

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 622.27:621.926.9(339.138)

Сокур М. І., д.т.н., професор (Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського), **Білецький В. С., д.т.н., професор** (Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»), **Гнеушев В. О., к.т.н., доцент** (Національний університет водного господарства та природокористування), **Божик Д. П., аспірант** (Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського)

ТЕОРЕТИЧНІ І ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ВИРОБНИЦТВА ВИСОКОЯКІСНОГО КУБОВИДНОГО ЩЕБЕНЮ

Викладено результати теоретичних та експериментальних досліджень дроблення природного будівельного каменю у відцентрово-ударній дробарці з одержанням кубовидного щебеню. Зокрема, наведений отриманий математичний вираз ступеня скорочення матеріалу при відповідному швидкісному режимі роботи відцентрового дезінтегратора. Рекомендовано широко використовувати дробарки відцентрово-ударного типу для виробництва високоякісного кубовидного щебеню.

Ключові слова: будівельні матеріали, граніт, щебінь, дроблення, відцентрово-ударна дробарка, режим роботи дробарки.

Постановка проблеми. При виробництві щебеню актуальним є питання зменшення його лещадності (виражається у відсотках вмісту зерен пластинчастої та голчастої форми в загальній масі щебеню). Найбільш якісним є так званий кубовидний щебінь, лещадність якого становить близько 10-15%. Міцність кубовидного щебеню вища порівняно зі звичайними видами щебеню – лещатим та змішаним. Його застосування збільшує показник довговічності бетонних конструкцій та асфальтобетонних покриттів у 2–3 рази. При цьому зменшуються витрати щебеню, бітуму та цементу, зростає довговічність та морозостійкість дорожнього покриття. При укладанні асфальтобетонного покриття використання кубовидного щебеню знижує тривалість робіт і працезатрати майже на 70% [1-2].

Для випуску будівельних матеріалів застосовують різні типи дробильного і помольного обладнання вітчизняного та зарубіжного виробництва. Підвищення темпів розвитку будівництва та суміжних галузей промисловості вимагає удосконалення конструкції обладнання і підвищення його надійності та ефективності.

Впровадження нової техніки та інноваційних технологій виробництва будівельних матеріалів зумовлюють зниження собівартості продукції, підвищення її якості і рентабельності виробництва. Одним з можливих шляхів досягнення цих результатів є покращення якості щебеню за рахунок зменшення його лещадності.

Дослідження і публікації з проблеми. Відома конструкція агрегату з пристроєм для спрямованої подачі сланцевих матеріалів, призначена для отримання кубовидного щебеню шляхом роздавлювання матеріалу між двома валками [3].

Нами запропоновано отримувати кубовидний щебінь із застосуванням відцентрових дезінтеграторів [4], які позитивно зарекомендували себе при дробленні руд [5-6]. Найбільш перспективними при цьому виявилися дробарки інерційного типу (КІД) і дезінтегратори відцентрового типу (ЦД), що реалізують принципи руйнування матеріалу вільним ударом у полі відцентрових сил [6].

Нами виконано експериментальні дослідження [5] з дроблення граніту у відцентрово-ударній дробарці і встановлено режимні параметри її роботи, зокрема, те, що оптимальним режимом роботи при виробництві щебеню крупністю мінус 20+10 мм є швидкісний режим 600-700 об./хв, тобто 70-80 м/с, при якому вихід даної фракції складає 25%, а вміст кубовидних зерен знаходиться в межах 94-95%. Встановлено, що при швидкісному режимі роботи дробарки 400-500 об./хв (тобто 45-50 м/с) вихід фракції мінус 50+20 мм складає 20%, при цьому вміст кубовидних зерен даної фракції знаходиться в межах 88-90%, отже, даний швидкісний режим є оптимальним при виробництві щебеню крупністю мінус 50+20 мм. При виробництві щебеню крупністю мінус 10+5 мм оптимальний швидкісний режим дробарки є 600-700 об/хв. (70-80 м/с) при цьому досягається вихід кубовидних зерен в межах 94-95%. Порівняльними дослідженнями конусної дробарки встановлено, що вміст кубовидних зерен в продуктах дроблення крупністю мінус 10,0 мм складає лише 65%, що на 20% менше, ніж в продуктах дроблення відцентрово-ударної дробарки. В продуктах дроблення конусної дробарки крупністю мінус 20,0 мм вміст кубовидних зерен складає 70%, що на 25% менше, ніж в продуктах дроблення відцентрово-ударної дробарки. Отже, експериментально встановлено, що застосування відцентрово-ударних дробарок для виробництва щебеню дозволяє отримати високоякісний щебінь із вмістом кубовидних зерен 90-95%, що в середньому на 20-25% більше, ніж в дробарках конусного типу. На цій основі дробарки відцентрово-ударного типу рекомендуються до широкого застосування для виробництва високоякісного щебеню із вмістом кубовидних зерен 90-95% [5].

Водночас розробка теоретичних основ отримання кубовидного щебеню залишається на часі.

Мета цієї статті – висвітлення результатів досліджень з розробки теоретичних основ раціональних швидкісних режимів роботи відцентрових дезінтеграторів при виробництві високоякісного щебеню з урахуванням фізико-механічних даних вихідного матеріалу і вимог замовників стосовно необхідної крупності щебеню і вмісту в ньому кубовидних зерен.

Виклад основного матеріалу

Позначимо граничну мінімальну швидкість, при якій шматок матеріалу починає руйнуватися $V_{пред}$. Така швидкість забезпечує його мінімальне руйнування і призводить до зменшення поперечного розміру зерна в два рази (тобто ступінь скорочення шматка дорівнює 2). При необхідності зменшення крупності вихідного матеріалу в три рази, швидкість повинна бути збільшена в 1,5 рази, для зменшення крупності в чотири рази, швидкість вильоту повинна бути збільшена вдвічі і т.д.

Таким чином, для забезпечення необхідного ступеня C скорочення матеріалу, в отримані математичні вирази необхідно ввести коефіцієнт, що дорівнює $C/2$. Тоді необхідну швидкість вильоту матеріалу з робочого органу відцентрового дезінтегратора для забезпечення необхідного C -го ступеня скорочення можна розрахувати за формулою

$$v = \frac{3}{2} \cdot \frac{[G]}{\rho \cdot u} \cdot \frac{\tilde{N}}{2} = \frac{3}{4} \cdot \frac{[G] \cdot \tilde{N}}{\rho \cdot u}, \quad (1)$$

де $[G]$ – допустиме напруження руйнування даного матеріалу;

u – швидкість поширення пружних хвиль в матеріалі (швидкість звуку);

ρ – густина матеріалу, кг /м³.

Формула (1) справедлива для дезінтеграторів, що забезпечують своєю конструкцією максимальний кут зустрічі ($\lambda = 90^\circ$) матеріалу з відбійними плитами.

Якщо ж кут зустрічі матеріалу з відбійними плитами $\lambda < 90^\circ$, маємо:

$$v = \frac{3}{4} \cdot \frac{[G] \cdot C}{\rho \cdot u \cdot \sin \lambda}. \quad (2)$$

Отримана експериментально-аналітичним шляхом математична залежність дозволяє вирішити зворотну задачу – визначити ступінь скорочення дробленого матеріалу при заданому швидкісному режимі роботи відцентрового дезінтегратора. В результаті отримаємо рівняння, розв'язане відносно C :

$$C = \frac{4V \cdot \rho \cdot u \cdot \sin \lambda}{3[G]} \quad (3)$$

Як показано в роботі [3], швидкість польоту шматка матеріалу в камері дроблення відцентрового дезінтегратора, з урахуванням конструктивних особливостей робочого органу розгінного ротора і швидкісного режиму роботи дезінтегратора, визначається за формулою

$$V = 0,95\omega R \sqrt{1 + B^2 + B \sin \psi} \quad (4)$$

Тут
$$B = \left(\sqrt{1 + f^2} - f \right) \frac{\cos(\psi - \varphi)}{\cos \varphi}, \quad (5)$$

де ω – кутова швидкість обертання ротора, с^{-1} ;
 R – радіус вильоту розгінних ребер, м;
 ψ – кут нахилу розгінних ребер до радіусу, $^\circ$;
 f, φ – коефіцієнт і кут тертя матеріалу і сталі;
 $\varphi = \arctg f$.

Підставивши значення швидкості V з формули (4) в формулу (5), отримуємо математичну залежність для визначення ступеня скорочення матеріалу, що подрібнюється, при зазначеному швидкісному режимі роботи відцентрового дезінтегратора

$$C = \frac{4(0,95\omega R \sqrt{1 + B^2 + B \sin \psi}) \cdot \rho \cdot u \cdot \sin \lambda}{3[G]} \quad (6)$$

Отримана математична залежність процесу руйнування твердих видів мінеральних ресурсів вільним ударом об жорстку поверхню в полі відцентрових сил відображає фізичну сутність процесів в робочій камері дезінтегратора і рекомендується як для опису якісної картини руйнування матеріалу у відцентровому дезінтеграторі, так і для розрахунку швидкісних режимів роботи при їх проектуванні.

Запропонований математичний підхід і одержана математична модель руйнування твердого матеріалу в полі відцентрових сил можуть бути застосовані для опису процесу виробництва щебеню із природного будівельного каменю з урахуванням тієї особливості цього процесу, що при виробництві щебеню певних класів крупності ставиться вимога отримання максимального вмісту кубовидних зерен в заданому класі крупності. З урахуванням цієї вимоги в отриману залежність (2) пропонується внести коефіцієнт K_3 (кубовидні зерна), величина якого дорівнює плановому відсотку кубовидних зерен в даному класі крупності щебеню, поділеному на 100. Так, якщо ми плануємо отримати 90% кубовидних зерен, то в чисельник формули

(2) вводимо коефіцієнт 0,9, і тоді формула в загальному вигляді так:

$$v = \frac{3}{4} \cdot \frac{[G] \cdot C \cdot K_3}{\rho \cdot u \cdot \sin \lambda} \quad (7)$$

Відповідно, формула для розрахунку ступеня скорочення шматка матеріалу при заданій швидкості вильоту матеріалу буде мати вигляд:

$$C = \frac{4v \cdot \rho \cdot u \cdot \sin \alpha}{3[G] \cdot K_3} \quad (8)$$

З урахуванням формул (6) і (8), математичний вираз ступеня скорочення матеріалу при відповідному швидкісному режимі роботи відцентрового дезінтегратора матиме вигляд:

$$C = \frac{4(0,95\omega R \sqrt{1+B^2+B \sin \psi}) \cdot \rho \cdot u \cdot \sin \lambda}{3[G] \cdot K_3} \quad (9)$$

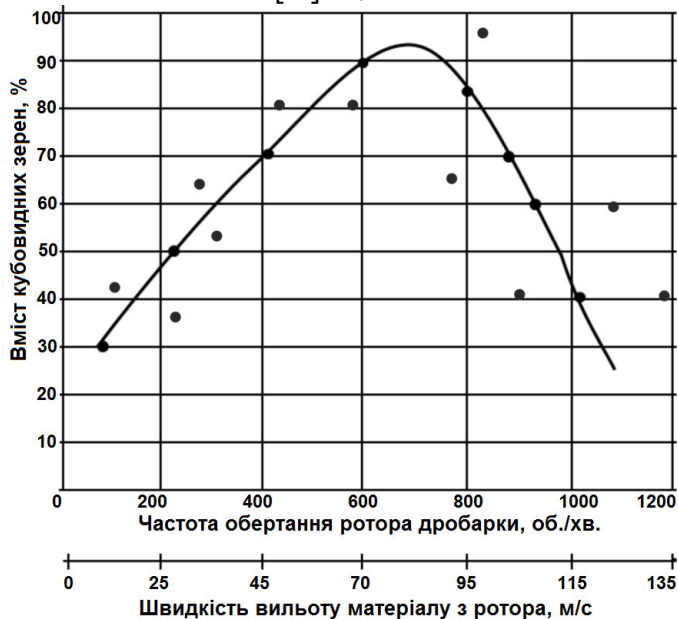


Рис. 1. Вміст кубовидних зерен щебеню в класі крупності мінус 20,0 + 10,0 мм в залежності від швидкісного режиму роботи відцентрової дробарки при продуктивності 75-85 т/год

Розроблені теоретичні підходи і отримані математичні моделі підтверджуються результатами експериментальних досліджень, наведеними на рис. 1 та 2. З рис. 1 слідує, що максимальний вміст кубовидних зерен в щебені крупністю мінус 20 плюс 10 мм становить близько 95% і досягається при швидкості вильоту матеріалу з ротора 75-80 м/с.

Відповідно, максимальний вміст кубовидних зерен в класі крупності мінус 50 плюс 20 мм 90% відмічається при швидкості вильоту дробленого матеріалу з ротора дробарки 60-70 м/с (рис. 2).

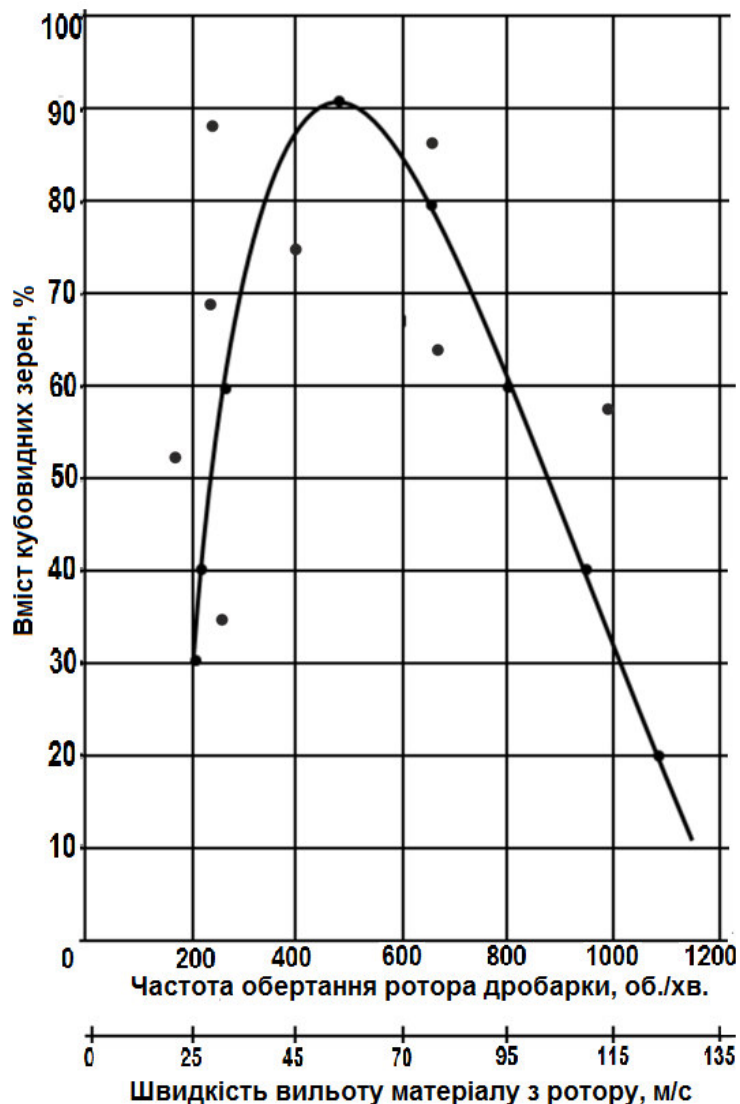


Рис. 2. Вміст кубовидних зерен щебеню в класі крупності мінус 50,0 + 20,0 мм в залежності від швидкісного режиму роботи відцентрової дробарки продуктивністю 75-85 т/год

На рис. 3 показано загальний вигляд щебеню з кубовидною формою зерен, отриманого на відцентровій дробарці продуктивністю 75-85 т/год (Кривий Ріг, гранітний кар'єр, 2017 р.).



а)



б)

Рис. 3. Загальний вигляд щебеню з кубовидною формою зерен, отриманого на відцентровій дробарці продуктивністю 75-85 т/год:

а) – клас крупності мінус 50,0 + 20,0 мм

б) – клас крупності мінус 20,0 + 10,0 мм

Висновок. Запропоновані теоретичні підходи мають перспективу практичного застосування при проектуванні відцентрових дезінтеграторів і розрахунку необхідних швидкісних режимів їх роботи, а також при виробництві високоякісного щебеню з урахуванням фізико-механічних характеристик вихідного матеріалу і вимог замовни-

ків стосовно необхідної крупності щебеню та вмісту в ньому кубовидних зерен.

1. Romanovich A. A. Performance review and principal directions for development of a grinding equipment in cement factory. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2014. Т. 9. № 11. С. 2367–2370.
2. Sevost'yanov V. V., Targonsky I. I., Romanovich A. A., Goncharov A. A. Energy saving milling aggregates with internal recycling of the milled materials. *Glass and Ceramics*. 1993. Т. 50. № 4. С. 180–184.
3. Романович А. А. К вопросу повышения эффективности в работе оборудования для измельчения материалов / Романович А. А. // Строительные материалы. – 2005. – № 5. – С. 63–65.
4. N. Sokur, V. Biletsky, L. Sokur, D. Bozyk, I. Sokur. Investigation of the process of crushing solid materials in the centrifugal disintegrators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 3/7(81). 2016. P. 34–40.
5. Сокур М. І. Інноваційна технологія дроблення магнетитових кварцитів в полі відцентрових сил та її вплив на ефективність рудопідготовки / М. І. Сокур, І. М. Сокур // Вісник НТУ ХПІ. Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – 2013. – № 57. – С. 115–120.
6. Егурнов А. И. Повышение эффективности процессов измельчения и классификации на обогатительной фабрике ИнГОКа / А. И. Егурнов, В. П. Равишин // Теория и практика процессов обогащения, разделения и смешения : Труды VI международной конф. – Одесса, 1998. – С. 45–48.
7. Божик Д. П. Експериментальні дослідження виробництва будівельних матеріалів із застосуванням відцентрово-ударної дробарки / Божик Д. П., Сокур М. І., Білецький В. С. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2017. – Вип. 66(107).

Рецензент: д.т.н., професор Филипчук В. Л. (НУВГП)

Sokur M. I., Doctor of Engineering, Professor (Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University), **Biletskyi V. S., Doctor of Engineering, Professor** (The National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"), **Hnieushev V. O., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne), **Bozhyck D. P., Post-graduate Student** (Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University)

THEORETICAL AND PRACTICAL ASPECTS OF THE HIGH-QUALITY CUBE-SHAPED CRUSHED STONE PRODUCTION

The results of theoretical and experimental studies of the crushing of a natural building stone in a centrifugal impact crusher with obtaining a cube-shaped crushed stone are presented. In particular, the obtained mathematical expression of the degree of material reduction

with the corresponding high-speed operating mode of the centrifugal disintegrator is given. It is recommended to widely use crushers of centrifugal-shock type for the production of high-quality cube-shaped crushed stone.

Keywords: building materials, granite, crushed stone, crushing, centrifugal-impact crusher, crusher operation mode.

Сокур Н. И., д.т.н., профессор (Кременчугский национальный университет им. Михаила Остроградского), **Белецкий В. С., д.т.н., профессор** (Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»), **Гнеушев В. А., к.т.н., доцент** (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно), **Божик Д. П., аспирант** (Кременчугский Национальный университет имени Михаила Остроградского)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО КУБОВИДНОГО ЩЕБНЯ

Изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований дробления природного строительного камня в центробежно-ударной дробилке с получением кубовидного щебня. В частности, приведено полученное математическое выражение степени сокращения материала при соответствующем скоростном режиме работы центробежного дезинтегратора. Рекомендовано широко использовать дробилки центробежно-ударного типа для производства высококачественного кубовидного щебня.

Ключевые слова: строительные материалы, гранит, щебень, дробление, центробежно-ударная дробилка, режим работы дробилки.
