

УДК 622.64-531.6

В.В. Слесарев, д-р техн. наук, проф,
А.С. МинеевГосударственное высшее учебное заведение
„Национальный горный университет“, г. Днепропетровск,
Украина, e-mail: skullik@i.ua**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВИБРОРЫХЛЕНИЯ
АГРЕГИРОВАННОЙ УГЛЕПОРОДНОЙ СРЕДЫ**V.V. Slesarev, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
A.S. MineyevState Higher Educational Institution “National Mining University”,
Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: skullik@i.ua**SIMULATOR OF VIBROCHRASHING OF AGGREGATED COAL MASS**

Работа посвящена сложным процессам виброрыхления в смерзшихся насыпных грузах. С данной проблемой сталкиваются практически все грузо-транспортные компании, работающие с перевозкой товара с помощью полувагонов, а также транспортные подразделения больших заводов, комбинатов и т.д. Для повышения эффективности работы разгрузочного процесса была разработана специальная виброустановка. Главным принципом виброустановки является передача механической вибрационной энергии смерзшемуся сыпучему грузу посредством специальных виброштырей. С целью повышения эффективности работы этой установки предлагается идея об изменении частоты рыхления в зависимости от глубины погружения виброштырей. В статье уделено максимальное внимание методам вычисления функций, главным образом определяющих наиболее эффективные частоты воздействия виброустановки на смерзшуюся углепородную среду в зависимости от различных параметров, изменяющихся от начала рыхления вагона до конца, от вагона к вагону и от состава к составу. Методика расчета была основана на изучении физико-механических особенностей поведения углепородной среды, а также на соединении методов решения задач в различных направлениях механики в наиболее подходящее решение для нашего случая. В результате исследований была получена совокупность зависимостей, максимально ясно описывающая физические явления, происходящие в смерзшейся углепородной среде. Также были предложены формулы определения эффективной частоты, зависящие только от простейших величин, определяемых посредством достаточно большого на сегодняшний день ассортимента датчиков и сенсоров. Следует также отметить, что данная статья является отображением работы по определению механизма вычисления эффективной для виброрыхления частоты. Данный механизм должен быть представлен в виде микропрограммы и установлен в микроконтроллерную часть автоматизированной системы управления виброрыхлительной установкой, создание которой сможет полностью избавить установку от человеческого присутствия, чем сэкономит время, а также повысит технику безопасности на предприятии, существенно увеличит КПД разгрузки вагонов.

Ключевые слова: *восстановление сыпучести, математическая модель, АСУ, распределение температур, виброрыхление, автоматизация*

Постановка задачи. В настоящее время перед транспортной промышленностью стоит важная задача – создание эффективной технологии разгрузки смерзшихся агрегированных материалов на основе применения автоматизированного малоэнергоёмкого производственного комплекса, состоящего из современных технических средств. При этом первостепенная задача состоит в автоматизации технологических средств, используемых в технологии разгрузочных работ. С целью повышения эффективности разгрузки смерзшейся агрегированной углепородной среды и снижения энергоёмкости процесса разупрочнения внедряются специальные виброрыхлительные установки (ВРУ) [1]. На сегодняшний день процесс виброрыхления, с использованием ВРУ, реализуется и контролируется на основе ручного управления, что снижает его производительность и требует дополнительных затрат, связанных с привлечением оператора по управлению ВРУ.

При создании АСУ виброрыхления агрегированной углепородной среды первостепенной задачей является разработка математической модели с целью „определения характеристик и рационализации спосо-

ба построения создаваемого нового объекта“ [2]. При этом под моделью понимают мысленно представляемый процесс, который в определенных условиях заменяет объект-оригинал, воспроизводя свойства и характеристики оригинала. Причем, математическая модель является не вообще каким-то отображением оригинала, а целевым отображением, которое, в свою очередь, определяет, какие свойства оригинала и в какой мере должны быть отражены в модели.

Целью работы является разработка математической модели виброрыхления смерзшейся агрегированной углепородной среды. При этом необходимо выполнить следующие задачи:

- выбрать тип математической модели;
- разработать математические основы модели;
- структурно синтезировать математическую модель.

Основная часть. Задача виброрыхления агрегированной углепородной среды в полувагонах заключается в её дезинтегрировании посредством развития в углепородной среде системы трещин и последующем её разрушении на блоки, позволяющие осуществлять разгрузку вагонов. Анализируя технологический процесс виброрыхления агрегированной углепородной среды, описанный в работе [1], и учи-

тывая вышеизложенную классификацию моделей по их назначению, уровню моделирования и свойствам, можно сделать следующие выводы о типе модели, необходимой для разработки АСУ.

Прежде всего необходимо отметить, что, поскольку математическая модель необходима для разработки автоматизированной системы управления виброрыхлительным процессом, который является „средством организации практических действий“, то модель можно отнести к прагматической или к прикладной. Кроме того, учитывая, что определяющим фактором в данном процессе служит вибрационное воздействие на среду, которое по своей природе является динамическим, характеризующееся временными параметрами воздействия, то модель должна быть *динамической*. В связи с тем, что данный динамический процесс может быть описан известными физическими законами для всех промежутков времени виброрыхления, то модель будет не стохастической, а *детерминированной* и *непрерывной*. Причем, поскольку эти физические законы, реализующиеся в углепородной среде, позволяют описать известные математические зависимости, то модель должна быть аналитической. Так как численные расчеты по теоретическим зависимостям базируются на физико-механических свойствах углепородной среды, которые можно определить только экспериментальным путем, то в модели будет также присутствовать эмпирический фактор. При этом для реализации функционирования модели в АСУ необходимо будет придать ей алгоритмический вид.

Таким образом, при разработке математической модели виброрыхлительного процесса агрегированной углепородной среды модель должна быть *прагматической*, то есть *прикладной*, *динамической*, *детерминированной*, *непрерывной* и *полуматематической* аналитического типа.

Анализ технологического процесса виброрыхления углепородной среды показал [1], что данный процесс включает в себя следующие активные и пассивные элементы:

- технологические параметры виброрыхлительной установки;
- физико-механические свойства агрегированной углепородной среды;
- внешние природные факторы.

К основным технологическим параметрам стационарной установки можно отнести:

- параметры вибрации – мощность электродвигателей вибраторов, равную ($3 \cdot 22 \text{ кВт}$), амплитуду (P_0) и частоту (ω) вибровоздействия;
- геометрические параметры – общие размеры установки и рыхлящего модуля, имеющего $k \times m$ штырей, где k – количество штырей на одном модуле, m – количество модулей, расположенных равномерно на расстоянии $2a$ друг от друга;
- длину рыхлящего штыря и расстояние между штырями.

Внешние природные факторы, такие как средняя температура воздуха (θ_e) и влажность (W) агрегиро-

ванной среды, важны тем, что оказывают, в определенной степени, влияние на физико-механические характеристики агрегированной углепородной среды, находящейся в полувагоне.

Основными физико-механическими параметрами, адекватно характеризующими деформирование агрегированной углепородной среды с учетом релаксации напряжений и поглощения энергии вследствие неупругого деформирования являются следующие параметры: плотность среды – ρ , коэффициент объемного сжатия – K_0 , модуль упругости – E_0 , коэффициент Пуассона – ν_0 , предел прочности на одноосное сжатие – σ , неупругие параметры – α, β, χ . Физико-механические свойства среды для удобства можно объединить в множество

$$S = \{x_i\} = \{\rho, \sigma, K_0, E_0, \nu_0, \alpha, \beta, \chi\}, i=1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где n – количество элементов множества S .

Поскольку промерзание углепородной среды по глубине вагона неравномерно, то параметры физико-механических свойств, входящие во множество S , можно разделить на два подмножества – S_1 и S_2 . К множеству S_1 отнесем статические параметры, которые можно принять постоянными для углепородной среды на протяжении всего производственного цикла. Множество S_2 будет содержать в себе физико-механические параметры, которые определяются глубиной погружения (r), влажностью (W), средней температурой воздуха (θ_e) и температурой агрегированной среды (θ_c), а также её фракционным составом (Φ). Множество $S_2 = \{\beta, \chi\}$ – будет содержать параметры, которые удовлетворяют условию

$$\{x_i \in S_2 \mid x_i = f_i(r, \theta_e, \theta_{a.c.}, W_i, \Phi_{\vartheta}, \Xi)\}. \quad (2)$$

Следует также отметить, что фракционный состав агрегированной среды, в свою очередь, является множеством параметров, характеризующих процентное соотношение и размер фракций различных размеров. Множество экстремальных параметров этого фракционного состава будет иметь вид

$$\Phi_{\vartheta} = \left\{ P_{y,n}^{ob}, R_{y,n}^{\min, \max}, P_{y,n}^{\min, \max} \right\}, \quad (3)$$

где $P_{y,n}^{ob}$ – соответственно, процентное содержание общего количества фракций угля и породы; $R_{y,n}^{\min, \max}$ – соответственно, минимальный и максимальный радиус фракций угля и породы; $P_{y,n}^{\min, \dots, \max}$ – соответственно, процентное содержание количества фракций угля и породы разных фракций.

Схематично данный процесс в исходном состоянии можно представить следующим образом. Пусть имеется железнодорожный полувагон высотой h , который заполнен агрегированной углепородной сре-

дой с определенным фракционным составом, как показано на рис. 1.

На границу данной среды действует стационарная вибрационная установка, усилия которой можно моделировать сосредоточенными волновыми источниками, расположенными друг от друга на расстоянии a , которые воздействуют на среду по закону $P = -P_0 e^{i\omega t}$ (рис 2.), где P_0 – амплитуда вибрационного воздействия, ω – частота воздействия.

Одним из наиболее простых способов повышения эффективности рыхления может быть увеличение амплитуды вибровоздействия. Такой подход является наиболее действенным, но, к сожалению, его применение нецелесообразно по нескольким причинам. Во-первых, этот способ увеличивает скорость рыхления среды за счет увеличения мощности виброрыхлительной установки, приводящей к увеличению расхода энергии, затраченной на восстановление сыпучести, что не является энергосберегающим подходом.

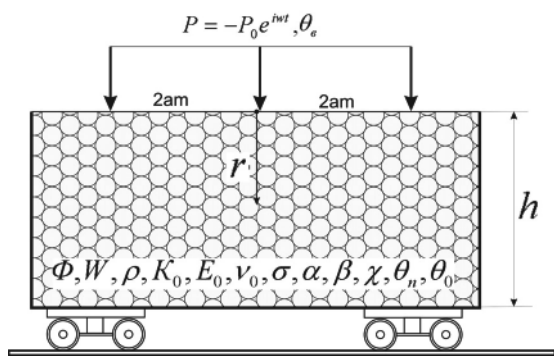


Рис. 1. Схема исходного состояния агрегированной углеродной среды в ж/д полувагонах при виброрыхлении: a – расстояние между штырями; t – количество штырей в продольном ряду

Во-вторых, безграничное увеличение амплитуды не может быть применено на установке по причине нарушения прочности стенок полувагона. В соответствии с технологическими ГОСТами, амплитуда колебаний строго ограничена величиной, равной 5 мм. В связи с этим, в настоящее время метод увеличения амплитуды для повышения эффективности виброрыхления не имеет будущего в украинской экономике. Однако любые колебания задаются только двумя основными параметрами – один из которых вышеуказанная амплитуда – P_0 , а второй это частота – ω . Поэтому, только за счет установления определенного значения частоты возможно повысить эффективность энергопередачи от вибрационного источника или другими словами – КПД виброрыхления. Таким образом, основным управляющим параметром при создании автоматической системы управления будет частота вибрационного воздействия. Для вычисления её эффективного значения необходимо определение численных значений пассивных параметров, описывающих состояние углеродной среды в вагоне. Это, прежде всего, начальная и установившаяся температура на по-

верхности вагона – θ_0 и θ_n соответственно. Кроме того, необходимо знание функции, описывающей температуру в любой точке агрегированной среды, находящейся в вагоне, – $\theta = \theta(r)$. Для определения этой функции необходимо решение уравнения теплопроводности. При этом, как следует из работ Арсенина В.Я., без потери физической корректности ж/д вагон можно смоделировать цилиндром и тогда за уравнение теплообмена между агрегированной средой и воздухом можно принять следующее уравнение

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = c^2 \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right), \quad (4)$$

где c – коэффициент теплопроводности; r – радиальная координата; t – время.

Начальные и граничные условия будут иметь соответственно вид

$$\theta|_{t=0} = \theta_0; \quad \theta|_{r=r_n} = \theta_n. \quad (5)$$

Для расчета эффективного значения частоты необходимо также установление численного значения фракционного состава и физико-механических свойств агрегированной среды, перечисленных выше. Эти данные можно определить на основе результатов лабораторных экспериментов. При этом для установления фракционного состава можно воспользоваться данными о соответствии энергоемкости разрушения Q фракционному составу углеродных смесей в эксперименте. Для определения наиболее чувствительных к изменению температуры реологических параметров χ и β необходимо провести аппроксимацию экспериментальных данных и установить их функциональные зависимости от θ . Имея перечисленные данные, эффективную частоту вибровоздействия можно определить из условия максимума функции, описывающей передачу энергии по агрегированной углеродной среде \mathcal{E} при вибрационном воздействии, изменяющемся по закону $P = -P_0 e^{i\omega t}$. При этом энергопередача \mathcal{E} представляет собой отношение средней за период мощности потока энергии через замкнутую поверхность, расположенную на расстоянии r от источника возбуждения $P_r(\omega)$, к средней за период мощности потока энергии через поверхность возбуждения, радиусом a – $P_a(\omega)$, в виде [1]

$$\mathcal{E} = \frac{P_r(\omega)}{P_a(\omega)} (r/a)^2. \quad (6)$$

То есть, эффективная частота виброрыхления будет определяться следующим путем

$$\max \mathcal{E}(r, S_1, S_2, \Phi_s) \Rightarrow \omega_{\text{эф}}(r). \quad (7)$$

Таким образом, структурированную математическую модель процесса виброрыхления агрегированной углеродной среды для создания автоматизированной системы управления можно представить схемой, приведенной на рис. 2.

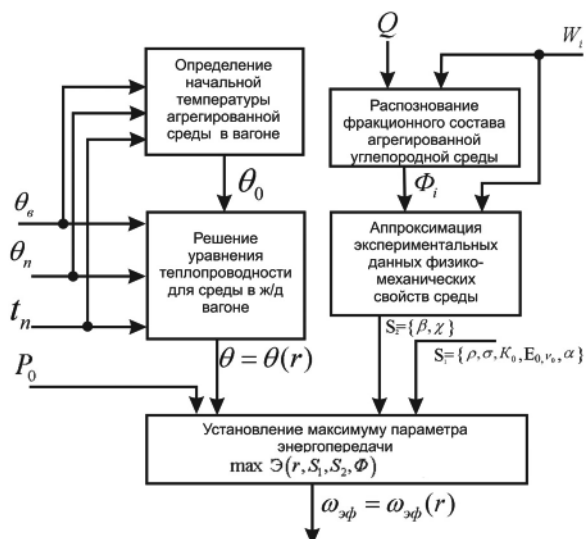


Рис. 2. Структурный синтез математической модели

Выводы. Таким образом, при разработке математической модели виброрыхлительного процесса агрегированной углеродной среды модель должна быть прагматической, то есть прикладной, динамической, детерминированной, непрерывной и полуэмпирической аналитического типа.

Анализ технологического процесса виброрыхления агрегированной углеродной среды позволил установить множества (1)–(3) активных и пассивных параметров, определяющих данный процесс. Это позволило установить, что основным управляющим параметром при создании АСУ является частота вибрационного воздействия, которую можно определить из условия максимума энергопередачи \mathcal{E} при вибровоздействии. Параметр \mathcal{E} устанавливается с использованием зависимостей (4), (6), учитывающих амплитуду вибровоздействия, фракционный состав углеродной среды, её влажность, градиент температуры между окружающим воздухом и агрегированной средой, а также её физико-механические свойства, представленные в множествах S_1 , S_2 и Φ . Структурированная математическая модель процесса виброрыхления агрегированной углеродной среды для создания автоматизированной системы управления представлена схемой, приведенной на рис. 2.

Список литературы / References

1. Минеев С.П. Основные положения технологии разгрузки смерзшегося груза из железнодорожных полувагонов / С.П. Минеев, М.Г. Ступа, А.С. Минеев // Научный вестник НГУ – Днепропетровск: 2008, Вып. №10. – С. 24–29.
Mineyev, S.P., Stupa, M.G. and Mineyev, A.S. (2008), "Basic rules of technology of adfrozen cargo unloading from open-top wagons", *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, no.10, pp. 24–29.
2. Лямец В.И. Системный анализ: вводный курс. / В.И. Лямец, А.Д. Тевяшев – Харьков: ХНУРЕ., 2004. – 448 с.
Lyamets, V.I. and Tevyashev, A.D. (2004), *Sistemnyi analiz: vvodnyi kurs* [System Analysis: Induction Course], KhHURE, Kharkiv, Ukraine, 448 p.

Робота присвячена складним процесам вібророзпушення змерзлих насипних вантажів. Із даною проблемою зіштовхуються практично всі вантажотранспортні компанії, які працюють із перевезенням товару за допомогою піввагонів, а також транспортні підрозділи великих заводів, комбінатів і т.д. Для підвищення ефективності роботи розвантажувального процесу була розроблена спеціальна віброустановка. Головним принципом віброустановки є передача механічної вібраційної енергії змерзлому сипкому вантажу за допомогою спеціальних віброштирів. З метою підвищення ефективності роботи цієї установки пропонується ідея про зміну частоти розпушування залежно від глибини занурення віброштирів. У статті надано максимальну увагу методам обчислення функцій, які, головним чином, визначають найбільш ефективні частоти впливу віброустановки на змерзле вуглеводне середовище в залежності від різних параметрів, які змінюються від початку розпушування вагона до кінця, від вагона до вагону і від потяга до потяга. Методика розрахунку була заснована на вивченні фізико-механічних особливостей поведінки вуглеводного середовища, а також на з'єднанні методів вирішення завдань у різних напрямках механіки в найбільш відповідне рішення для нашого випадку. У результаті досліджень було отримано сукупність залежностей, що максимально чітко описує фізичні явища в змерзлому вуглеводному середовищі. Так само були запропоновані формули визначення ефективної частоти, залежні тільки від найпростіших величин, що визначаються за допомогою досить великого на сьогоднішній день асортименту датчиків і сенсорів. Слід також відзначити, що дана стаття є відображенням роботи з визначення механізму обчислення ефективної частоти. Цей механізм повинен бути представлений у вигляді мікропрограми і встановлений у мікроконтролерну частину автоматизованої системи управління установкою, створення якої зможе повністю позбавити установку від людської присутності, чим заощадить час, а також підвищить техніку безпеки на підприємстві, істотно збільшить ККД розвантаження вагонів.

Ключові слова: відновлення ситуативності, математична модель, АСУ, розподілення температури, вібророзпушення, автоматизація

Work is devoted to the complex vibrocrashing processes in frozen bulk cargo. The problem is faced by almost all the cargo-transport companies working with the carriage of the goods using half-wagons and transport divisions of larger plants, mills and etc. A special vibro-crashing unit was developed to increase the effectiveness of the work during unloading process. The main principle of the vibro-crashing unit (VCU) is the transfer of mechanical vibratory energy to the frozen cargo by means of special vibro-pins. The idea of crashing frequency variation depending on the depth of immersion of vibro-pins was proposed to increase the efficiency of the installation's work. The special attention is paid to the methods of computation of functions, mainly determining the most effective frequency depending on various parameters, such as changing from the beginning of the crashing to the end in same wagon, from wagon to wagon

and from train to train. Method of calculation was based on the study of physio-mechanical behaviour of coal mass, as well as on combination of methods of the decision of tasks in various areas of mechanics into the set most suitable for our case. The result of the research is the set of dependencies describing clearly the physical phenomena appearing in frozen coal mass. The formulas for determination of effective frequency which depend only on the simplest values determined by lots of sensors were suggested. The mechanism should be presented in the form of software and installed in

hardware part of the automated control system (ACU) of vibro-crashing installation. Its creation will increase human safety, workers' time and input-output ratio of the wagon unloading process.

Keywords: *flowability renewal, mathematical model, the ACS, temperature distribution, vibrocrashing, automation*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.В. Ткачовим. Дата надходження рукопису 05.05.11

УДК 621.926.534.16

**Е.В. Кочура, д-р техн. наук, проф.,
Жамиль Абедельрахим Жамиль Альсаййде**

Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: Kochura E@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДА АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МАГНИТНЫХ СЕПАРАТОРОВ ПО МАГНИТНОМУ ПРОДУКТУ

**Ye.V. Kochura, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
Zhamil Abedelrakhim Zhamil Alsayayde**

State Higher Educational Institution "National Mining University", Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: Kochura E@gmail.com

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE METHODS OF AUTOMATIC CONTROL OF THE PRODUCTIVITY OF MAGNETIC SEPARATORS BY MAGNETIC PRODUCT

Целью статьи является экспериментальная проверка разработанного в Национальном горном университете метода автоматического контроля производительности магнитных сепараторов по магнитному продукту. Разработанный метод основан на зависимости электродвижущей силы в электрической катушке, расположенной на полюсном наконечнике магнитной системы сепаратора, от его производительности по магнитному продукту. Приводится функциональная схема метода измерения производительности магнитного сепаратора по магнитному продукту. Представлены теоретические формулы, описывающие формирование пульсирующего магнитного поля в рабочей зоне магнитного сепаратора и зависимость магнитной индукции этого поля от физических переменных, характеризующих режим работы магнитного сепаратора мокрого обогащения.

Установлена теоретическая зависимость магнитной индукции магнитного поля в рабочей зоне от количества магнетита в слое концентрата на поверхности барабана сепаратора. Приводится методика и функциональная схема проведения экспериментальных исследований в промышленных условиях обогатительной фабрики предложенного метода автоматического контроля. Методика включает проведение пассивного эксперимента, в том числе отбор технологических проб и их анализ с одновременной регистрацией показаний вольтметра, который измеряет напряжение на выходе электрической катушки, расположенной на полюсном наконечнике магнитной системы сепаратора.

Математическая обработка результатов экспериментальных исследований проводилась методом регрессионного анализа. Получено уравнение регрессии, связывающее величину электродвижущей силы в катушке и производительность магнитного сепаратора по магнитному продукту. Сделан вывод о достаточной точности измерения производительности магнитного сепаратора по магнитному продукту. Полученные результаты позволяют разработать систему автоматического контроля производительности магнитного сепаратора.

Ключевые слова: *автоматический контроль, магнитный сепаратор, магнитный продукт, производительность, электродвижущая сила*

Введение. Производительность магнитообогащительной фабрики по железорудному концентрату определяется производительностями по магнитному продукту сотен магнитных сепараторов, работающих в первой, второй и третьей стадиях обогащения секций обогатительной фабрики. Без автоматического

контроля и регулирования этого важнейшего технологического параметра невозможно стабилизировать режим работы технологического оборудования, работающего в секциях обогащения при переработке руд с переменными свойствами. Поэтому разработка метода автоматического контроля производительности магнитных сепараторов по магнитному продукту является актуальной.