

С.Н. Березовский, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Автомобильные дороги», Белорусско-Российский университет, г. Могилев

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ ВАЛУННО-ГРАВИЙНО-ПЕСЧАНОЙ СМЕСИ

В статье проанализировано состояние дел по переработке нерудных строительных материалов на отечественных дробильно-сортировочных заводах и обозначены недостатки применяемой технологии переработки сырья. По результатам исследований по переработке валунно-гравийно-песчаной смеси с использованием мелких и средних валунов были построены графики и показаны зависимость фракционной эффективности от относительной крупности размера отверстий сита, зависимость фракционной суммарной эффективности грохочения от общей эффективности, зависимость фракционной суммарной эффективности грохочения от класса крупности. Используя зависимости, методом компьютерного имитационного моделирования проведены исследования влияния общей эффективности и класса крупности (d) на фракционную эффективность (E_{ϕ}). В табличном виде представлены результаты расчетов фракционной суммарной эффективности грохочения на вибрационном грохоте, которые зависят от общей эффективности, соотношения размера поступающего сырья (d) к отверстию сита (a). Согласно расчетным данным, по выходу компонентов и зерновому составу технологические схемы можно рассчитывать отдельно по каждому компоненту, качественно-количественные характеристики которых рассчитаны от исходного гравийно-песчаного материала.

Ключевые слова: дробильно-сортировочные заводы, нерудно-строительные материалы, валунно-гравийно-песчаная смесь, эффективность переработки, компьютерное моделирование, щебень.

Введение

В настоящее время удельный вес продукции, выпускаемой предприятиями, разрабатывающими гравийно-песчаные месторождения, значительно увеличивается из-за использования гравия и щебня в высокопрочных железобетонных конструкциях, в асфальтобетонных смесях, для дорожного бетона, для строительных работ. Увеличение выпуска нерудных материалов за счет переработки гравийно-песчаных материалов является сейчас одним из наиболее эффективных направлений в решении проблемы обеспечения страны качественными материалами. Гравийно-сортировочные заводы, в большинстве своем маломощные, с несовершенными технологическими схемами и устаревшим разнотипным оборудованием, не могут решать задачи, поставленные перед промышленностью. Значительную часть продукции составляют несортированная гравийно-песчаная смесь, невымытый гравий и песок [4, 5]. В последние годы вырос спрос на щебень размером до 20 мм и стали предъявляться более жесткие требования к его качеству.

Практика работы дробильно-сортировочных заводов (ДСЗ) РБ позволила выявить следующие недостатки применяемой технологии переработки сырья:

- уменьшение производительности ДСЗ из-за образования водных пленок на ситах грохотов, что вызывает налипание мелких частиц к крупным кускам;
- выпуск щебня, не отвечающего требованию стандарта по содержанию пылевидных и глинистых частиц, вследствие отсутствия промывки;

- закругление щебня без замкнутого цикла работы оборудования;
- высокое содержание лещадных зерен в щебне;
- значительные потери гравия с первичными отсевами;
- разнотипность оборудования.

В последнее время из-за резко возросшей стоимости вяжущих, увеличения нагрузок на дорожное полотно и повышения интенсивности движения на автодорогах, перед дорожно-строительными организациями встала проблема снижения себестоимости материалов при улучшении эксплуатационных характеристик дорожного полотна. ДСЗ рассчитаны на переработку горной массы определенного состава. При поступлении сырья с иными характеристиками уменьшается производительность, увеличиваются потери полезных компонентов, растет удельный расход сырья, снижается качество продукции, увеличиваются энергозатраты.

Технология переработки минерального сырья за последние годы изменилась незначительно. Износ оборудования достигает в настоящее время до 60%. Чтобы увеличить количество производимых фракций, нужно переоборудовать ДСЗ, расширить площадь складов. Ряд карьеров дорабатывает разведанные запасы и вынуждены разрабатывать участки с низким качеством сырья. Так, например, непрерывный рост интенсивности и скорости движения автомобильного транспорта требует выполнения различных мероприятий, обеспечивающих безопасность движения по дорогам. Основное из них – устройство шероховатых дорожных покрытий. Выполнение этого условия обеспечивается применением кубовидного щебня из высокопрочных минеральных материалов в верхних слоях дорожных покрытий. Среди них важное место занимает высококачественный бетон и изделия из него, в том числе его мелко- и тонкозернистые разновидности, для которых необходим щебень мелких фракций [2, 3]. На некоторых предприятиях, перерабатывающих горные породы, до 30% добытого сырья уходит в отходы. Трудно решается проблема выпуска кубовидного щебня, так как породы различаются прочностью, вязкостью, кристаллической структурой и другими свойствами, влияющими на разрушение. Увеличение потребности в щебне приводит к изменению соотношения в объемах добычи между различными типами пород. По этой причине оказались в тяжелом положении карьеры, разрабатывающие месторождения ГПС с малым содержанием гравийно-валунного материала.

На горных предприятиях формируются техногенные месторождения значительного объема, занимающие большие площади. Вовлечение в эксплуатацию техногенных образований, в первую очередь, отсева пород, позволит снизить эксплуатационные затраты и сократить расход природных ресурсов при выпуске строительных материалов. В недостаточной степени используются другие ресурсы карьеров – природные и техногенные, такие, как выработанные пространства, отвалы вскрышных пород и сами породы, шламохранилища.

Исследования по переработке валунно-гравийной-песчаной смеси

При подготовке сырья к переработке удаляются валуны, негабаритные для использования дробилками первичного дробления. Отделение крупных валунов от кондиционного сырья полезного ископаемого производится выемочно-погрузочным оборудованием (экскаваторная сортировка). Как правило, при экскаваторной сортировке должны отделяться только очень большие валуны, негабаритные – для используемых дробилок первичного дробления. Классификация валунов по крупности приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация валунов по крупности (в скобках приведен средний минимальный размер приемного отверстия дробилок)

Класс крупности валунов	Размер валунов, мм	Ширина ленты конвейеров, мм	Минимальная ширина приемного отверстия дробилок, мм
Мелкие	70-150	650 и более	175-190 (180)
Средние	150-300	800 и более	350-380 (360)
Большие	300-600	1200 и более	700-750 (720)
Очень большие	>600	То же	900

В нашей работе были задействованы преимущественно мелкие и средние валуны размером 70-150 мм и 150-300 мм. На отечественных ДСЗ, перерабатывающих гравийно-песчаные породы, выпускают, как правило, две-три фракции гравия и щебня и одну фракцию песка. Стремление интенсифицировать процесс переработки горной массы, как правило, определяется в виде требования к увеличению тонкости продукта дробления, который является сырьём для последующей операции. Такое общее требование в обоих случаях имеет свое рациональное ядро, заключающееся в общем правиле, что «дробление менее энергоёмко, чем помол».

Удельный расход энергии на дробление материала определяется формулой [11]:

$$\frac{dE}{dx} = k \cdot x^{-n}, \quad (1)$$

где: E – удельный расход энергии на дробление, т.е. объем энергии, израсходованной на единицу продукции, кВт*ч/т;

x – размеры перерабатываемого сырья, мм;

k – константа, отражающая свойства перерабатываемого сырья;

n – эмпирический показатель.

Из этого следует, что большое значение на удельный расход энергии оказывают размеры частиц, поступающих на дробление. Для сокращения количества материала, поступающего на дробление, и снижения энергозатрат применяют предварительное грохочение.

Наши исследования по переработке валунно-гравийно-песчаной смеси на отечественных предприятиях показали, что на предварительном грохочении первой стадии дробления, где применяется неподвижный колосниковый грохот, общая эффективность грохочения колеблется в пределах 60-70%. Перед второй стадией дробления, где применяются вибрационные грохоты, эффективность грохочения увеличивается до 85%, и на последней стадии операции (товарная продукция) общая эффективность достигает максимального значения (90-98%) (рисунок 1). Фракционная эффективность грохочения во многом определяется размером поступающего материала (d) и размером отверстия сит грохота (a). Из рисунка 2 видно, что она изменяется по обратно-пропорциональной зависимости с четко выраженной корреляционной связью.

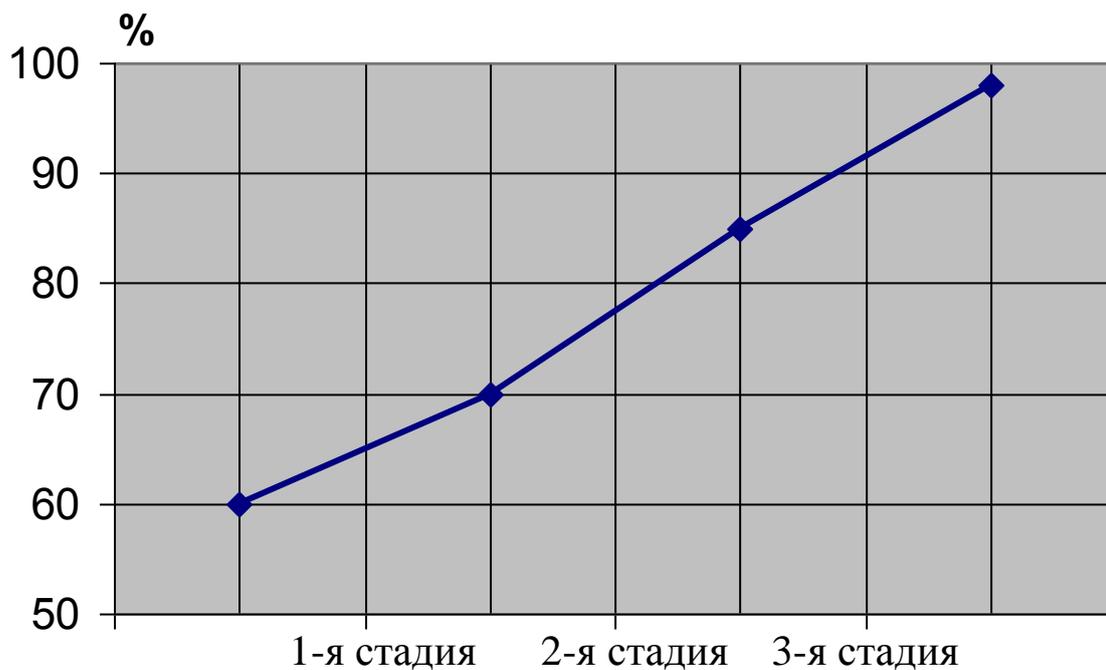


Рисунок 1 – Эффективность операций переработки каменных включений по трехстадийной схеме

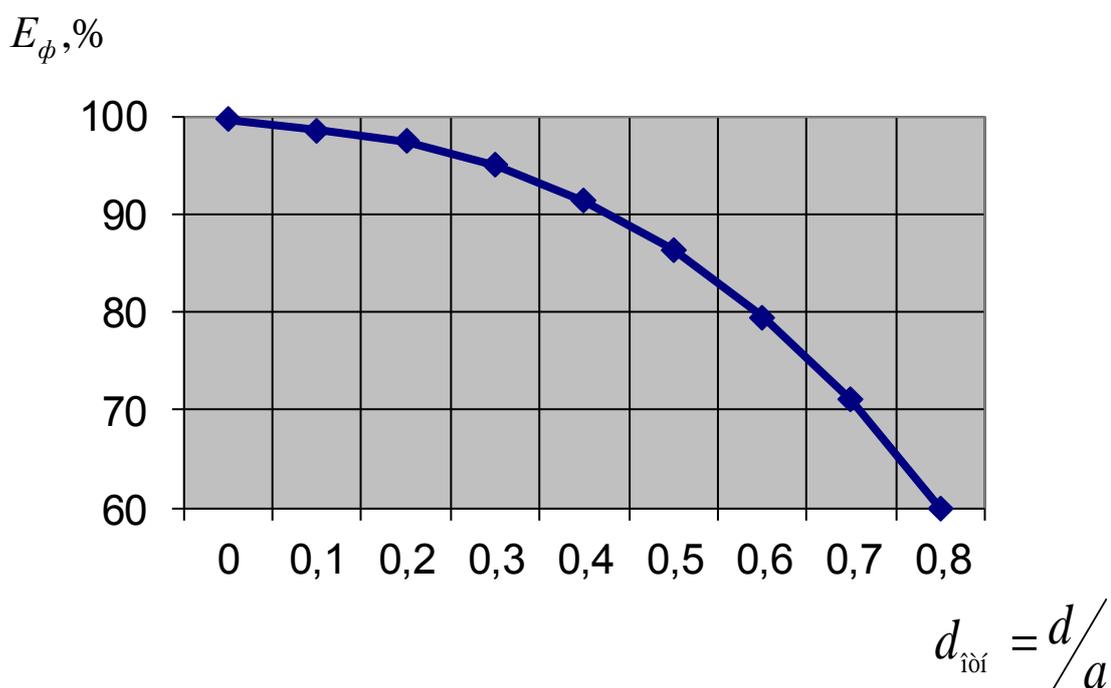


Рисунок 2 – Зависимость фракционной эффективности от относительной крупности размера отверстий сита

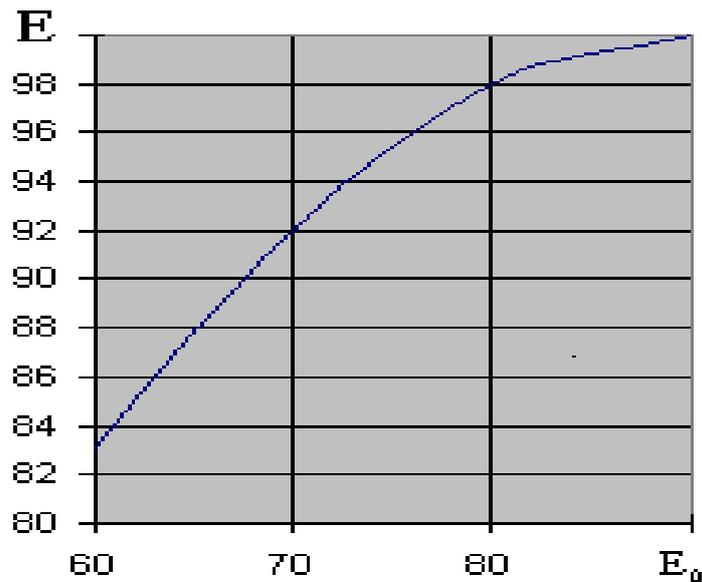


Рисунок 3 – Зависимость фракционной суммарной эффективности грохочения от общей эффективности

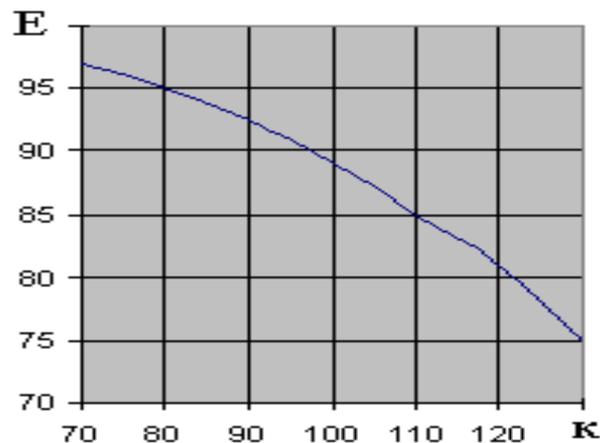


Рисунок 4 – Зависимость фракционной суммарной эффективности грохочения от класса крупности

При расчете качественно-количественной схемы принимаются и определяются две группы основных показателей: исходные и расчетные. Численные значения показателей первой группы устанавливаются на основании задания на проектирование и практических данных. Численные значения показателей второй группы определяются в результате расчета схемы [8].

К исходным показателям относятся: производительность по готовой продукции, характеристики крупности исходного материала и продуктов дробления, общие эффективности технологических операций, граничные крупности разделения для операции грохочения, классификации и др., размеры выпускных щелей дробильного оборудования.

К расчетным показателям относятся: производительность по горной массе, масса и выход продуктов, выход того или иного класса крупности и марки прочности. Выходы выражаются в процентах или долях единицы от исходной горной массы, продуктов дробления, грохочения, классификации и т.д.

Фракционная эффективность операции грохочения определяется из соотношений [10]:

$$E_{\phi} = 1 - \left(-E_0 \right)^{C/150^d}, \quad (2)$$

где

$$C = KE_0 / \left(-E_0 \right)^{d_1}, \quad K = 3,32 \lg \left(\gamma^{-d} / \gamma^{-d_1} \right), \quad (3)$$

где: E_{ϕ} – фракционная эффективность грохочения, %;

E_0 – общая эффективность, %;

d – класс крупности материала;

γ^{-d} , γ^{-d_1} – выход класса $0-d$ мм и $0-d_1$ мм в исходной горной массе;

C и K – безразмерные параметры, зависящие от класса крупности материала и общей эффективности.

Таблица 2 – Значения фракционной эффективности грохочения E_{ϕ} , %

Общая суммарная эффективность, E_0 , %	Относительная крупность отверстия сита грохота: $d_{отн} = d/a$											
	0,4			0,6			0,8			1,0		
	Значение параметра K											
	0,5	1,0	2,0	0,5	1,0	2,0	0,5	1,0	2,0	0,5	1,0	2,0
97	100	100	100	100	100	99,9	99,8	98,8	98,2	96,0	96,0	96,0
95	100	100	100	100	100	99,9	97,8	97,9	98,1	92,0	92,0	92,0
85	98,8	99,1	99,7	96,4	97,1	98,0	91,4	92,5	92,8	87,0	87,0	87,0
80	96,9	99,3	99,5	97,7	97,8	97,9	87,8	88,4	88,7	80,0	80,0	80,0
75	93,7	98,7	99,3	89,7	94,7	95,0	82,9	83,8	83,9	75,0	75,0	75,0
70	88,9	96,5	99,0	82,4	90,1	90,7	76,6	77,3	77,8	70,0	70,0	70,0
65	81,8	93,9	98,9	79,8	86,6	89,4	68,5	69,9	70,3	65,0	65,0	65,0
60	79,1	89,9	97,8	75,9	76,9	77,8	60,9	61,0	61,5	60,0	60,0	60,0

Используя зависимости (2-3), методом компьютерного имитационного моделирования проведены исследования влияния общей эффективности (E_0) и класса крупности (d) на фракционную эффективность (E_{ϕ}).

В таблице 2 представлены результаты расчетов фракционной суммарной эффективности грохочения на вибрационном грохоте, которые зависят от общей эффективности, соотношения размера поступающего сырья (d) к отверстию сита (a). Учитывая необходимость выбора оптимальных технологических схем и режимов работы оборудования,

большую сложность выполняемых расчетов, расчет технологических схем выполнен нами с помощью ЭВМ по специально составленной программе. Программа составлена таким образом, чтобы, в зависимости от конкретных требований при расчете технологических схем, можно было осуществить оптимизацию по любому из следующих критериев оптимальности:

- максимальный выпуск готовой продукции;
- максимальная стоимость готовой продукции.

При расчетах эффективности грохочения нами использовались данные отчета о разведке месторождения валунно-гравийно-песчаной смеси «Бестреньское» – южный участок [9] и расчеты производительности горнотранспортного оборудования. В таблице 3 исходными данными являются размер фракции сырья, выход и содержание компонентов. Количественные соотношения компонентов, составляющих горную массу, нами рассчитаны по специальной методике [10].

Согласно расчетным данным таблицы 3, по выходу компонентов и зерновому составу технологические схемы можно рассчитывать отдельно по каждому компоненту, качественно-количественные характеристики которых рассчитаны от исходного гравийно-песчаного материала. Если содержание какого-либо компонента в исходной горной массе незначительно и не может оказать заметного влияния на соответствующую качественную характеристику готового продукта и на результаты расчета, то расчет по этому компоненту не производят.

Расчет технологической схемы завода состоит в последовательном расчете отдельных технологических операций. После расчета качественно-количественных показателей должен быть составлен баланс продуктов.

Следует отметить, что компоновка технологии каждого конкретного цеха имеет свои особенности, требующие индивидуальной разработки проекта возможного изменения линии. В целях повышения качества выпускаемой продукции (улучшения формы частиц) со второй ступени дробления необходимо применять лишь конусные дробилки, которые должны эксплуатироваться с постоянно загруженным дробильным пространством. Поэтому финальные дробилки необходимо размещать за накопительными бункерами с регулируемыми дозаторами, которые в состоянии поддерживать постоянную загрузку дробильного пространства [6, 7].

Таблица 3 – Расчет количественных составляющих исходной горной массы по месторождению валунно-гравийно-песчаной смеси «Бестреньское – южный участок» Могилевской области

Размер фракции, мм	Выход фракции, %	Содержание компонентов, %			Выход компонентов от исходного, %			Зерновой состав компонентов, %		
		прочных	слабых	глины	прочных	слабых	глины	прочных	слабых	глины
Более 70	7,2	62,2	37,1	0,7	4,48	2,67	0,05	8,06	6,55	1,36
40-70	12,5	57,8	40,2	2,0	7,22	5,03	0,25	12,99	12,35	6,78
20-40	17,7	60,3	36,1	3,6	10,67	6,39	0,63	19,20	15,68	17,07
5-20	30,5	52,6	43,3	4,1	16,04	13,20	1,25	28,87	32,40	33,88
Менее 5	32,1	53,4	41,9	4,7	17,14	13,45	1,51	30,86	33,01	40,92
	100				55,55	40,74	3,69	99,98	99,99	100,0

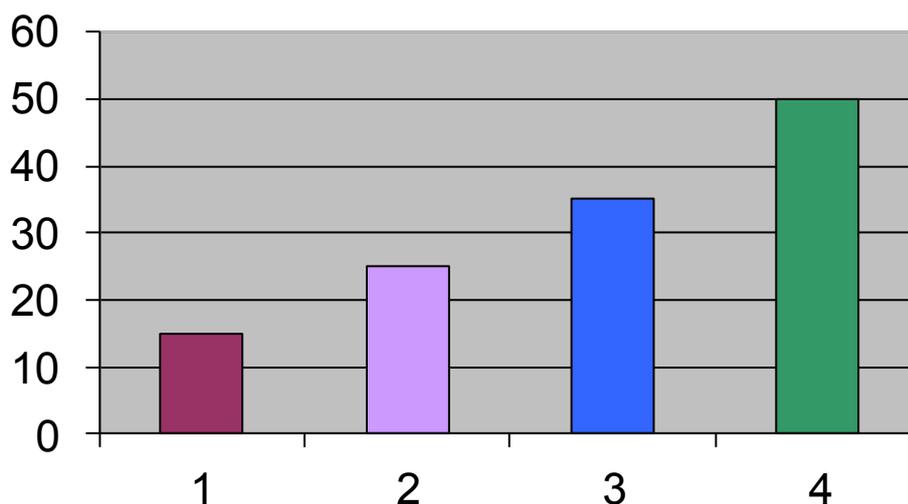


Рисунок 5 – Распределение содержания зерен пластинчатой формы в зависимости от группы щебня

Наилучшая форма частиц в продукте конусной дробилки достигается при размере частиц, близким к размеру установленного зазора. Поэтому целесообразно разделить сырье после вторичного дробления на несколько фракций и перерабатывать их отдельно в дробилках с подходящей формой дробильного пространства. Степень измельчения финальной конусной дробилки должна быть не слишком большой (до двух) [1].

Полученная нами зависимость фракционной эффективности от общей эффективности, на основе моделирования на ЭВМ при грохочении (рисунок 3), показывает, что с увеличением последней эффективность разделения по фракциям возрастает. Зависимость фракционной эффективности от класса крупности (>70 мм) (рисунок 4) показывает, что с увеличением размера фракции эффективность грохочения уменьшается. Определено, что фракционная эффективность более равномерно зависит от выхода продукта. Установлено, что с увеличением выхода продукта после грохочения от 20 до 55 мм эффективность разделения фракций уменьшается с 75% до 66%.

Также нами исследовано распределение зерен различной формы в зависимости от группы щебня (рисунок 5) после второй стадии дробления. Игольчатых и пластинчатых зерен не должно быть более 15% по весу согласно установленным в РБ стандартам.

Для контроля физико-механических характеристик испытания щебня проводят анализ: зернового состава; содержания зерен различной формы; определения марки по дробимости и истираемости; содержания зерен слабых пород; насыпной плотности; содержания пылевидных и глинистых частиц.

Порядок подготовки и проведения испытания проводился из лабораторной пробы от каждой фракции испытываемого щебня. Аналитическую пробу взвешивали и из нее выбирали зерна с отколотой поверхностью в форме призмы или многогранника, толщина и ширина которых меньше длины не более, чем в 2 раза. Соотношение размеров граней определяют при помощи штангенциркуля. Отобранные зерна взвешивают. Содержание в каждой фракции щебня различной формы определяют как отношение массы аналитической пробы к массе зерен исследуемой формы, выраженной в процентах.

Щебень, предназначенный для использования в верхних слоях покрытия автомобильных дорог, характеризуют маркой по истираемости в полочном барабане. Предел прочности сжатия щебня устанавливается по результатам определения предела прочности при сжатии горной породы, из которой он был получен.

Повышение содержания процента гравия и валунов при использовании специальных установок для выделения песка зависит от доли удаляемого песка (в долях единиц), от извлечения гравия (его потери) в мелкий продукт, % (от содержания гравия).

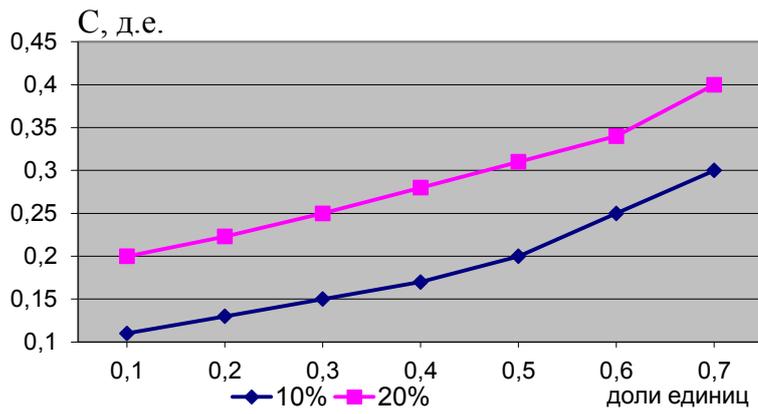


Рисунок 6 – Зависимость содержания гравия и валунов в сырье от доли извлекаемого песка

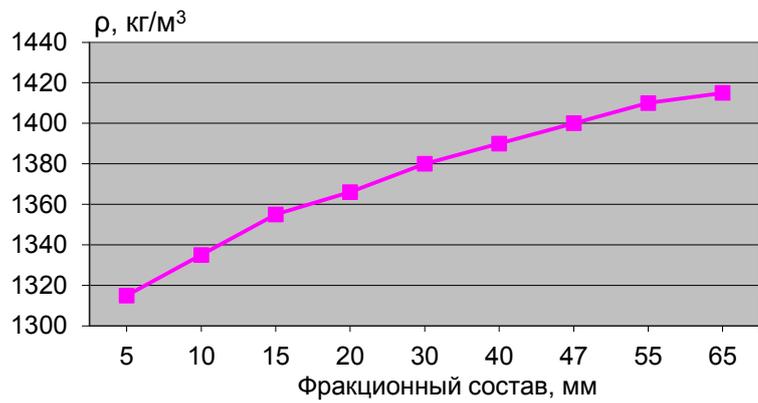


Рисунок 7 – Зависимость насыпной плотности щебня из валунов от его фракционного состава

На рисунке 6 приведена зависимость содержания гравия и валунов в сырье от доли извлекаемого песка при различных значениях содержания его в исходном сырье (10% и 20%). Среднеквадратичное отклонение содержания гравия и валунов после извлечения песка из исходного материала составляет 6-12%. При увеличении значения исходного содержания гравия и валунов сырья и повышении доли извлекаемого песка наблюдается тенденция к уменьшению величины среднеквадратичного отклонения содержания гравия и валунов в перерабатываемом сырье. Следует отметить, что, с увеличением фракционного состава щебня до 77 мм (max), насыпная его плотность достигает 1420 кг/м^3 .

Относительно малый разброс по плотности от 1320 до 1420 кг/м^3 (рисунок 7) позволяет использовать его в различных технологиях (бетон, автомобильные дороги, железнодорожные насыпи и др.), что характерно для конических дробилок.

В качестве выемочно-погрузочного оборудования в комплексах, включающих установку для выделения песка в карьере (что позволит доставлять на ДСЗ кондиционный каменный материал), возможно применение одноковшовых экскаваторов. Содержание зерен слабых пород в щебне, в зависимости от вида горной породы и марки, не должно быть согласно стандарту более 15%, что характеризуется полученными данными (рисунок 8). Данный материал может применяться для бетона марки «100».

На рисунке 9 представлена зависимость потери массы при испытании щебня из гравия от марки щебня, из которой следует, что наибольшие потери наблюдаются при переработке (получении) щебня с прочностью 40 МПа. Минимальные потери (до 10%) при марке щебня 1000.

Данные, полученные по физико-механическим свойствам получаемого щебня из валунного материала (насыпная плотность, содержание слабых зерен, потери массы щебня, распределение зерен и др.), могут быть использованы для рекомендации применения различных качественно-количественных схем при переработке горной массы (тип и производительность дробилок, грохотов и др.).

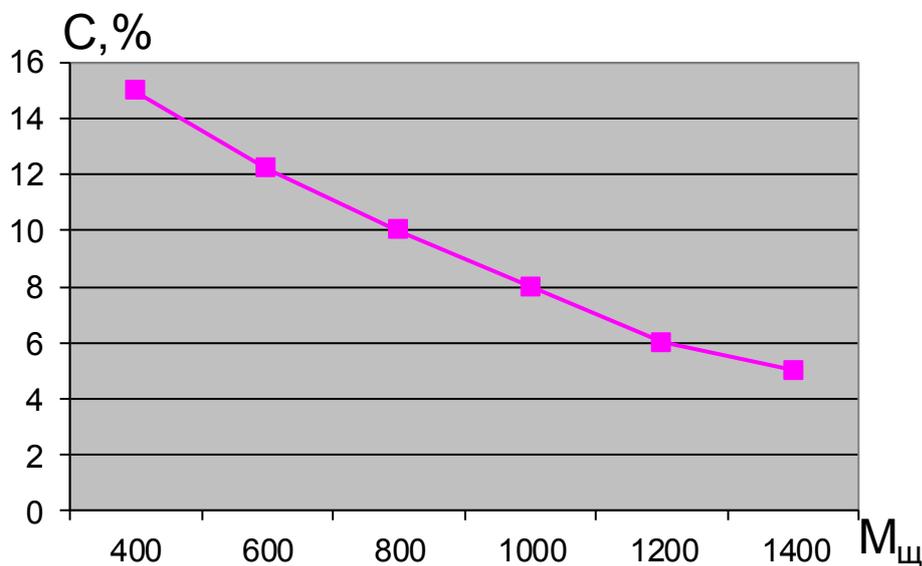


Рисунок 8 – Зависимость содержания зерен слабых пород от марки щебня по дробимости

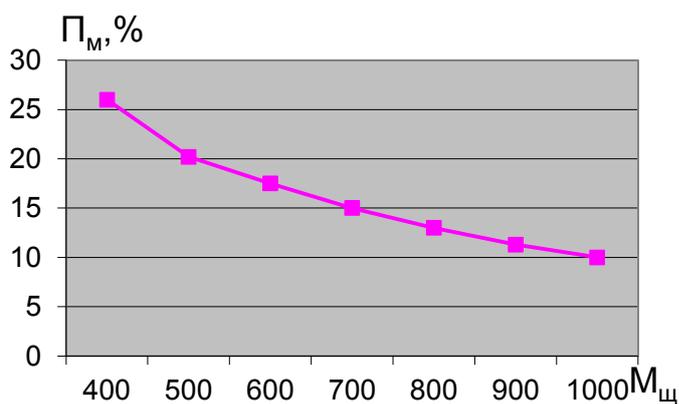


Рисунок 9 – Зависимость потери массы при испытании щебня из валунов от марки щебня

Выводы:

Проанализирована работа дробильно-сортировочных заводов РБ, которая позволила выявить некоторые недостатки применяемой технологии переработки сырья. Получены данные по фракционной эффективности после грохочения при вовлечении в переработку крупных каменных включений, а также получены новые данные по фракционной эффективности и физико-механическим свойствам щебня из валунов. Разработаны программы для расчета основных технологических параметров перерабатывающих и транспортирующих механизмов валунно-гравийно-песчаных смесей. Определены основные физико-механические свойства щебня, полученного из валунов (распределение и содержание зерен, насыпная плотность, потеря массы), который может использоваться в промышленности.

Список литературы:

1. Андреев, С.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С.Е. Андреев. – М.: Недра, 1980. – 326 с.
2. Баринава, Л.С. Современное состояние и проблемы горной промышленности строительных материалов / Л.С. Баринава // Технология, оборудование и сырьевая база горных предприятий промышленности строительных материалов: сб. докладов. – Минск, 2002. – С. 3-9.
3. Буткевич, Г.Р. Направления развития промышленности нерудных строительных материалов / Г.Р. Буткевич // Технология, оборудование и сырьевая база горных предприятий промышленности строительных материалов: сб. докладов. – Минск, 2002. – С. 9-16.
4. Вайсберг, Л.А. Основные направления совершенствования техники и технологии производства нерудных строительных материалов / Л.А. Вайсберг, О.Е. Харо // – Технология, оборудование и сырьевая база горных предприятий промышленности строительных материалов: сб. докладов. – Минск, 2002. – С. 16-22.
5. Кашпар, Л.Н. Новые технологии горных работ на песчано-гравийных карьерах / Л.Н. Кашпар, И.В. Деревяшкин // Технология, оборудование и сырьевая база горных предприятий промышленности строительных материалов: сб. докладов. – Минск: 2002. – С. 151-153.

6. Машины и оборудование обогатительных и перерабатывающих производств / П.В. Цыбуленко [и др.]. – Минск, БНТУ. – 2006. – 63 с.
7. Нисневич, М.Л. Обогащение нерудных строительных материалов / М.Л. Нисневич, Л.П. Ратьковский. – М.: Госстройиздат. – 1963. – 283 с.
8. Нормы технологического проектирования предприятий промышленности нерудных строительных материалов. – Л.: Стройиздат, 1977. – 366 с.
9. Отчет о детальной разведке месторождения ГПС «Бестреньское – южный участок» Дрибинского района, Могилевской области / С.Н. Березовский [и др.] – Могилев. – 2006. – 55 с.
10. Переработка песчано-гравийных пород для получения нерудных строительных материалов / В.В. Бердус [и др.]. – М.: Стройиздат, 1975. – 264 с.
11. Чирков, А.С. Добыча и переработка строительных горных пород: учебник для вузов / А.С. Чирков. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2006. – 623 с.