



Надутьий В. П.
д.т.н., профессор

Ягнюкова И. В.
инженер

Ягнюков В. Ф.
к.т.н., научный сотрудник

Сухарев В. В.
к.т.н., старший научный сотрудник

*Институт
геотехнической механики
им. Н.С. Полякова
НАН Украины*

УДК 622.74.913.1

ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ НА ВАЛКОВОМ ВИБРАЦИОННОМ КЛАССИФИКАТОРЕ С ГЛАДКИМИ ВАЛКАМИ ОТ ВАРЬИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ

Целью данной работы является определение аппроксимированной зависимости эффективности классификации липкого влажного материала на валковом вибрационном классификаторе от таких варьируемых режимных параметров, как частота вибровозбудителя ω , удельная нагрузка g на единицу площади, таких конструктивных параметров машины, как зазор между валками δ , угол наклона классификатора α , а также таких свойств горной массы, как ее влажность θ и насыпная плотность j .

Ключевые слова: *валковый вибрационный классификатор, гладкие валки, эффективность, вибрация, влажный и склонный к залипанию материал.*

Для прогнозирования, количественной оценки и расчета параметров валкового вибрационного классификатора с гладкими валками необходимо определить аналитический характер зависимости эффективности от исследуемых факторов. Существующие методы математического моделирования результатов исследований регрессионными зависимостями [1–3] показали высокую достоверность результатов. Их достаточность определялась методом планирования экспериментов с последующей аппроксимацией полученных зависимостей [4, 5].

Выполненный объем экспериментальных исследований по установлению зависимости эффективности валковых классификаторов (грохотов) от их режимных, конструктивных параметров и свойств горной массы позволяет адаптировать машины к конкретным условиям

эксплуатации и наметить пути их дальнейшего совершенствования [2, 3]. Недостаточно полно, учитывая требования технологии переработки горной массы, изучено влияние различных параметров классификатора и свойств перерабатываемой массы на эффективность классификации. Поэтому в работах [6, 7] были выполнены экспериментальные исследования зависимости эффективности классификации от угла наклона рабочего органа α (град.), зазора между валками Δ (мм), угловой частоты вращения вибровозбудителя ω (об/сек), влажности сыпучего материала θ (%), удельной нагрузки на классификатор g (т/ч·м²) и насыпной плотности материала γ (т/м³); графики зависимости эффективности валкового вибрационного классификатора от этих параметров изображены на рис. 1 – 2.

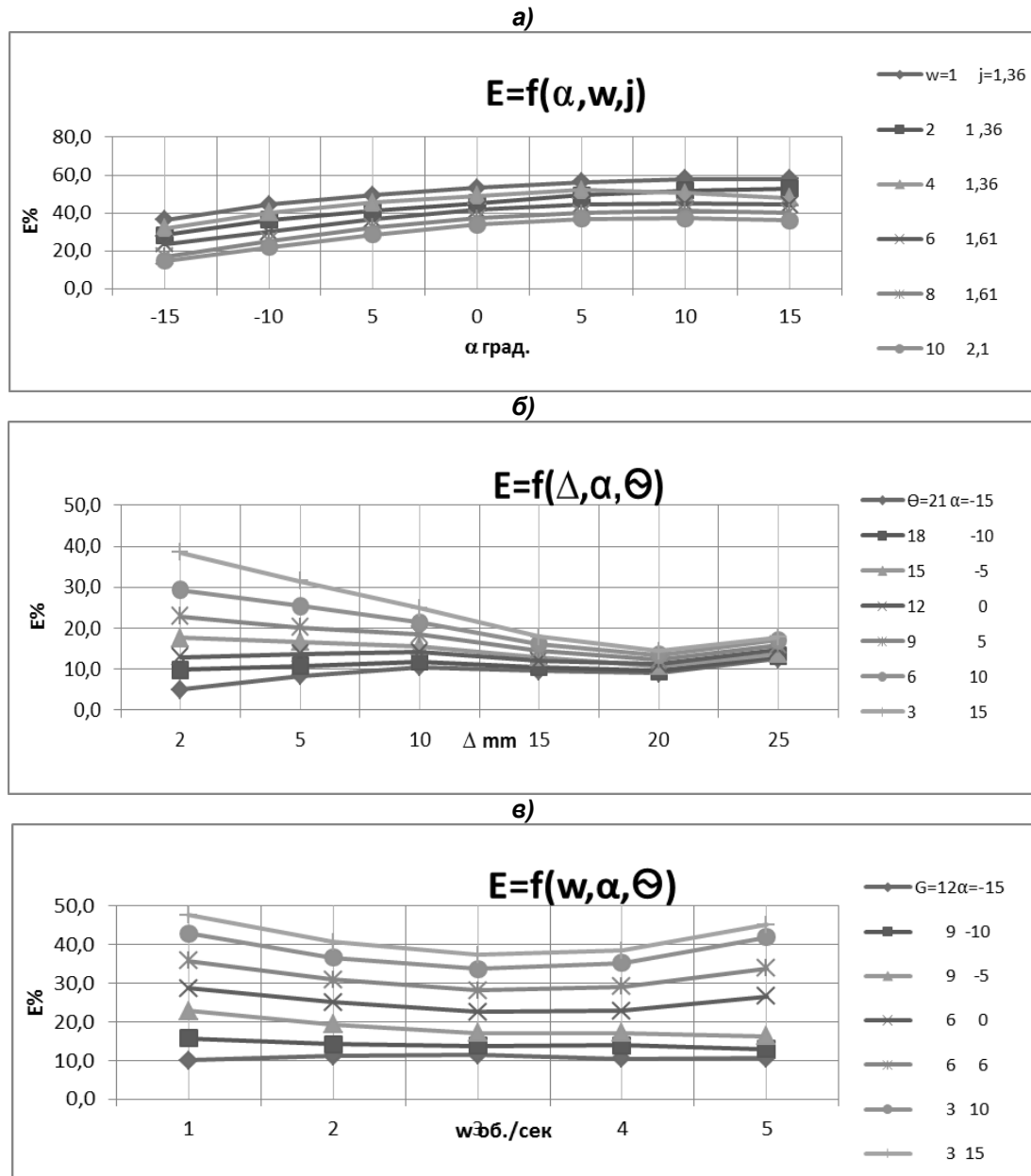
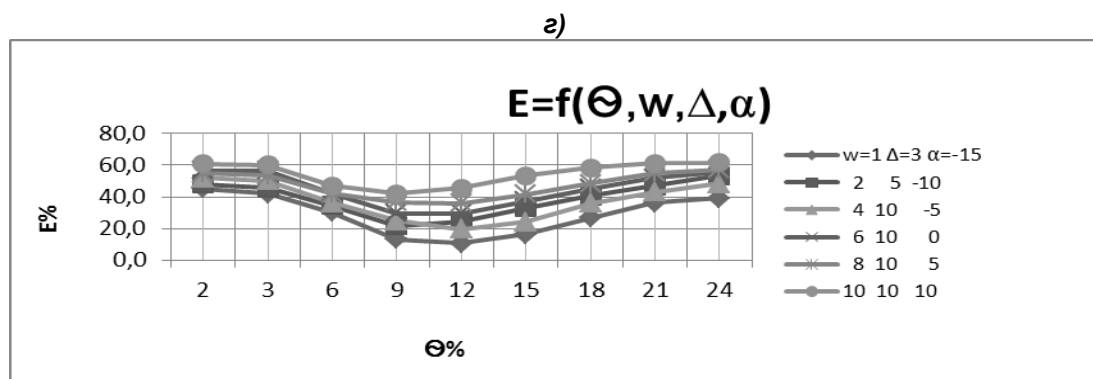


Рис. 1. Зависимость эффективности грохочения варьируемых параметров: α – угла наклона (а); Δ – зазора между валками (б), ω – частоты вращения валков (в)



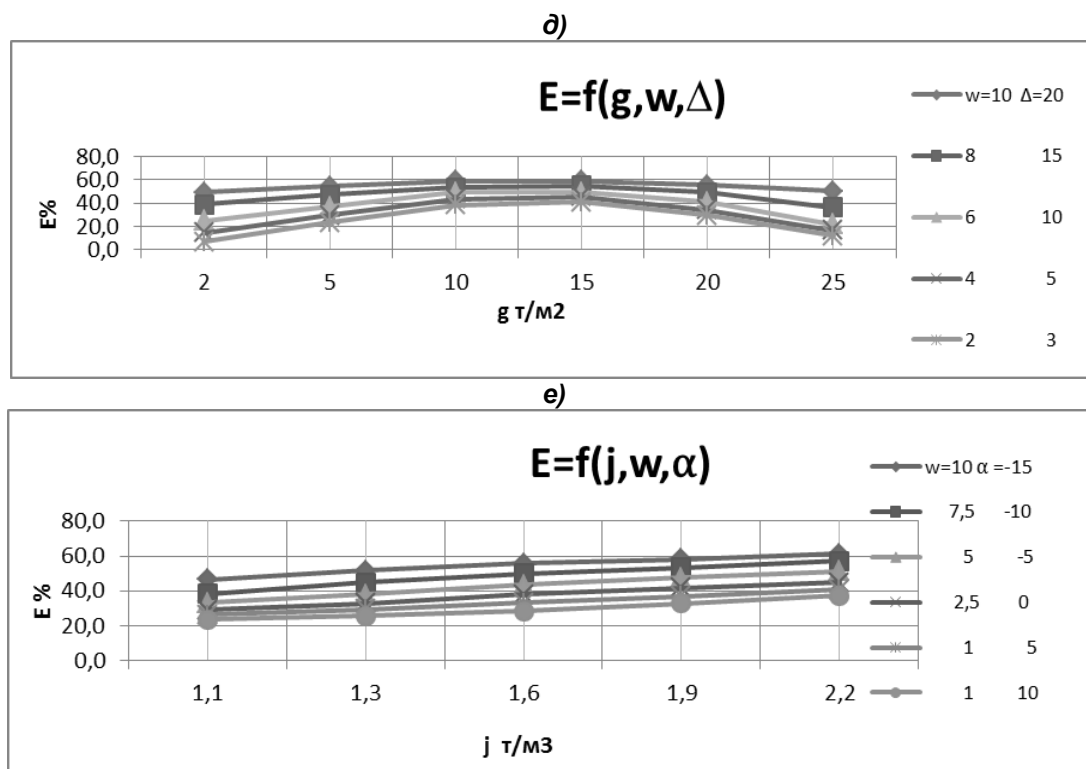
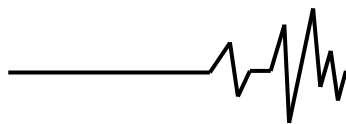


Рис. 2. Зависимость эффективности грохочения варьируемых параметров:
 θ – влажности материала (g); g – удельной нагрузки на классификатор (d);
 γ – насыпной плотности материала (e)

Их целью, кроме графического анализа, являлось определение аналитической зависимости эффективности от каждого из перечисленных факторов. Общее количество

экспериментов составило 233 наблюдения. Диапазон значений варьируемых параметров приведен в табл. 1.

Таблица 1

Варьируемые параметры при определении эффективности грохота

Параметры	α , град.	Δ , мм	ω , об/сек.	θ , %	g , т/ч·м ²	γ , т/м ³
Диапазон значений	-15 .. +15	2–25	0,5 – 10	2 – 24	1 – 25	1 – 2,5

При проведении экспериментов варьировался один из параметров как основной и два-три других дополнительных параметра, соблюдая диапазон значений, указанных в табл. 1. Это позволило выявить комплексное влияние факторных признаков на эффективность грохочения.

В случае если параметры для данного вида эксперимента являются постоянными, то их фиксированные значения принимались следующими: $\alpha = -5^\circ$, $\Delta = 10$ мм, $\omega = 2,5$ об/сек, $\theta = 3$ %, $g = 5$ т/ч·м², $\gamma = 1,36$ т/м³. Для идентификации принята многофакторная

модель, включающая, кроме линейных и квадратичных членов, произведение выбранных факторов.

Экспериментальные исследования позволили выполнить множественный регрессионный анализ. Множественный регрессионный анализ привел к получению статистической модели функционирования валкового классификатора.

При проведении экспериментальных исследований по определению эффективности валкового вибрационного классификатора в зависимости от его угла наклона и насыпной плотности перерабатываемого материала изменялись одни и те же варьируемые параметры, включая, помимо



упомянутых, еще и частоту вращения вибровозбудителя. Поэтому при построении модели регрессионной зависимости имеет смысл объединить эти два эксперимента в одну общую базу данных и построить их общую аналитическую модель.

Таким образом, основываясь на полученной из экспериментов базе данных из 72 наблюдений, экспериментальная зависимость эффективности от угла наклона и насыпной плотности материала равна:

$$E = 35,93 + 9,04\gamma - 0,01\alpha^2. \quad (1)$$

Число степеней свободы для критерия Стьюдента $\nu = 71$. Для принятого уровня значимости 0,05 $t_{\text{крит}} = 1,994$. В модель включены только те факторы, для которых коэффициент надежности параметров $t \geq 1,994$. Именно поэтому уравнение регрессии не содержит факторов частоты, так как в данных экспериментах по сравнению с квадратичным значением угла наклона и линейным входением насыпной плотности они не имеют высокой степени важности.

Коэффициент детерминации, отражающий полноту описания факторных признаков, должен находиться в интервале от 0 до 1, а вычисленное его значение в нашем случае составляет $R^2 = 0,84$ и критерий Фишера $F = 16,51$, в то время как при числе степеней свободы $\nu_1 = 9$; $\nu_2 = 62$ $F_{\text{крит.}} = 2,0401$, что значительно ниже расчетного.

Графически зависимость эффективности грохочения от угла наклона представлена на рис. 1, а, а зависимость эффективности грохочения от насыпной плотности – на рис. 2, е.

Экспериментальная зависимость эффективности от зазора между валками, учитывая также изменения влажности материала и угла наклона, имеет вид:

$$E = 11,09 + 0,02\Delta^2 - 0,08\Delta\theta. \quad (2)$$

Число степеней свободы для критерия Стьюдента $\nu = 44$. Для принятого уровня значимости 0,05 $t_{\text{крит}} = 2,015$. В модель включены только те факторы, для которых коэффициент надежности параметров $t \geq 2,015$. Вычисленные коэффициенты надежности параметров значительно превышают критическое значение (по модулю), следовательно, все факторы, включенные в модель, являются значимыми и существенно влияют на производительность классификатора. Коэффициент детерминации, отражающий полноту описания факторного признака, должен находиться в интервале от 0 до 1, а вычисленное его значение в нашем случае составляет $R^2 = 0,89$ и критерий Фишера $F = 15,02$, в то время как при числе степеней свободы $\nu_1 = 9$; $\nu_2 = 30$ (ближайшее табличное

значение для $\nu_2 = 35$) $F_{\text{крит.}} = 2,2107$, что значительно ниже расчетного.

Зависимость эффективности классификации E от частоты вращения вибровозбудителя определялась по объему выборки экспериментальных данных из 35 наблюдений при варьировании дополнительных параметров влажности материала и угла наклона. После опробования ряда регрессионных моделей была отобрана параболическая зависимость, где было учтено не только линейное влияние указанных параметров, но также их квадратичные члены и взаимные произведения. В результате выполнения t -статистики для каждого коэффициента некоторые из них были исключены из общего регрессионного уравнения как малозначимые. Только коэффициент, значение t -статистики которого превышает $t_{\text{крит}} = 2,032$ при количестве степеней свободы $\nu = 34$, обозначен в результативном уравнении:

$$E = -34,4736 + 0,1965\omega^2. \quad (3)$$

Коэффициент детерминации модели составляет $R^2 = 0,9715$, и критерий адекватности Фишера дает уровень адекватности $F = 46,66$, то есть больше $F_{\text{крит}} = 2,2821$.

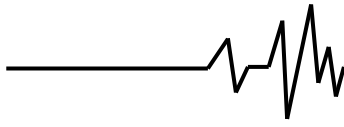
Графическая зависимость эффективности грохочения от частоты ω представлена на рис. 1, в.

Зависимость эффективности грохочения от влажности сыпучего материала определялась по экспериментальной выборке из 54 наблюдений с учетом изменений частоты, зазоров между валками и угла наклона. Из регрессионных моделей наибольшим соответствием обладает параболическая зависимость:

$$E = 79,04 - 4,61\theta + 0,2\theta^2. \quad (4)$$

По критерию Фишера подтверждена высокая адекватность модели при уровне значимости 0,05. Графически зависимость эффективности грохочения от влажности материала представлена на рис. 2, г. Из рисунка видно, что по мере увеличения влажности эффективность грохочения снижается, причем, начиная с влажности $\theta = 6$ %, это уменьшение становится весьма существенным.

Для определения зависимости эффективности грохочения от удельной нагрузки на классификатор объем выборки составил 30 наблюдений, и из возможного ряда



регрессионных моделей выбрана параболическая зависимость:

$$E = 36,54 + 4,79g - 0,18g^2. \quad (5)$$

Коэффициенты регрессии имеют высокий уровень значимости при коэффициенте регрессионной модели $R^2 = 0,94$; критерий Фишера подтверждает хорошую адекватность модели при уровне значимости 0,05.

Графически полученная зависимость представлена на рис. 2, д. Из рисунка видно, что при значениях g от 10 т/ч·м² до 15 т/ч·м² показатели эффективности имеют свои максимальные значения, а при больших или меньших отклонениях от этого диапазона эффективность снижается.

Выполненный объем исследований позволяет получить обобщенную модель зависимости эффективности грохочения валкового вибрационного классификатора с гладкими обрезиненными валками от его конструктивных, технологических параметров и свойств горной массы, поскольку именно такая модель может дать интегральную оценку работы машины и позволит подобрать рациональные ее параметры при проектировании или адаптации к конкретным условиям эксплуатации.

Список использованных источников

1. Надутый В.П. Аппроксимация зависимости производительности валкового вибрационного классификатора от его геометрических параметров и плотности сыпучей массы / В.П. Надутый, В.Ф. Ягнюков // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / Институт геотехнической механики НАН Украины. – Днепропетровск, 2004. – Вып. 47. – С. 38-42.

2. Надутый В.П. Моделирование влияния параметров валкового вибрационного классификатора на производительность / В.П. Надутый, В.Ф. Ягнюков // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Інститут геотехнічної механіки НАН України. – Дніпропетровськ, 2002. – Вип. 30. – С. 162-171.

3. Надутый В.П. Обобщенная модель работы валкового вибрационного классификатора с учетом режимных и конструктивных параметров / В.П. Надутый, А.М. Эрперт, В.Ф. Ягнюков // Геотехническая механика : Межвед. сб. научн. тр. / Институт геотехнической механики НАН Украины. – Днепропетровск, 2004. – Вып. 48. – С. 286-290.

4. Полулях А.Д. Математическое моделирование технологических процессов классификации углей на грохотах / А.Д.

Полулях // Уголь Украины. – 1997. – № 12. – С. 47-48.

5. Вероятность и математическая статистика / Гл. ред. Ю.В. Прохоров. Большая Российская Энциклопедия. – М., 1999. – 910 с.

6. Надутый В.П. Результаты экспериментальных исследований валкового вибрационного классификатора в зависимости от его конструктивных параметров / В.П. Надутый, В.Ф. Ягнюков, И.В. Ягнюкова // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2016. – Вып. 126. – С. 4–15.

7. Ягнюкова И.В. Результаты экспериментальных исследований влияния режимных и конструктивных параметров на эффективность валкового виброударного классификатора при переработке влажной липкой горной массы / И.В. Ягнюкова // Матер. XV Міжнар. наук.-техн. конф. «Вібрації в техніці та технологіях». Полтава // Вибрации в технике и технологиях. – 2016. – Вып. 3 (83). – С. 166–174.

8. Надутый В.П. Определение влияния конструктивных параметров вибрационного валкового классификатора на технологические показатели / В.П. Надутый, В.Ф. Ягнюков, Л.Н. Прокопишин // Матер. Междунар. XI науч.-техн. конф. "Теория и практика процессов дробления, разделения, смешения и уплотнения материалов". Одесса – п. Затока. / Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут": Зб. наук. праць. – Харків: НТУ "ХПІ", 2003. – № 17. – С. 75-78.

9. Кухарев В.Н. Экономико-математические методы и модели в планировании и управлении / В.Н. Кухарев, В.И. Салли, А.М. Эрперт. – К.: Вища школа, 1991. – 240 с.

10. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента / Ю.П. Адлер. – М.: Металлургия, 1969. – 240 с.

Список источников в транслитерации

1. Nadutyu V.P. Approksimatsiya zavisimosti proizvoditelnosti valkovogo vibratsionnogo klassifikatora ot yego geometricheskikh parametrov i plotnosti sypuchey massy / V.P. Nadutyu, V.F. Iagniuikov // Geotechnical Mechanics: Mijvid. zb. nauk. pr. IGTM NAS of Ukraine. – Dnepropetrovsk. – № 47. – 2004. – pp. 38-42.

2. Nadutyu V.P. Modelirovaniye vliyaniya parametrov valkovogo vibratsionnogo klassifikatora na proizvoditelnost / V.P. Nadutyu, V.F. Iagniuikov // Geotechnical Mechanics: Mijvid.



zb. nauk. pr. IGTM NAS of Ukraine. – Dnepropetrovsk. – № 30. – 2002. – pp. 162-171.

3. Naduty V.P. Obobshennaya model raboty valkovogo vibratsionnogo klassifikatora s uchetom rejnyh i konstruktivnyh parametrov / V.P. Naduty, A.M. Erpert, V.F. Iagnikov // Geotechnical Mechanics: Mijvid. zb. nauk. pr. IGTM NAS of Ukraine. – Dnepropetrovsk. – № 48. – 2004. – pp. 286-290.

4. Poluliah A.D. Metematischeskoye modelirovaniye tehnologicheskikh protsessov klassifikatsii ugley na grohotah / A.D. Полулях // Coal of Ukraine. – 1997. – № 12. – pp. 47-48.

5. Veroyatnost i matematicheskaya statistika / U.V. Prohorov. The Great Russian Encyclopedia. – Moscow, 1999. – 910 p.

6. Naduty V.P. Rezultaty eksperimentalnyh issledovaniy valkovogo vibratsionnogo klassifikatora v zavisimosti ot yego konstruktivnyh parametrov / V.P. Naduty, V.F. Iagnikov, I.V. Iagnikova // Geotechnical Mechanics: Mijvid. zb. nauk. pr. IGTM NAS of Ukraine. – Dnepropetrovsk. – № 126. – 2016. – pp. 4-15.

7. Iagnikova I.V. Rezultaty eksperimentalnyh issledovaniy vliyaniya rejymnyh i konstruktivnyh parametrov na effektivnost valkovogo vibroudarnogo klassifikatora pri pererabotke vlajnoy lipkoy gornoy massy / I.V. Iagnikova // Scientific and technical journal "Vibrations in technics and technologies". – 2016. – №3 (83). – pp. 166-174.

8. Naduty V.P. Opriedeleniye vliyaniya konstruktivnyh parametrov vibratsionnogo valkovogo klassifikatora na tehnologicheskiye pokazateli / V.P. Naduty, V.F. Iagnikov, L.N. Prokopishin // Visnyk NTU «HPI». – 2003. - №17. – pp. 75-78.

9. Kuhariev V.N. Ekonomiko-matematischeskiye metody i modeli v planirovani i upravlenii / V.N. Kuhariev, V.I. Salli, A.M. Erpert. – Kyiv, 1991. – 240 p.

10. Adler Yu.P. Vvedeniye v planirovaniye eksperimenta / Yu.P. Adler. – Moscow: Metallurgy, 1969. – 240 p.

ЗАЛЕЖНІСТЬ ЕФЕКТИВНОСТІ КЛАСИФІКАЦІЇ НА ВАЛКОВОМУ ВІБРАЦІЙНОМУ КЛАСИФІКАТОРІ З ГЛАДКИМИ ВАЛКАМИ ВІД ЗМІННИХ ПАРАМЕТРІВ

Анотація. Метою даної роботи є визначення апроксимованої залежності ефективності класифікації липкого вологого матеріалу на валковому вібраційному класифікаторі від таких змінних режимних параметрів, як частота віброзбудника ω , питоме навантаження g на одиницю площі, таких конструктивних параметрів машини, як зазор між валками δ , кут нахилу класифікатора α , а також таких властивостей гірської маси, як її вологість θ і насипна щільність j .

Ключові слова: валковий вібраційний класифікатор, гладкі валки, ефективність, вібрація, вологий і схильний до залипання матеріал.

THE DEPENDENCE OF THE EFFICIENCY OF CLASSIFICATION ON A ROLLER VIBRATING CLASSIFIER WITH SMOOTH ROLLERS ON THE VARIABLE PARAMETERS

Annotation. The purpose of this study is to determine the approximated dependence of the efficiency of classification of sticky wet material on the roller vibrating classifier on such variable mode parameters as the frequency of the exciter ω , the specific load g per unit area, such design parameters of the machine as the gap between the rollers δ , the angle of inclination of the classifier α , and such properties of the mined rock as its moisture content θ and bulk density j .

Key words: roller vibrating classifier, smooth rollers, efficiency, vibration, damp and prone to sticking material.

Сведения об авторах

Надуть Владимир Петрович – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом Механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С.Полякова НАН Украины (ул. Симферопольская, 2а, г. Днепр, Украина, 49005, e-mail: nadutyvp@yandex.ua, тел.: 46-24-56).

Ягнукова Ирина Владимировна – инженер отдела Механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С.Полякова НАН Украины (ул. Симферопольская, 2а, г. Днепр, Украина, 49005, e-mail: yagnukova@gmail.com).

Ягнуков Владимир Федорович – кандидат технических наук, научный сотрудник отдела Механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С.Полякова НАН Украины (ул. Симферопольская, 2а, г. Днепр, Украина, 49005, e-mail: astasdnep@rambler.ru).



Сухарев Віталій Витальєвич – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу Механіки машин і процесів переробки мінерального сировини, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С.Полякова НАН України (ул. Симферопольська, 2а, г. Дніпро, Україна, 49005, e-mail: agnivik@ukr.net).

Надуть Володимир Петрович – доктор технічних наук, професор, завідувач відділом Механіки машин і процесів переробки мінеральної сировини, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (вул. Симферопольська, 2а, м. Дніпро, Україна, 49005, e-mail: nadutyvp@yandex.ua, тел.: 46-24-56).

Ягнукова Ірина Володимирівна – інженер відділу Механіки машин і процесів переробки мінеральної сировини, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (вул. Симферопольська, 2а, м. Дніпро, Україна, 49005, e-mail: yagnyukova@gmail.com).

Ягнуков Володимир Федорович – кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу Механіки машин і процесів переробки мінеральної сировини, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (вул. Симферопольська, 2а, м. Дніпро, Україна, 49005, e-mail: astasdnepr@rambler.ru).

Сухарєв Віталій Віталійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу Механіки машин і процесів переробки мінеральної сировини, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (вул. Симферопольська, 2а, м. Дніпро, Україна, 49005, e-mail: agnivik@ukr.net).

Naduty Volodymyr – Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (St. Simferopol, 2a, Dnipro, Ukraine, 49005, e-mail: nadutyvp@yandex.ua).

Iagnyukova Iryna – Engineer of Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (St. Simferopol, 2a, Dnipro, Ukraine, 49005, e-mail: yagnyukova@gmail.com).

Iagnyukov Volodymyr – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Researcher, Researcher of Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (St. Simferopol, 2a, Dnipro, Ukraine, 49005, e-mail: astasdnepr@rambler.ru).

Suharyev Vitaliy – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher of Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (St. Simferopol, 2a, Dnipro, Ukraine, 49005, e-mail: agnivik@ukr.net).