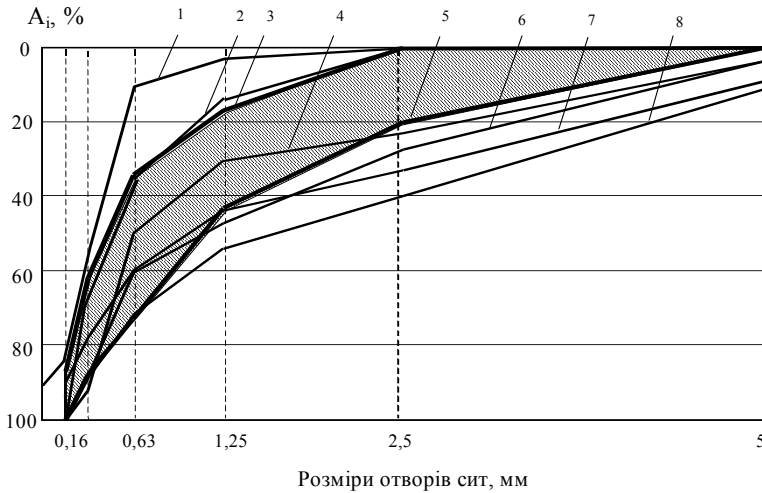


Рис. 3. Зерновий склад пісків і гранітних відсівів:

- 1 – кварцовий пісок ($M_{кр}=1,1$); 2 – кварцовий пісок ($M_{кр}=2,0$)
- 3 – верхня межа допустимого зернового складу; 4 – суміш гранітних відсівів і кварцового піску ($M_{кр}=2,0$) (50%+50%);
- 5 – нижня межа допустимого зернового складу; 6 – суміш гранітних відсівів і кварцового піску ($M_{кр}=2,0$) (75%+25%);
- 7 – гранітні відсіві ($m_n=18\%$); 8 – промиті гранітні відсіві

Іншим масовим видом відходів каменеподрібнення є **пил аспіраційних установок**, який, зазвичай, утворюється при очищенні повітря, що надходить в робочі зони дробарок, в циклонах чи рукавних фільтрах. Такий пил фактично являє собою практично суху дисперсну фракцію вихідної породи з високою питомою поверхнею. Пил, що осідає в циклонах, характеризується питомою поверхнею 2000...2500 $\text{см}^2/\text{г}$, пил після рукавних фільтрів більш дисперсний – його питома поверхня 5000...7000 $\text{см}^2/\text{г}$.

При відсутності у складі аспіраційного пилу глинистих порід, він може бути використаний як наповнювач сухих будівельних сумішей для розчинів різного призначення, поліпшуючи їх легкоукладальність та водоутримуючу здатність при знижених витратах цементу.

Як показують результати досліджень пил аспіраційних установок виконує структуроутворюючу роль у будівельних розчинах, сприяє підвищенню їх адгезійних властивостей. Це дозволяє знижувати витрату цементу у розчинах з врахуванням їх призначення без втрати необхідних властивостей розчинових сумішей (рухомість, водоутримувальну здатність, зберезуваність у часі тощо) та міцнісних характеристик. При використанні пилу як наповнювача у розчинах та сухих будівельних сумішах він повинен відповідати наступним вимогам:

- вологість не більше 0,5%;
- вміст глинистих частинок, що визначаються методом набрякання за ДСТУ Б В.2.7-210:2010 не більше 3% за масою.

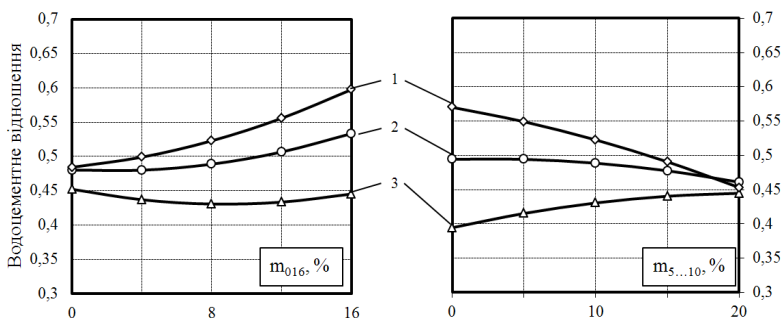


Рис. 4. Вплив дисперсних (m_{016} , %) та крупних ($m_{5...10}$, %) частинок гранітного відсіву на водопотребу високорухомих бетонних сумішей (ОК=19...21 см):
1 – вміст суперпластифікатора СП-1=0%; 2 – 0,5%; 3-1%

Вміст окремих фракцій в аспіраційному пилу як наповнювачі сухих розчинових сумішей повинен відповідати наведеному у табл. 1.

Таблиця 1

Вимоги до зернового складу пилу аспіраційних установок

Розміри отворів сит, мм	Повні залишки на контрольних ситах, %
0,315	0
0,16	0...15
0,08	0...40

Дослідження показали, що пил аспіраційних установок може використовуватись як ефективний компонент сухих клеючих сумішей (клей для плитки, систем теплоізоляції тощо), мурувальних та штукатурних розчинів.

Проектування складів бетонів з використанням відсівів подрібнення. Визначити склад бетону з використанням відсівів можна з використанням наступних підходів:

- підбір складу дрібного заповнювача бетону з використанням відсівів подрібнення та розрахунок витрат інших компонентів за ДСТУ БВ.2.7-215:2009 Бетони. Правила підбору складу;
- визначення витрат окремих компонентів бетонних сумішей з використанням математичних моделей нормованих параметрів.

Для можливості розрахунку складу бетону за стандартною методикою необхідно підібрати співвідношення між наявним піском з відсівів та природним піском. Підбір здійснюється з метою досягнення вмісту частинок не менших 0,63 мм в межах, визначених рис. 3.

Кількість природного піску, що його слід додавати до піску з відсівів, з урахуванням вмісту частинок розміром більше 0,63 мм визначається за формулою

$$n = \frac{A_B - A_H}{A_B - A_{\Pi}}, \quad (1)$$

де A_H , A_{Π} , A_B – повні залишки на ситі 0,63 мм для необхідного піску (за рис. 3), піску природного та піску з відсівів, відповідно.

Витрата піску з відсівів (Π_B) визначається з урахуванням його співвідношення з природним піском n , що визначене за формулою (1)

$$\Pi_B = \Pi \cdot (1 - n), \quad (2)$$

де Π – витрата змішаного дрібного заповнювача в бетоні, кг/м³.

Витрата природного піску

$$\Pi_n = \Pi - \Pi_B. \quad (3)$$

Зміна густини змішаного дрібного заповнювача за рахунок використання піску з відсівів враховується за формулою

$$\rho^{\Pi} = n \cdot \rho^{\Pi_B} + (1-n) \rho^{\Pi_{\Pi}}, \quad (4)$$

де ρ^{Π_B} та $\rho^{\Pi_{\Pi}}$ – істинна густина піску з відсівів та природного піску, відповідно, кг/м³.

Для підбраного заповнювача доцільно визначити водопотребу за методикою Ю.М. Баженова [3].

Бетонні суміші високої рухомості, що відповідають маркам Р3 та Р4 згідно ДСТУ БВ.2.7-96-2000 повинні виготовлятися з обов'язковим застосуванням хімічних добавок, що відносяться до групи суперпластифікуючих за ДСТУ БВ.2.7-171:2008. Хімічні добавки-пластифікатори повинні компенсувати збільшення водопотреби бетонної суміші, викликане підвищеною кількістю пиловатих домішок відсівів.

Приклад. Визначити склад бетону класу В15 для зведення монолітного фундаменту. Марку бетонної суміші за рухомістю прийняти Р3 (осадка конуса 10...12 см). Максимальна крупність щебеню 20 см. В якості дрібного заповнювача прийняти пісок з відсівів (модуль крупності $M_{кр} = 3,3$, залишок на ситі 0,63 мм – 71%, вміст частинок менших 0,16 мм – 16%). Для коректування зернового складу піску з відсівів прийняти природний будівельний пісок ($M_{кр} = 1,9$, залишок на ситі 0,63 мм – 16%). Для зниження водовмісту бетонної суміші прийняти добавку-суперпластифікатор СП-1.

Характеристики сировинних матеріалів:

– Портландцемент: ПЦ II/A-Ш-500, активність $R_n = 52$ МПа, істинна густина (ρ^{Π} – 3100 кг/м³, нормальна густина цементного тіста – 26%;

– Пісок з відсівів: істинна густина (ρ^{Π_B}) – 2700 кг/м³;

– Пісок природний: істинна густина ($\rho^{\Pi_{\Pi}}$) – 2650 кг/м³;

– Щебінь фракція 5...20 мм: істинна густина ($\rho^{\Pi_{III}}$) – 2700 кг/м³, середня густина ($\rho_c^{\Pi_{III}}$) – 1350 кг/м³; пористість ($V_{пуч}$) – 0,47.

1. За формулою (1) визначаємо необхідне співвідношення піску з відсівів та природного піску n для необхідного значення повного залишку на ситі 0,63 мм 45%:

$$n = \frac{A_B - 45}{A_B - A_{\Pi}} = \frac{71 - 45}{71 - 16} = 0,47.$$

Визначаємо істинну густина змішаного піску за формулою (4):

$$\rho^{\Pi} = n \rho^{\Pi_B} + (1-n) \rho^{\Pi_{\Pi}} = 0,47 \cdot 2700 + (1-0,47) 2650 = 2674 \text{ кг/м}^3.$$

2. За методикою [3] експериментально встановлюємо водопотребу отриманого змішаного піску: $V_n = 9\%$ (більше від водопотреби піску

середньої крупності на 2%). Таким чином, водовміст бетонної суміші, визначений за ДСТУ БВ.2.7-215 необхідно збільшити на 10 л (2×5 л) за рахунок водопотреби заповнювача та зменшити на 20 л за рахунок використання суперпластифікатора СП-1.

3. Визначаємо необхідне В/Ц бетонної суміші для забезпечення проектної міцності ($f_{cm}=20$ МПа). Коефіцієнт А приймаємо рівним 0,55 як для заповнювачів низької якості.

$$B / Ц = \frac{AR_{Ц}}{f_{cm} + 0,5AR_{Ц}} = \frac{0,55 \cdot 50}{20 + 0,5 \cdot 0,55 \cdot 50} = 0,81.$$

4. За ДСТУ БВ.2.7-215 визначаємо витрату води, враховуючи поправку на водопотребу піску та цементу, а також поправку на використання суперпластифікатора:

$$B=205 \text{ л.}$$

5. Витрата цементу:

$$Ц = \frac{B}{B / Ц} = \frac{205}{0,81} = 253 \text{ кг.}$$

6. За ДСТУ БВ.2.7-215 визначаємо коефіцієнт розсування зерен: $\alpha=1,28$.

7. Витрата щебеню:

$$Щ = \frac{1000}{\frac{1000}{\rho_{Щ}} + 1,28 \cdot \frac{1000 \cdot V_{нуст}}{\rho_c}} = \frac{1000}{2700 + 1,28 \cdot \frac{1000 \cdot 0,47}{1440}} = 1273 \text{ кг.}$$

8. Витрата змішаного піску:

$$П = \left[1000 - \left(\frac{Ц}{\rho_{Ц}} + \frac{Щ}{\rho_{Щ}} + B \right) \right] \cdot \rho^П = \\ = \left[1000 - \left(\frac{253}{3,1} + \frac{1273}{2,7} + 205 \right) \right] \cdot 2,675 = 647 \text{ кг.}$$

9. Витрата піску з відсівів:

$$П_e = П(1 - n) = 647 \cdot (1 - 0,47) = 343 \text{ кг.}$$

10. Витрата природнього піску:

$$П_n = П - П_e = 647 - 343 = 304 \text{ кг.}$$

11. Виконуємо лабораторну перевірку отриманого складу бетону.

Проектування складу сухих будівельних сумішей з використанням пилу аспіраційних установок

Підбори складів сухих сумішей зазвичай виконуються експериментальними та розрахунково-експериментальними методами. Розрахун-

ково-експериментальне проектування дозволяє формалізувати пошук оптимальних складів за певними алгоритмами і мінімізувати кількість необхідних дослідів.

При визначенні складу сухих сумішей використовують графічні або табличні експериментальні дані, а також рівняння, що представляють собою експериментально-статистичні моделі (ЕСМ), що описують взаємозв'язки між вихідними параметрами сумішей, що характеризують їх технічні властивості і критерії оптимізації з рецептурними параметрами [4].

При визначенні складів сумішей значення рецептурних параметрів, що оптимізуються можна знаходити з ЕСМ, де вони виконують роль залежних змінних або з моделей, де вони виступають в якості вихідних параметрів. Застосування ЕСМ вигідне в тому випадку, коли нормується комплекс необхідних властивостей.

Приклад. Розрахувати склади сухих сумішей та розчинів для мурування на їх основі за допомогою комплексу експериментально-статистичних моделей (ЕСМ), наведених у табл. 2. Сухі суміші застосовують для одержання розчинів марки М100 з морозостійкістю F50 і міцністю зчеплення з основою не менше 0,2 МПа в 28 діб. Для отримання сумішей використані портландцемент М500, пил аспіраційних установок і дрібний пісок з модулем крупності $M_k = 1,6$ і щільністю 2,65 кг/л. Для покращення властивостей сухих сумішей до їх складу ввести суперпластифікатор (СП) та повітрявтягувальну добавку (ПД).

ПД – витрата повітрявтягувальної добавки, % від маси цементу; СП – витрата суперпластифікатора, % від маси цементу; П/Ц – масове співвідношення аспіраційного пилу та цементу; В/Ц – водоцементне відношення; В – витрата води, кг/м³.

1. Витрата цементу $\text{Ц} = 260 : 1,03 = 252$ кг/м³.
2. Витрата пилу $\text{П}_a = 0,4\text{Ц} = 0,4 \cdot 252 = 101$ кг/м³.
3. Витрата повітровтягувальної добавки $\text{ПД} = 0,0004 \cdot 252 = 0,1$ кг/м³.
4. Витрата суперпластифікатора $\text{СП} = 0,0025 \cdot 252 = 0,63$ кг/м³.
5. Витрату піску в кг/м³ знаходимо із умови «абсолютних об'ємів»:

$$\frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{\text{П}_a}{\rho_{\text{па}}} + \frac{\text{В}}{\rho_{\text{в}}} + \frac{\text{П}}{\rho_{\text{п}}} + V_{\text{в}} = 1, \quad (13)$$

де $V_{\text{в}}$ – об'єм втягнутого повітря; $\rho_{\text{ц}}$, $\rho_{\text{па}}$, $\rho_{\text{в}}$, $\rho_{\text{п}}$ – істинні густини цементу, пилу, води і піску.

Звідси, витрата піску:

$$P = \left(1 - \frac{C}{\rho_c} - \frac{P_a}{\rho_{na}} - \frac{B}{\rho_e} - V_e \right) \rho_n \quad (14)$$

Таблиця 2

Експериментально-статистичні моделі (ЕСМ) властивостей мурувальних розчинів кладок на основі сухих сумішей з добавкою поліфункціонального модифікатора (ПФМ), що включає суперпластифікатор СП та повітрявтягувальну добавку

Властивість розчину	Експериментально-статистична модель
Водопотреба, л/м ³	$V=265,7-3,1X_1-27,3X_2-1,2X_3+0,74X_1^2-5,26X_2^2+2,24X_3^2+0,88X_1X_2+2,13X_1X_3+1,88X_1X_2$ (5)
Водовідділення, %	$V_v=3,39-0,47X_1+0,11X_2-0,43X_3+0,254X_1^2-0,246X_2^2+0,45X_3^2+0,113X_2X_3$ (6)
Повітрявтягування, %	$V_v=4,17+1,58X_1+0,52X_2+0,24X_3-0,2X_1^2+0,2X_2^2+0,2X_3^2-0,4X_1X_2-0,61X_1X_3+0,64X_1X_2$ (7)
Рухомість (занурення конусу), см	$P_k=9,73-1,08X_1+2,2X_2+0,6X_3+1,25X_5-1,14X_1^2+0,3X_2^2+0,6X_3^2+0,3X_4^2+0,3X_5^2+0,28X_1X_2+0,28X_1X_5+0,28X_2X_5+0,4X_3X_4-0,59X_4X_5$ (8)
Адгезійна міцність, МПа, через 7 (fad, 7) і 28 діб (fad, 28)	$f_{ад. 7}=0,356-0,01X_1+0,03X_2-0,028X_4-0,0459X_1^2-0,0209X_2^2-0,0459X_3^2-0,0459X_4^2-0,001X_1X_4+0,01X_2X_3+0,001X_3X_4$ $f_{ад. 28}=0,63-0,026X_1+0,057X_2-0,028X_4-0,0542X_1^2-0,0542X_2^2-0,0792X_3^2-0,004X_4^2-0,004X_1X_4+0,011X_2X_3+0,004X_3X_4$ (9)
Міцність при стиску (f_{cm}) і згині (f_{pm}), МПа, через 28 діб	$f_{cm}=24,8-2,03X_1-2,49X_2+1,207X_3-8,04X_5-2,7X_1^2-0,342X_2^2-0,458X_3^2-0,18X_4^2-0,18X_1X_2+0,44X_1X_3+0,23X_2X_3+0,66X_2X_4+0,33X_3X_4$ $F_{pm}=3,74-0,252X_1+0,353X_2-0,986X_4-0,499X_1^2-0,05X_2^2-0,151X_3^2-0,401X_4^2+0,056X_1X_4-0,044X_3X_4$ (10)
Морозостійкість, цикли	$F=149,9+28,7X_1+11,6X_2-4,46X_3-67,1X_5+3,95X_1^2+1,95X_2^2-2,95X_3^2-36,6X_4^2+2,75X_1X_2-2,37X_1X_3-11,6X_1X_4+1,125X_3X_4$ (11)

Примітка: $X_1=ПД-0,025/0,025$; $X_2=СП-0,35/0,35$; $X_3=ПЦ-0,35/0,35$; $X_4=В/Ц-0,8/0,2$; $X_5=В-270/30$;

Витрата піску з рівняння (14) $P = 1476$ кг/м³.

6. Об'єм втягнутого повітря знаходимо з рівняння (7). $V_n = 6\%$ = 60 л/м³.

Остаточний склад розчинової суміші:

$\rho = 252 \text{ кг/м}^3$, $\rho_a = 101 \text{ кг/м}^3$, $\rho = 1476 \text{ кг/м}^3$, $\rho_d = 0,1 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{СП}} = 0,63 \text{ кг/м}^3$.

У табл. 3 наведені склади розчинів, що отримані з використанням ЕСМ, наведених у табл. 2.

Таблиця 3

Склади мурувальних розчинів з використанням аспіраційного пилу

Марка розчину	Витрата компонентів на 1 м^3 розчину, кг						n = П/В'яз
	Цемент	Аспіраційний пил	СП	ПД	Вода	Пісок	
150	340	136	0,85	0,136	255	1374	2,9
100	255	102	0,638	0,102	255	1485	4,2
75	215	129	0,538	0,086	247	1510	4,4
50	150	105	0,375	0,06	225	1651	6,5

1. Дворкин Л. И. Основы бетоноведения / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – С-П. : ООО «Стройбетон», 2006. – 691 с. 2. Дворкін Л. Й. Бетони на основі наджорстких сумішей / Дворкін Л. Й., Житковський В. В., Каганов В. О. – Рівне : ДЦНТІ, 2006. – 179 с. 3. Баженов Ю. М. Технология бетона. Учебник / Ю. М. Баженов. – М. : Изд-во АСВ, 2003. – 500 с. 4. Дворкін Л. Й. Проектування складів бетонів: Монографія / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін. – Рівне : НУВГП, 2015. – 353 с.

Рецензент: д.т.н., професор Дворкін Л. Й. (НУВГП)

Kuzlo M. T., Doctor of Engineering, Professor, Zhytkovsky V. V., Candidate of Engineering, Associate Professor (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

USING OF WASTE CRUSHING ROCKS IN THE MANUFACTURE OF HEAVY CONCRETE AND MORTAR

In the article are presented the results of studies of concretes and mortars the using of waste crushing rocks. The methods of design the compositions of heavy concrete with crushing screening and the compositions of dry mixes using dust aspiration facilities are offered.

Keywords: screening, dust, waste, concrete, mortar, granite.

Кузло М. Т., д.т.н., профессор, Житковский В. В., к.т.н., доцент,
(Национальный университет водного хозяйства и природопользования,
г. Ровно)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА И СТРОИТЕЛЬНЫХ РАСТВОРОВ

В статье рассмотрены результаты исследований бетонов и растворов с применением отходов дробления горных пород. Предложены методики проектирования составов тяжелых бетонов с использованием отсевов дробления, а также складов сухих строительных смесей с использованием пыли аспирационных установок.

***Ключевые слова:* отсев, пыль, отходы, бетон, раствор, гранит.**
