

УДК 622.74.913.1

Надутый В.П., д-р техн. наук, профессор
Ягнюков В.Ф., канд. техн. наук
Ягнюкова И.В., магистр
(ИГТМ НАН Украины)
Егурнов А.И., канд. техн. наук
(ООО «Ана-Темс»)

**АППРОКСИМАЦИЯ ЗАВИСИМОСТИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
ВАЛКОВОГО ВИБРАЦИОННОГО КЛАССИФИКАТОРА С
ГЛАДКИМИ ВАЛКАМИ ОТ ВАРЬИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ**

Надутый В.П., д-р техн. наук, професор
Ягнюков В.Ф., канд. техн. наук
Ягнюкова І.В., магістр
(ІГТМ НАН України)
Єгурнов О.І., канд. техн. наук
(ТОВ «Ана-Темс»)

**АПРОКСИМАЦІЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПРОДУКТИВНОСТІ ВАЛКОВОГО
ВІБРАЦІЙНОГО КЛАСИФІКАТОРА З ГЛАДКИМИ ВАЛКАМИ ВІД
ЗМІННИХ ПАРАМЕТРІВ**

Naduty V.P., D.Sc. (Tech.), Professor
Iagniukov V.F., Ph.D. (Tech.)
Iagniukova I.V., M.S (Tech)
(IGTM NAS of Ukraine)
Yegurnov A.I., Ph.D. (Tech.)
(LLC «Ana-Tems»)

**APPROXIMATION OF INTERDEPENDENCE BETWEEN
PRODUCTIVITY OF THE ROLLER VIBRATING CLASSIFIER WITH
SMOOTH ROLLERS AND VARIABLE PARAMETERS**

Аннотация. В данной статье приведена аппроксимация и идентификация результатов экспериментальных исследований по влиянию режимных и конструктивных параметров валкового вибрационного классификатора, а также свойств горной массы, на его производительность. Среди влияющих факторов были учтены такие режимные параметры валкового вибрационного классификатора, как угловая частота вибровозбудителя и удельная нагрузка материала на единицу площади просеивающей поверхности, такие конструктивные параметры, как угол наклона и зазор между валками, такие свойства горной массы, как ее влажность и насыпная плотность. Исследования позволили получить регрессионные зависимости производительности валкового вибрационного классификатора от различных варьируемых параметров, что в дальнейшем упростит настройку горной машины под конкретно заданные цели переработки минерального сырья.

Ключевые слова: аппроксимация, экспериментальные исследования, гладкие валки, валковый вибрационный классификатор, производительность.

Введение. Для каждого компонента системы существует функциональная связь между параметрами входных воздействий (конструктивные и режимные параметры, свойства горной массы) и выходными характеристиками (технологические показатели). Иногда вид функциональной зависимости может быть легко выявлен. Однако для некоторых компонентов удастся получить лишь экспериментальные данные по входным параметрам и выходным характеристикам.

В этом случае вводится некоторая гипотеза о характере функциональной зависимости, то есть аппроксимация ее некоторым математическим уравнением. Поиск математических зависимостей между двумя или более переменными по собранному данным может выполняться с помощью методов регрессионного, корреляционного или дисперсионного анализа.

Вид математического уравнения задает исследователь. Затем методом регрессионного анализа вычисляются коэффициенты уравнения. Приближение кривой к экспериментальным данным оценивается по критерию наименьших квадратов.

Для выяснения того, насколько точно выбранная зависимость согласуется с опытными данными, используется корреляционный анализ.

Для прогнозирования, количественной оценки и расчета параметров классификатора необходимо определить аналитический характер зависимости производительности 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].

Результаты экспериментальных исследований. Графики, приведенные далее, отражают зависимость удельной производительности валкового вибрационного классификатора Q ($m^3 \cdot m^{-2}$) от следующих шести варьируемых параметров: α – угол наклона классификатора, град. ($-15 \dots +15$); Δ – зазор между валками, мм ($2 \dots 25$); ω – угловая частота вращения вибровозбудителя, об/с ($0,5 \dots 10$); θ – влажность материала, % ($3 \dots 18$); g – удельная нагрузка, $m^3 \cdot m^{-2}$ ($1 \dots 25$); γ – насыпная плотность материала, m^3 ($1 \dots 2,15$).

Метод исследований. По результатам экспериментальных исследований, численные значения которых приведены в [6], были построены графики зависимости удельной производительности валкового вибрационного классификатора от этих параметров (рис. 1-2). Анализ графиков показал, что эти зависимости можно описать параболическими моделями вида:

$$Q = a + b_1x + b_2x^2, \quad (1)$$

где x – варьируемый параметр; a, b_1, b_2 – постоянные коэффициенты.

Для многофакторных моделей кроме линейного и квадратичного члена может быть учтен член, содержащий произведение факторов:

$$Q = a + b_1x_1 + b_2x_1^2 + c_1x_2 + c_2x_2^2 + dx_1x_2, \quad (2)$$

где c_1, c_2, d – постоянные коэффициенты; x_1, x_2 – варьируемые параметры.

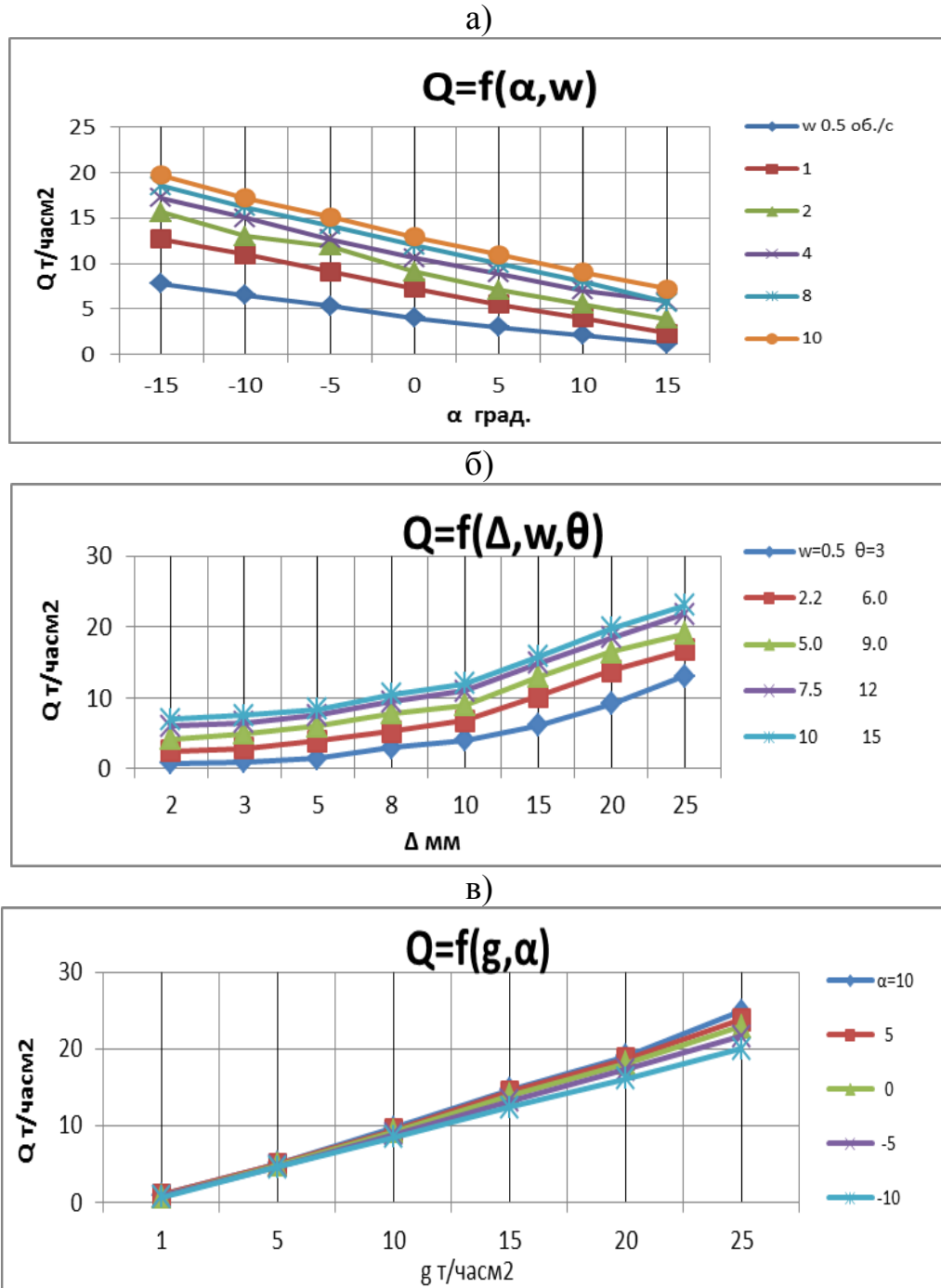


Рисунок 1 - Результаты экспериментальных исследований зависимости производительности валкового вибрационного классификатора с гладкими валками от угла наклона (а), зазора между валками (б), удельной нагрузки (в)

В ряде случаев, когда коэффициент d является незначимым, исследование ограничивалось только параболическими зависимостями, а если незначимыми оказались коэффициенты при квадратичных членах, то соответствующие слагаемые были исключены из модели.

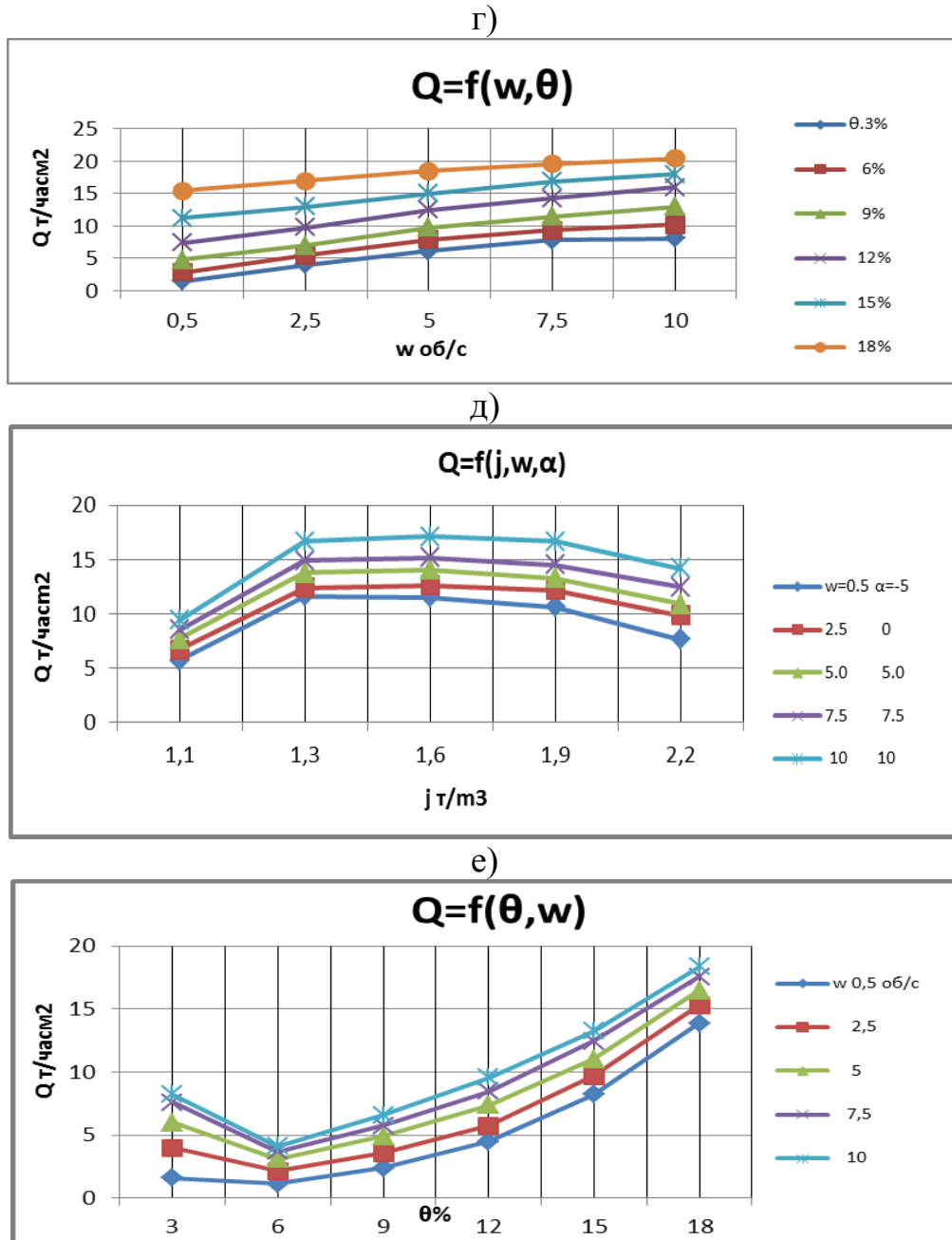


Рисунок 2 – Результаты экспериментальных исследований зависимости производительности валкового вибрационного классификатора с гладкими валками от частоты вращения вибровозбудителя (ϱ), насыпной плотности (ρ) и влажности материала (e)

Для этого при заданном уровне значимости 0,05 и критическом значении статистики Стьюдента $t_{крит.}$ определялись коэффициенты надежности каждого слагаемого уравнения, и из полученной модели исключались малозначащие факторы. Их исключение незначительно сокращает коэффициент детерминации R^2 , в то же время заметно улучшалась адекватность модели в соответствии с критерием адекватности Фишера F [7–9], [Адлер Ю.П., 1969], рассчитываемого

по формуле:

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{n - m - 1}{m}. \quad (3)$$

Расчетное значение F сравнивалось с критическим значением $F_{крит}$, определяемого из распределения Фишера при заданном уровне значимости ($\alpha = 0,05$) и в степенях свободы $v_1 = m$; $v_2 = n - m - 1$. При $F \geq F_{крит}$ считаем, что модель адекватно описывает изучаемый процесс.

Параметры экспериментальной зависимости должны удовлетворять критерию наименьших квадратов:

$$F_{кв} = \sum_{i=1}^n (Y_i - a - b_1 X_{1i} - b_2 X_{2i} \dots b_m X_{mi})^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

где Y – результирующий признак (удельная производительность грохота Q); X_i , ($i = 1, 2, \dots, m$) – факторные признаки (параметры грохота, квадраты параметров и их произведения); n – объем выборки.

Минимизируя критерий, получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\sum Y_i}{n} = a + b_1 \frac{\sum X_{1i}}{n} + b_2 \frac{\sum X_{2i}}{n} + \dots b_m \frac{\sum X_{mi}}{n}; \\ \frac{\sum Y_i X_{1i}}{n} = a \frac{\sum X_{1i}}{n} + b_1 \frac{\sum X_{1i}^2}{n} + b_2 \frac{\sum X_{2i} X_{mi}}{n} + \dots b_m \frac{\sum X_{mi} X_{1i}}{n}; \\ \frac{\sum Y_i X_{mi}}{n} = a \frac{\sum X_{mi}}{n} + b_1 \frac{\sum X_{1i} X_{mi}}{n} + b_2 \frac{\sum X_{2i} X_{mi}}{n} + \dots b_m \frac{\sum X_{mi}^2}{n}. \end{cases} \quad (5)$$

Искомые коэффициенты зависимости $a, b_j, j = 1, 2, \dots, m$ получаем из решения этой системы уравнений.

Значимость влияния каждого отдельного факторного признака на результирующий измерялась с помощью коэффициента надежности соответствующего параметра зависимости $t_a, t_{bj}; j = 1, 2, \dots, m$. Коэффициенты надежности вычислялись по формулам:

$$t_a = \frac{|a|}{S_a}; \quad t_{bj} = \frac{|b_j|}{S_{bj}}; \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (6)$$

где S_a, S_{bj} – ошибки коэффициентов (параметров) экспериментальной зависимости.

Вычисленные значения коэффициентов надежности сравнивались с критическим значением $t_{\text{крит.}}$, которое определяли из распределения Стьюдента при заданном уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $\nu = n - m - 1$. Если $t \geq t_{\text{крит.}}$, то коэффициент модели является значимым, и соответствующий ему факторный признак значимо оказывает влияние на результативный. Если $t < t_{\text{крит.}}$, то соответствующий факторный признак без ущерба для полного описания зависимости исключался из модели [1, 9]. Для выполнения расчетов на компьютере использовались электронные таблицы MS Excel, в которых имеется встроенная функция ЛИНЕЙН(...).

Анализ результатов экспериментальных исследований. Результаты экспериментальных исследований зависимости удельной производительности валкового вибрационного грохота от одного из шести параметров при фиксированных и варьируемых значениях других представлены на рис. 1 - 2. В дальнейшем по описанной выше методике получены экспериментальные зависимости для каждого рисунка. Объединение баз данных всех полученных зависимостей для определения обобщенной зависимости, учитывающей вариацию всех шести параметров ($m = 6$), выполнено в дальнейших исследованиях авторов. При наличии общих варьируемых параметров в нескольких рисунках их базы данных объединялись и рассчитывались зависимости по этим базам данных.

На рис. 1 - 2, *а, б, в, г, д, е* показана зависимость производительности классификатора от угла наклона классификатора α ($-15 \dots +15$, град.), зазора между валками Δ ($2 \dots 25$, мм), удельной нагрузки g ($1 \dots 25$, т/ч·м²), частоты вибро-возбудителя ω ($0,5 \dots 10$, об/сек), насыпной плотности γ ($1 - 2,15$, т/м³) и влажности материала θ ($3 \dots 18$, %). При этом была получена серия кривых, отражающих влияние одного из указанных факторов как основного, при влиянии одного или более других – как сопутствующих. В случае, если параметры для данного вида эксперимента являются постоянными, то их фиксированные значения принимались такими: $\alpha = -5^\circ$, $\Delta = 10$ 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 линейного и квадратичного членов, произведение факторов в виде:

$$Q = a + b_1x_1 + b_2x_1^2 + c_1x_2 + c_2x_2^2 + dx_1x_2. \quad (7)$$

Основываясь на полученной из экспериментов базе данных, экспериментальная зависимость производительности от угла наклона и частоты вибро-возбудителя имеет вид:

$$Q = 4,6163 - 0,3089\alpha + 1,9137\omega - 0,1006\omega^2 - 0,0139\alpha\omega. \quad (8)$$

Число степеней свободы для критерия Стьюдента $\nu = 43$. Для принятого уровня значимости $0,05$ $t_{\text{крит}} = 2,0217$. В модель включены только те факторы,

для которых коэффициент надежности параметров $t \geq 2,017$. Вычисленные коэффициенты надежности параметров следующие:

$$t_{\alpha} = -12,265; \quad t_{\omega} = 10,365; \quad t_{\omega^2} = -5,688; \quad t_{\alpha\omega} = -3,112.$$

Они 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 $R^2 = 0,9605$ и критерий Фишера $F = 102,728$, в то время как при числе степеней свободы $\nu_1 = 5$, $\nu_2 = 40$ $F_{\text{крит.}} = 2,45$, что значительно ниже расчетного. Все это свидетельствует о высоком уровне адекватности полученной зависимости. Ее анализ показывает, что с увеличением α производительность снижается (т. к. коэффициент уравнения при α – отрицательный), а с увеличением ω – возрастает. Однако наличие квадратичного слагаемого и слагаемых, содержащих произведение факторов, изменяет характер зависимости, т. е. не на всем пространстве значений факторов направленность изменения производительности определяется линейными членами. Так, например, по фактору частоты ω зависимость имеет параболический характер. Отклонение зависимости производительности классификатора Q от частоты вращения валков от линейной зоны объясняется сильным взаимодействием факторов ω и α . Выполненные исследования проводились с сыпучим материалом средней плотности $\gamma = 1,36 \text{ г/см}^3$ (известняк).

Практический интерес также представляют аналогичные исследования зависимости производительности от такого конструктивного параметра как зазор между валками Δ . Результаты экспериментальных исследований, аналогичные предыдущим, зависимости производительности от зазора Δ представлены на рис. 1, б, и на их основе получена идентификационная модель:

$$Q = 0,0543 + 0,0041\Delta^2 - 0,7793\omega^2 - 0,1731\Delta\omega + 0,1536\Delta\theta + 0,8168\omega\theta. \quad (9)$$

Число степеней свободы для критерия Стьюдента $\nu = 30$, при уровне значимости $\alpha = 0,05$ $t_{\text{крит.}} = 2,0423$ и при следующих коэффициентах надежности параметров полученной зависимости:

$$t_{\Delta^2} = 3,7327; \quad t_{\omega^2} = -3,3773; \quad t_{\Delta\omega} = -3,5152; \quad t_{\Delta\theta} = -3,8944; \quad t_{\omega\theta} = 2,4184.$$

Поскольку коэффициенты надежности либо больше критического значения, либо достаточно близки к нему, то факторы, включенные в модель, являются значимыми. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,9973$, а критерий Фишера $F = 610,1034$, в то время как при числе степеней свободы $\nu_1 = 8$; $\nu_2 = 30$ $F_{\text{крит.}} = 2,27$. Это свидетельствует о высоком уровне адекватности идентификационной модели [1].

Полученная модель отражает такой же характер зависимости производительности валкового классификатора от параметров, что и предыдущая. Отличие состоит лишь в том, что зависимость Q от ω и Δ здесь не линейная, а только квадратичная.

Результаты экспериментальных исследований с сыпучей массой такой же плотности $\gamma = 1,36 \text{ г/см}^3$ (известняк), но в зависимости от другого основного варьируемого параметра удельной нагрузки g , представлены на рис. 1, в, где также изучалась зависимость производительности Q от угла наклона α при значениях остальных параметров, зафиксированных на прежнем уровне. Идентификационная модель получена при числе степеней свободы для критерия Стьюдента $\nu = 24$ и $t_{\text{крит}} = 2,0639$ в следующем виде:

$$Q = 0,0616 + 0,8992g - 0,0083g\alpha. \quad (10)$$

В модель включены факторы, для которых коэффициент надежности больше критического:

$$t_g = 18,55; \quad t_{g\alpha} = -4,53.$$

Эти значения коэффициентов превышают критические, следовательно, включенные в модель факторы являются значимыми и существенно влияют на производительность классификатора. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,9955$, критерий Фишера $F = 527,29$, что значительно больше критического значения $F_{\text{крит.}} = 2,62$, что свидетельствует о высоком уровне адекватности полученной зависимости. В этой модели существенными оказались линейный член удельной нагрузки g , а также парное произведение факторов удельной нагрузки и угла наклона α . Это свидетельствует о наличии сильного взаимодействия факторов между собой.

Таким образом, установлены аппроксимирующие аналитические зависимости производительности валкового вибрационного классификатора от частоты вращения валков, влажности перерабатываемой сыпучей горной массы, угла наклона рабочего органа классификатора, зазора между валками и удельной нагрузки.

Графический анализ полученных результатов экспериментальных исследований указывает на характер влияния каждого изучаемого фактора, а аналитическая идентификация позволяет определять количественную оценку параметров классификатора.

Поскольку экспериментальные исследования влияния изменения частоты вращения вибровозбудителя на производительность классификатора (рис. 2, з) проводились при варьировании дополнительного параметра влажности материала, и, наоборот, экспериментальные исследования влияния изменения влажности материала на производительность классификатора (рис. 2, е) проводились при варьировании дополнительного параметра частоты вращения вибровозбудителя, то имеет смысл объединить эти две выборки случайных чисел в общую

базу данных для получения уточненной регрессионной модели зависимости производительности классификатора от обоих параметров, частоты и влажности материала.

Итак, анализируется зависимость производительности от частоты вращения вибровозбудителя ω и влажности материала θ . Исходные данные получены из экспериментальных графиков этих зависимостей на рис. 2, з, е, где представлены серия кривых зависимостей $Q = f(\omega)$ и $Q = f(\theta)$ при изменении соответственно влажности перерабатываемого материала θ и частоты вибровозбудителя ω . При числе степеней свободы критерия Стьюдента $\nu = 59$ и уровне значимости $\alpha = 0,05$ $t_{\text{крит}} = 2,0003$. В модель включены факторы, для которых коэффициент надежности больше критического значения или близки к нему. Определяемая аппроксимирующая зависимость имеет вид:

$$Q = 1,8656 + 1,0865\omega + 0,0594\theta^2. \quad (11)$$

Коэффициенты надежности составляющих уравнения:

$$t_{\omega} = 3,09; \quad t_{\theta^2} = 4,98.$$

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,8593$, т. е. все изменение производительности классификатора достаточно хорошо объясняется включенными в модель факторами. Критерий Фишера $F = 13,55$, что превосходит по величине критическое значение $F_{\text{крит.}} = 2,40$. Таким образом, подтвержден хороший уровень адекватности полученной зависимости, откуда видно, что производительность классификатора линейно зависит от частоты вращения вибровозбудителя и квадратично – от влажности перерабатываемого материала.

Зависимость производительности от насыпной плотности материала аппроксимируется на основании экспериментальных данных, представленных на рис. 2, д. Экспериментальная зависимость имеет вид:

$$Q = -27,8468 + 48,6617\gamma - 15,1148\gamma^2. \quad (12)$$

Коэффициенты надежности для факторных коэффициентов, имеющих значение для вхождения в уравнение регрессионной зависимости, то есть те, которые превышают $t_{\text{крит}} = 2,06$ для количества степеней свободы $\nu = 26$, имеют такие значения:

$$t_{\gamma} = 14,35; \quad t_{\gamma^2} = -15,12.$$

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,9599$, то есть модель имеет высокую степень адекватности. К тому же, статистика Фишера $F = 56,31$ значительно превышает $F_{\text{крит}} = 2,55$, что обеспечивает отличную адекватность принятой мо-

дели.

Выводы. На основе регрессионного анализа и аппроксимации результатов экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Для аппроксимации результатов экспериментальных исследований зависимости производительности от шести варьируемых параметров на валковом вибрационном классификаторе с гладкими обрешеченными валками методом регрессионного анализа были получены идентификационные модели (8 – 12). Методом корреляционного анализа были отобраны полиномиальные модели второго порядка с вхождением произведений факторных признаков. Высокая значимость и адекватность всех полученных моделей подтверждается значениями коэффициентов детерминации R^2 , близкими к 1, и критерием Фишера. Все результативные регрессионные уравнения (8 – 12) содержат лишь те слагаемые, которые существенно влияют на регрессионную модель. Значимость слагаемых проверялась по критерию Стьюдента.

2. Данные модели полезны при выборочном варьировании параметров во время эксплуатации машины для повышения производительности работы классификатора в зависимости от изменяемых параметров. Однако для получения максимально оптимизированной конструкции валкового вибрационного классификатора для определенных условий работы машины на этапе создания такой машины целесообразно использовать обобщенные регрессионные модели производительности и эффективности машин, включая все возможные влияющие факторы.

3. Производительность классификации горной массы на валковом вибрационном классификаторе с гладкими обрешеченными валками зависит:

– линейно от удельной нагрузки g на единичную площадь классификатора, угла его наклона α , и при увеличении удельной нагрузки и уменьшении угла наклона производительность увеличивается;

– квадратично от частоты вращения валков ω , влажности материала θ , зазора между валками Δ , от насыпной плотности материала γ , производительность имеет минимум в диапазоне граничной влажности $\theta = 5 - 10$ % и имеет максимум в диапазоне насыпной плотности материала $\gamma = 1,3 - 1,8$ т/м³.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. – Вып. 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. М., Большая Российская Энциклопедия, 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. Надутый, В.П. Определение влияния конструктивных параметров вибрационного валкового классификатора на технологические показатели / В.П. Надутый, В.Ф. Ягнюков, Л.Н. Прокопишин / Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут": Зб. наук. праць. – Харків: НТУ "ХПИ", 2003. – № 17. – С. 75-78.

8. Надутый, В.П. Зависимость производительности валкового классификатора от динамических параметров и свойств горной массы / В.П. Надутый, В.Ф. Ягнюков, Л.Н. Прокопишин // Матер. Міжнар. наук.-техн. конф. "Сталий розвиток гірничо-металургійної промисловості". – Кривий Ріг, 2004. – Т. 2. – С. 51-54.

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.

REFERENCES

1. Nadutyu, V.P. and Iagniuov, V.F. (2004), "Approximation of dependence productivity of vibrating roller classifier on its geometrical parameters and density of the granular mass", *Geo-Technical Mechanics*, vol. 47, pp. 38-42.

2. Nadutyu, V.P. and Iagniuov, V.F. (2002), "Modelling of influence of parameters of vibrating roller classifier on productivity", *Geo-Technical Mechanics*, vol. 30, pp. 162-171.

3. Nadutyu, V.P., Erpert, A.M. and Iagniuov, V.F. (2004), "The generalized model of vibrating roller classifier based on operating and design parameters", *Geo-Technical Mechanics*, vol. 48, pp. 286-290.

4. Polulyakh, A.D. (1997), "Mathematical modeling of technological processes of coal classification on screens", *Coal of Ukraine*, vol. 12, pp. 47-48.

5. Prohorov, Y.V. (1999), "Probability and Mathematical Statistics", *Great Russian Encyclopedia*, Moscow, RU.

6. Nadutyu, V.P., Iagniuov, V.F. and Iagniuova, I.V. (2016), "The results of experimental research of roller vibrating classifier depending on its design parameters", *Geo-Technical Mechanics*, vol. 126, pp. 4-15.

7. Nadutyu, V.P., Iagniuov, V.F. and Prokopishyn, L.N. (2003), "Determination of the influence of the design parameters of vibrating roller classifier on technological indicators", *Visnyk NTU «HPI»*, vol. 17, pp. 75-78.

8. Nadutyu, V.P., Iagniuov, V.F. and Prokopishyn, L.N. (2004), "The dependence of the productivity of the roller classifier on the dynamic parameters and mined rock properties", *Stalyi rozvytok girnycho-metalurgiynoyi promyslovosti : materialy mizhnarodnoyi naukovo-tehnichnoyi konferentsii* [Sustainable development of mining and metallurgical industry: materials of international scientific and technical conference], *Stalyi rozvytok girnycho-metalurgiynoyi promyslovosti* [Sustainable development of mining and metallurgical industry], vol.2, Kryvyi Rih, UA.

9. Kukharev, V.N., Salli, V.I. and Erpert, A.M. (1991), "Economic and mathematic methods and models in the planning and management", *Vyshcha shkola*, Kyiv, Ukraine.

Об авторах

Надутый Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом Механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, nadutyvp@yandex.ua.

Ягнюков Владимир Федорович, кандидат технических наук, научный сотрудник, научный сотрудник в отделе Механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, astasdnpr@gambler.ru.

Ягнюкова Ирина Владимировна, инженер в отделе Механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, yagnyukova@gmail.com.

Егурнов Александр Иванович, кандидат технических наук, директор по науке и перспективному развитию, ООО «Ана-Темс», Днепр, Украина, yegurnov@yahoo.com.

About the authors

Naduty Vladimir Petrovich, 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 (IGTM NASU), Dnepr, Ukraine, nadutyvp@yandex.ua.

Iaguiukov Vladimir Fedorovich, 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 (IGTM NASU), Dnepr, Ukraine, astasdnep@rambler.ru.

Iaguiukova Iryna Volodymyrivna, Master of Science, 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 (IGTM NASU), Dnepr, Ukraine, yagnyukova@gmail.com.

Yegurnov Oleksandr Ivanovych, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Science and Prospective Development director, LLC«Ана-Темс», Днепр, Украина, yegurnov@yahoo.com.

Анотація. В даній статті наведена апроксимація та ідентифікація результатів експериментальних досліджень щодо впливу режимних і конструктивних параметрів валкового вібраційного класифікатора, а також властивостей гірничої маси, на його продуктивність. Серед факторів, що впливають, були враховані такі режимні параметри валкового вібраційного класифікатора, як кутова частота віброзбудника і питоме навантаження матеріалу на одиницю площі поверхні, що просіює, такі конструктивні параметри, як кут нахилу і зазор між валками, такі властивості гірської маси, як її вологість і насипна щільність. Дослідження дозволили отримати регресивні залежності продуктивності валкового вібраційного класифікатора від різних змінних параметрів, що в подальшому спростить настройку гірничої машини під конкретно поставлені цілі переробки мінеральної сировини.

Ключові слова: апроксимація, експериментальні дослідження, гладкі валки, валковий вібраційний класифікатор, продуктивність.

Abstract. This article presents an approximation and identification of experimental research results of how rock properties and mode and design parameters of the vibrating roller classifier affect the classifier productivity. The affecting factors include such mode parameters of roller vibrating classifier as exciter angular frequency and specific load of material per unit area of the screening surfaces, such design parameters as the tilt angle and the gap between the rollers, such properties of the rock as moisture content and bulk density. The research makes it possible to obtain regression dependencies between productivity of vibrating roller classifier and different variable parameters, which can simplify configuring of the mining machine for the specifically defined purposes of mineral processing.

Keywords: approximation, experimental research, smooth rollers, vibrating roller classifier, productivity

Стаття поступила в редакцію 3.12.2016

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Б.А. Блюссом