

В.П. НАДУТЫЙ, д-р техн. наук,

П.В. ЛЕВЧЕНКО,

В.В. СУХАРЕВ, канд. техн. наук

(Україна, Дніпропетровськ, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова НАН України)

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВИБРАЦИОННОГО ГРОХОТА

Введение. Процесс разделения минерального сырья по крупности широко применяется в горной, металлургической, химической и строительной промышленности, а также при переработке техногенных отходов. Машины данной технологической операции – вибрационные грохота, позволяют извлекать товарные классы крупности материала или классы с максимальным содержанием ценного компонента, при этом снижая нагрузку на дробильное и измельчительное оборудование, а соответственно их энергозатраты.

Основной проблемой при вибрационной классификации горной массы является повышение эффективности процесса при снижении энергоемкости оборудования. Проблема обостряется при разделении мелких и тонких классов крупности. В этом случае для достижения высоких технологических показателей значительно увеличивается площадь рабочих органов машин, поскольку наиболее эффективно процесс классификации данных классов крупности протекает при тонких слоях материала на просеивающей поверхности. Увеличение площади рабочих органов приводит к значительной металлоемкости машин и в таком случае для колебания классифицирующих поверхностей необходимо повышение подводимой мощности. К тому же установка и эксплуатация таких грохотов требует увеличения производственных площадей.

В Институте геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины на протяжении продолжительного периода ведутся работы по повышению эффективности процесса вибрационного разделения полезных ископаемых. В настоящее время был проведен ряд теоретических и экспериментальных исследований по поиску новых решений в области создания виброгрохотов. Было установлено, что использование вертикального расположения рабочего органа позволяет: реализовать большую площадь просеивающей поверхности при меньших габаритах грохота; улучшить компоновку вибропривода; исключить паразитные колебания, приводящие к концентрации напряжений в коробе и зонам застоя материала на просеивающей поверхности. Кроме этого, конструкция грохота будет иметь меньшую метало- и энергоемкость, в сравнении с плоскими грохотами аналогичной площади просеивающей поверхности.

Учитывая вышеизложенное, авторами разработана новая конструкция вертикального вибрационного грохота (ВВГ) [1, 2]. Конструктивная схема данной машины представлена на рис. 1, а в табл. 1 приведены ее основные технологические и конструктивные параметрами.

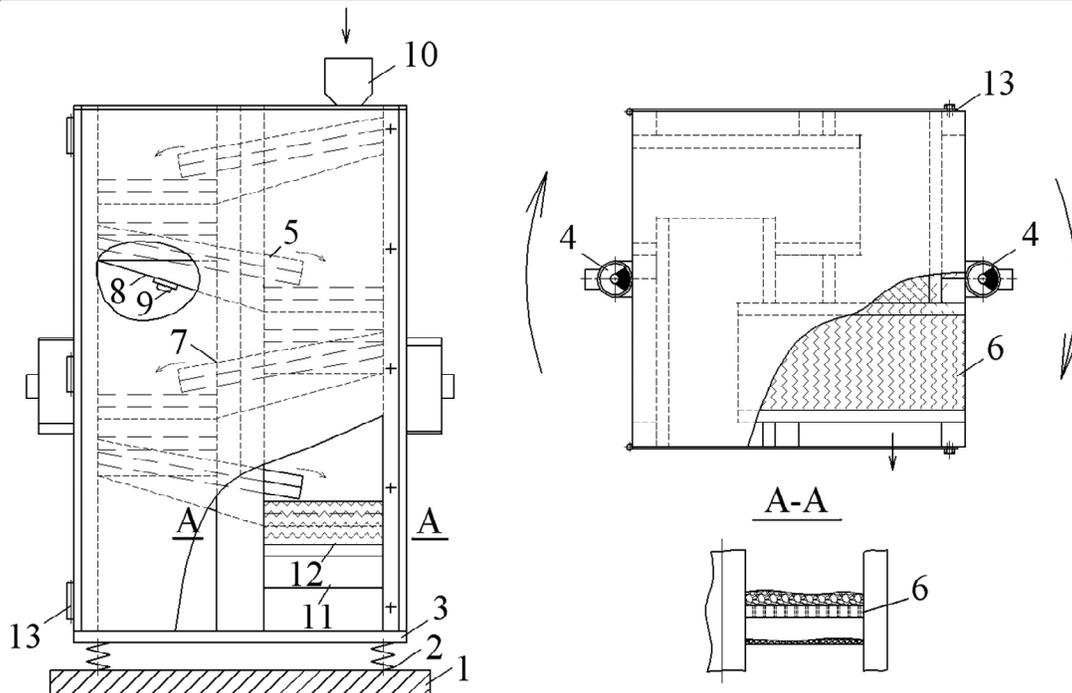


Рис. 1. Конструктивная схема вертикального вибрационного грохота:
 1 – рама; 2 – амортизаторы; 3 – несущая колонна; 4 – вибровозбудитель;
 5 – рабочий орган; 6 – карта РЛСС; 7 – механизм изменения угла наклона карт;
 8 – желоб; 9 – шиберная задвижка; 10 – приемный бункер;
 11, 12 – разгрузочная точка подрешетного и надрешетного продуктов; 13 – кожух

Таблица 1

Основные технологические и конструктивные параметры ВВГ

Производительность по исходному питанию, т/ч	3,0
Фундаментная основа	–
Количество однотипных просеивающих поверхностей, шт.	1-8
Суммарная площадь просеивающей поверхности, м ²	3,2
Минимальная крупность разделения, мкм	50
Габаритные размеры корпуса грохота, м	
– ширина	1,5
– длина	1,5
– высота	2,3
Мощность привода, кВт	2*0,53
Частота колебаний привода, Гц	25
Вес корпуса грохота, кг	800

Вертикальный вибрационный грохот состоит из опорной рамы 1, амортизаторов 2, на которых установлена несущая колонна 3, с закрепленными по бокам вибровозбудителями 4. Рабочий орган 5 представляет собой просеивающей поверхностью 6 в виде рам (с размерами 0,5×0,8 м) резонирующих ленточно-струнных сит (РЛСС), каждая секция (или несколько из них) из которых может компоноваться различным размером ячейки. Скорость движения материала вниз

Підготовчі процеси збагачення

по рабочему органу можно регулировать изменением угла наклона рам в участках пересыпа 7 с одной рамы на другую. Для разгрузки подрешетного продукта в желобе 8 применяется шиберная задвижка 9. Колонна 3 имеет приемный бункер для грохотимого материала 10 и разгрузочную течку подрешетного 11 и надрешетного 12 продуктов. С целью уменьшения запыленности рабочего помещения грохот имеет стальной герметично закрывающийся кожух 13.

Принцип работы ВВГ следующий: при работе вибровозбудителей 4 колонна 3 совершает винтовые колебания вдоль вертикальной оси, при которых на рабочей поверхности 6 реализуются пространственные колебания. Материал, загруженный в приемный бункер 10, перемещается вниз по просеивающей поверхности до разгрузочной течки 12. По пути он разделяется на несколько фракций с возможностью разгрузки через соответствующие шиберные задвижки 9, а на выходе из грохота через течку 11. Количество разделяемых фракций регулируется, уменьшением или увеличением числа рам РЛСС. При грохочении материала тонкой и особо тонкой крупности применяются стальные и латунные сетки с необходимым размером ячейки, которые укладываются на рамы с РЛСС без натяжения. Поскольку эластичные ленты нижнего сита установлены равномерно по длине рам, то дополнительное вибровозбуждение от их ударов по верхнему сити будет равномерным по всей длине рабочего органа. Амплитуда колебаний эластичных лент в 3-4 раза выше амплитуды колебаний короба грохота за счет резонансного эффекта, который реализуется совпадением частот вибропривода грохота и РЛСС с помощью частотного регулирования привода. Таким образом, интенсифицируется не вся масса короба, а только просеивающая поверхность без дополнительного подведения мощности. Кроме этого, РЛСС выполняют поддерживающую функцию, что позволяет в десять раз повысить срок эксплуатации стальных классифицирующих сеток.

Вертикальный вибрационный грохот обладает следующими преимуществами в сравнении с плоскими:

- малые габаритные размеры (1,5×1,5×2 м) наряду с высокой площадью рабочего органа (3,2 м²), а также возможностью разделения минерального сырья на несколько классов с их разгрузкой на любой высоте машины;
- долговечность и высокие технологические показатели резонирующих ленточно-струнных сит (РЛСС), амплитуда колебаний которых при работе в резонанс с виброприводом в 3-4 раза больше, чем амплитуда колебаний короба грохота. Это позволило в несколько раз уменьшить мощность привода машины (1,06 кВт вместо 3-5 кВт) и массу (0,8 т вместо 2-3 т), в сравнении с грохотами аналогичной площади просеивающей поверхности (грохоты 3 типоразмера: ГИЛ, ГИТ, ГИС, ГИСЛ);
- наличие пространственных колебаний просеивающей поверхности, при которых материал двигается в виде виброкипящего слоя, интенсивно перемешивается, сегрегирует и просеивается;
- более равномерное и полное использование площади просеивающей поверхности по его ширине;
- совмещение нескольких технологических операций в одной машине:

Підготовчі процеси збагачення

бункеризації, дозирования, транспортування і грохочення;

- отсутствие фундамента под грохот, вследствие динамического равновесия грохота при его работе;
- возможность адаптации машины к разнообразным условиям эксплуатации, путем подбора конструктивных и режимных параметров без приложения особых усилий со стороны оператора грохота, при помощи модуля управления грохотом.

Целью данной работы является разработка алгоритма расчета параметров вертикального вибрационного грохота для адаптации его работы к условиям эксплуатации с требуемыми технологическими показателями.

Для выбора и обоснования параметров грохота были проведены экспериментальные исследования ВВГ, комплекс которых состоял из четырех этапов. Первые три из них были направлены на определение влияния основных конструктивных и режимных параметров грохота, а также характеристик перерабатываемого материала на технологические показатели ВВГ [4-9]. При проведении четвертой серии экспериментов было установлено взаимное влияние трех вышеперечисленных групп варьируемых факторов на эффективность классификации (E , %) и производительность грохота по исходному питанию (Q , т/ч) [10-15]. В качестве регулируемых параметров и пределов их варьирования были приняты следующие:

- длина просеивающей поверхности ($L = 0,8 \dots 6,4$ м);
- угол наклона просеивающей поверхности ($\alpha = 4 \dots 12$ град.);
- удельная нагрузка ($q = 0,5 \dots 2$ т/ч·м²);
- размер ячейки сита ($d = 2; 3; 5$ мм);
- результирующая амплитуда колебаний короба грохота ($A = 1 \dots 4$ мм);
- частота вращения вала вибровозбудителя ($\omega = 1300 \dots 2100$ об/мин);
- угол наклона плоскости вращения дебалансных масс относительно горизонта ($\beta = 0 \dots 90$ град.);
- процентное содержание подрешетного материала в исходном продукте ($\gamma = 20 \dots 60\%$);
- плотность горной массы ($\rho = 1,4; 2; 2,6; 4,9$ г/см³);
- влажность материала ($W = 0 \dots 15\%$).

При работе грохота с заданными технологическими показателями необходим правильный подбор режимных и конструктивных параметров, при которых бы удовлетворялись технологические требования. Поэтому возникла необходимость в разработке обобщенных регрессионных зависимостей технологических показателей работы вертикального вибрационного грохота от всех доминирующих факторов и их комбинаций [16, 17]:

- для эффективности вибрационной классификации ($R^2 = 0,909$, $F = 239,3$)

Підготовчі процеси збагачення

$$\begin{aligned}
 E = & a_0 + a_1 \cdot L + a_2 \cdot q + a_3 \cdot \omega + a_4 \cdot L^2 + a_5 \cdot q^2 + a_6 \cdot \omega^2 + a_7 \cdot \alpha^2 + a_8 \cdot \beta^2 + \\
 & + a_9 \cdot \rho^2 + a_{10} \cdot W^2 + a_{11} \cdot L \cdot A + a_{12} \cdot L \cdot \omega + a_{13} \cdot L \cdot \gamma + a_{14} \cdot L \cdot \rho + a_{15} \cdot L \cdot W + \\
 & + a_{16} \cdot q \cdot A + a_{17} \cdot q \cdot \omega + a_{18} \cdot q \cdot \gamma + a_{19} \cdot q \cdot W + a_{20} \cdot \alpha \cdot \omega + a_{21} \cdot d \cdot \beta + a_{22} \cdot A \cdot \omega + \\
 & + a_{23} \cdot A \cdot \gamma + a_{24} \cdot A \cdot W
 \end{aligned} \quad (1)$$

– для производительности вертикального вибрационного грохота
($R^2 = 0,992$; $F = 1646,7$)

$$\begin{aligned}
 Q = & a_0 + a_1 \cdot q + a_2 \cdot A + a_3 \cdot \omega + a_4 \cdot L^2 + a_5 \cdot q^2 + a_6 \cdot d^2 + a_7 \cdot A^2 + a_8 \cdot \omega^2 + \\
 & + a_9 \cdot \beta^2 + a_{10} \cdot \gamma^2 + a_{11} \cdot \rho^2 + a_{12} \cdot W^2 + a_{13} \cdot L \cdot q + a_{14} \cdot L \cdot A + a_{15} \cdot L \cdot \omega + \\
 & + a_{16} \cdot L \cdot \rho + a_{17} \cdot L \cdot W + a_{18} \cdot q \cdot A + a_{19} \cdot q \cdot \omega + a_{20} \cdot q \cdot \rho + a_{21} \cdot q \cdot W + \\
 & + a_{22} \cdot d \cdot \alpha + a_{23} \cdot d \cdot A + a_{24} \cdot d \cdot \rho + a_{25} \cdot \alpha \cdot A + a_{26} \cdot \alpha \cdot \gamma + a_{27} \cdot \alpha \cdot \rho + \\
 & + a_{28} \cdot \alpha \cdot W + a_{29} \cdot A \cdot \rho + a_{30} \cdot \omega \cdot \gamma + a_{31} \cdot \omega \cdot \rho + a_{32} \cdot \omega \cdot W + a_{33} \cdot \gamma \cdot \rho + \\
 & + a_{34} \cdot \gamma \cdot W + a_{35} \cdot \rho \cdot W
 \end{aligned} \quad (2)$$

Регрессионные коэффициенты данных зависимостей представлены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные значения коэффициентов регрессии

Кoeffи- циент	Для функции E		Для функции Q		Кoeffи- циент	Для функции E		Для функции Q	
	значение	$t_{расч}$	значение	$t_{расч}$		значение	$t_{расч}$	значение	$t_{расч}$
a_0	30,555	–	1,74	–	a_{18}	-0,1915	5,5	0,1155	12,5
a_1	10,118	6,4	-0,833	10,9	a_{19}	-0,2588	4,1	0,052	17,2
a_2	18,072	3,8	-0,176	4,2	a_{20}	-0,0013	4,9	0,041	5,1
a_3	0,061	5,3	-0,0023	12,9	a_{21}	0,0393	9,8	-0,0027	2,4
a_4	-1,848	32,6	0,036	4,5	a_{22}	-0,0058	6,0	0,221	8,3
a_5	-2,22	2,2	-0,0389	2,8	a_{23}	-0,0642	2,4	0,0174	2,5
a_6	-0,002	5,9	-0,011	4,0	a_{24}	-0,1708	3,4	0,0116	2,1
a_7	0,062	2,5	0,021	7,2	a_{25}	–	–	0,0103	4,2
a_8	-0,0005	3,7	0,0001	18,9	a_{26}	–	–	-0,054	3,3
a_9	0,477	5,6	-0,0006	50,8	a_{27}	–	–	0,0048	2,5
a_{10}	-0,022	3,2	0,0035	2,5	a_{28}	–	–	0,0017	5,3
a_{11}	0,9678	4,3	-0,0345	16,7	a_{29}	–	–	0,0356	6,8
a_{12}	0,0037	4,7	-0,0019	16,6	a_{30}	–	–	-0,006	5,4
a_{13}	0,0612	3,9	0,0551	5,4	a_{31}	–	–	0,001	6,3
a_{14}	-0,6392	3,8	-0,0236	7,4	a_{32}	–	–	-0,0025	8,6
a_{15}	0,2295	8,5	-0,0001	9,5	a_{33}	–	–	0,0019	3,4
a_{16}	2,4844	3,9	-0,0172	6,2	a_{34}	–	–	0,0013	6,7
a_{17}	-0,0082	3,8	-0,0019	4,7	a_{35}	–	–	-0,0076	5,6

Для обеспечения высоких технологических показателей грохота необходимо адаптировать его параметры к условиям эксплуатации и перерабатываемому материалу. При этом многофакторные зависимости (1) и (2) позволяют определить рацио-

Підготовчі процеси збагачення

нальные или оптимальные параметры машины на модельном уровне, взамен трудоемких и материально-затратных экспериментальных работ.

Расчетная схема определения режимных и конструктивных параметров ВВГ позволяет установить следующие из них: угол наклона плоскости вращения дебалансных масс вибровозбудителя относительно горизонта; частоту вращения вала вибровозбудителя; результирующую амплитуду колебаний короба грохота; суммарную длину и угол наклона просеивающей поверхности; удельную подаваемую на грохот нагрузку. Предложено все вышеперечисленные параметры рассчитывать при заданной эффективности классификации и производительности грохота. Постоянными являются характеристики перерабатываемого материала и размер ячейки сита.

При наличии двух сит с разными ячейками выбор рациональных режимных и конструктивных параметров ВВГ сводится к следующему:

1. Исходя из технологии, задаются свойства перерабатываемого материала (ρ , W , γ_1 , γ_2) и размер ячеек классифицирующих сит (d_1 , d_2).

2. При условии, что $W \geq 6\%$ длина однотипной просеивающей поверхности задается равной $L = 3,2$ м, а если $W \leq 6\%$ то – $L = 2,4$ м. Данные значения задаются, так как экспериментально установлено, что при таких значениях длины рабочего органа достигается высокая эффективность классификации и производительность по исходному питанию.

3. Устанавливается необходимая эффективность выделения каждого из классов в подрешетный продукт (E_1 , E_2) и соответствующая производительность (Q_1 , Q_2).

4. С использованием процедуры "Поиск решений" MS Excel, с заданными выше параметрами и технологическими показателями, из уравнений (1) и (2) определяются регулируемые параметры машины: q , A , ω , β , α_1 , α_2 .

По вышеизложенной методике с заданной эффективностью грохочения ($E_i \geq 80\%$) при максимальной производительности ($Q_i \rightarrow \max$) определялись режимные параметры грохота (A , ω , β) и углы наклона соответствующих секций просеивающих поверхностей (α_i) при разделении трех типов горной массы (класс -10 мм). После чего экспериментальным путем устанавливались технологические показатели ВВГ ($E_{\text{экс}}$ и $Q_{\text{экс}}$) при расчетных значениях варьируемых параметров (табл. 3).

Таблица 3

Результаты расчета параметров ВВГ и технологических показателей												
Порода	Заданный параметр				Искомый параметр				$E_{\text{экс}}$ %	$E_{\text{расч}}$ %	$Q_{\text{экс}}$ т/ч	$Q_{\text{расч}}$ т/ч
	L_i м	q_i т/ч·м ²	d_i мм	γ %	A мм	ω об/мин	β град	α_i град				
Уголь $\rho = 1,4$ г/см ³ $W = 4\%$	1,6	2	5	45	2,5	1300	65	4	78,7	80	0,53	0,52
	2,4	2	1	13					87,7	85,7	0,5	0,52
	2,4	2	0,5	10					81	84,6	0,35	0,28
Кварцевый песок $\rho = 1,9$ г/см ³ $W = 6\%$	1,6	2	5	46	2	1300	45	4	80,2	79	0,6	0,61
	2,4	2	1	10					86,7	87,4	0,58	0,6
	2,4	2	0,5	21					82,6	81,2	0,34	0,41
Гранит $\rho = 2,5$ г/см ³ $W = 2\%$	1,6	2	5	50	1,5	1500	65	4	81,4	80	0,78	0,77
	2,4	2	1	7					85	85,7	0,73	0,71
	2,4	2	0,5	14					83,1	81,8	0,44	0,53

Из экспериментальных исследований следует, что разработанный метод определения рациональных конструктивных и режимных параметров грохота с высокой адекватностью и достоверностью прогнозируют технологические показатели работы машины (85-90%) при заданных условиях эксплуатации. Следует отметить, что за пределами изученных параметров ($d \leq 2$ мм) увеличилась ошибка предсказанных значений функций $E_{расч}$ и $Q_{расч}$ (15-25%). Таким образом, проявился главный недостаток экспериментального подхода к созданию математических и статистических моделей процесса [18].

Выводы

В результате выполненной работы разработан алгоритм расчета параметров вертикального вибрационного грохота, который позволяет с высокой точностью определять рациональные или оптимальные параметры грохота и прогнозировать технологические показатели его работы в разнообразных условиях эксплуатации. Данный метод послужит в использовании системы автоматического проектирования (САПР), а также помогут в разработке систем дистанционного управления технологическими процессами (АСУТП).

Список литературы

1. Пат. № 53632 UA, МПК⁸ В 07 В 1/40 (2006.01). Вертикальний вібраційний грохот / Надутый В.П., Левченко П.В., Кіжло Л.А.; заявник і патентовласник ІГТМ НАНУ; Заявл. 26.04.2010; Опубл. 11.10.2010, Бюл. № 19. – 3 с.
2. Пат. № 62641 UA, МПК8 В 07 В 1/40 (2006.01). Вертикальний вібраційний грохот-сушарка / Надутый В.П., Левченко П.В.; заявник і патентовласник ІГТМ НАНУ; Заявл. 24.01.2011; Опубл. 12.09.2011, Бюл. № 17. – 4 с.
3. Франчук В.П., Надутый В.П., Левченко П.В. Определение траектории движения материальной частицы по сити вертикального вибрационного грохота // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 53(94). – С. 80-86.
4. Надутый В.П., Левченко П.В. Определение зависимости эффективности грохочения от конструктивных параметров вертикального вибрационного грохота // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2011. – Вип. 45(86). – С. 43-48.
5. Надутый В.П., Левченко П.В. Влияние характеристик горной массы на эффективность классификации вертикального вибрационного грохота // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – 2011. – Вип. 93. – С. 81-86.
6. Франчук В.П., Надутый В.П., Левченко П.В. Определение зависимости эффективности грохочения от режимных параметров вертикального вибрационного грохота // Вібрації в техніці та технологіях: Всеукр. наук.-техн. журнал. – 2011. – Вып. 2(62). – С. 70-76.
7. Надутый В.П., Левченко П.В. Результаты экспериментальных исследований зависимости производительности вертикального вибрационного грохота от его конструктивных параметров // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: Укр. міжвід. наук.-техн. зб. держ. ун-ту "Львівська політехніка". – 2011. – Вип. 45. – С.24-27.
8. Надутый В.П., Левченко П.В., Хмеленко И.П. Влияние режимных параметров на производительность вертикального вибрационного грохота // Науч.-техн. сб. НТУ "ХПИ". – 2011. – Вып. № 50. – С. 114-120.
9. Надутый В.П., Левченко П.В., Хмеленко И.П. Влияние свойств горной массы на производительность вертикального вибрационного грохота // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – 2011. – Вип. 93. – С. 23-29.
10. Надутый В.П., Левченко П.В., Хмеленко И.П. Результаты исследований зависимости эффективности классификации от параметров вертикального вибрационного грохота // **Збагачення корисних копалин, 2013. – Вип. 55(96)**

Підготовчі процеси збагачення

ції в техніці та технологіях: Всеукр. наук.-техн. журнал. – 2011. – Вып. 4(64). – С. 45-48.

11. Левченко П.В. Экспериментальное определение зависимости эффективности классификации вертикального вибрационного грохота от комплекса доминирующих факторов // Науковий вісник НГУ. – 2012. – № 2. – С. 41-46.

12. Надутый В.П., Левченко П.В. Экспериментальный анализ влияния параметров просеивающей поверхности и характера загрузки на эффективность виброгрохочения // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 48(89). – С. 36-43.

13. Надутый В.П., Левченко П.В. Исследование производительности вертикального вибрационного грохота при взаимном влиянии регулируемых факторов // Зб. наук. праць ПолтНТУ (галузеve машинобудування, будівництво). – 2012. – Вип. 2 (32), т.1. – С. 171-177.

14. Левченко П.В. Производительность вертикального вибрационного грохота как комплексный показатель результатов влияния регулируемых факторов в заданных условиях // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – 2012. – Вип. 95. – С. 16-22.

15. Левченко П.В. Количественная оценка взаимного влияния параметров классификации на производительность вертикального вибрационного грохота // Сб. науч. тр. НГУ. – 2012. – Вып. 2. – С. 21-27.

16. Надутый В.П., Левченко П.В. Разработка обобщенной зависимости эффективности классификации вертикального вибрационного грохота от комплекса варьируемых параметров // Вібрації в техніці та технологіях: Всеукр. наук.-техн. журнал. – 2012. – Вып. 1(65). – С. 25-29.

17. Надутый В.П., Левченко П.В. Разработка обобщенной регрессионной зависимости производительности вертикального вибрационного грохота от варьируемых параметров // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 51(92). – С. 65-70.

18. Кухарев В.Н., Салли В.И., Эрперт А.М. Экономико-математические методы и модели в планировании и управлении: Учебник. – К.: Вища шк., 1991. – 303 с.

© Надутый В.П., Левченко П.В., Сухарев В.В., 2013

Надійшла до редколегії 20.11.2013 р.

Рекомендовано до публікації д.т.н. В.П. Франчуком