

Устинов Д. Б.

УЧЕТ ВЯЗКО-ПЛАСТИЧНЫХ СВОЙСТВ ПОРОШКА ИЗ КРОВЕЛЬНЫХ БИТУМНЫХ ОТХОДОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ВИБРОГРОХОТА-КЛАССИФИКАТОРА

Известно, что порошки, получаемые в различных измельчающих аппаратах, имеют различия в геометрии, размерах и физических свойствах частиц, дисперсность которых влияет на качество получаемых из них изделий. Существенную роль в этом играют режим и механизм разрушения частиц порошка из кровельных битумных отходов (КБО).

Решение задачи разделения, в частности порошка из КБО, при виброклассификации связано с выявлением закономерностей отделения составляющих ее узких фракций или так называемое пофракционное извлечение. При этом известно, что наиболее интенсивно извлекаются мельчайшие зерна, размеры которых много меньше размера ячеек сит, причем не квадратных, а круглых.

Для обеспечения прохода «негабаритных» зерен, размеры которых приближаются к размерам ячейки сит, необходимо создание оптимальных силовых амплитудно-частотных воздействий на сито. Под действием этих сил происходит непрерывное подбрасывание и смещение вдоль оси процесса на плоскости сита зерен, что улучшает их сегрегацию от основной классифицируемой массы материала. Особенно это важно для порошка из КБО, представляющего собой упруговязко-пластичную смесь.

Процесс классификации порошкообразных материалов осуществляется, в частности, на плоских качающихся грохотах для разделения сыпучего материала на фракции и для отделения крупных кусков, превышающих размеры ячейки сит. Причем классификация порошков на плоских грохотах с условием разделения их на фракции существенным образом зависит от поступающего массопотока, а тот, в свою очередь, определяется процессом грохочения на сите с определенной частотой колебания.

Использование грохотов для классификации порошка из КБО в технологической цепочке «измельчение – классификация» позволяет контролировать процесс тонкости помола битуминозных отходов. Качество измельчения (тонкость помола) зависит от: предварительно классифицированного сырья; конструктивных решений энергообменников и их эксплуатационного ресурса; температуры окружающего воздуха; продолжительности измельчения; физико-механических свойств битуминозных кровельных отходов (на картонной или стекловолоконной основе). А качество классификации порошка из КБО зависит от частоты колебания сита и плотности на нем разделяемого по фракциям материала.

Колебания есть периодический процесс движения некоторой системы около положения ее равновесия (нулевого, нейтрального положения). Общее выражение колебательного процесса можно записать

$$\Phi(t) = \Phi(t+T), \quad (1)$$

где Φ – кинематическая, динамическая, энергетическая характеристика колеблющейся системы (перемещение, скорость, ускорение, сила, энергия колебаний и т. д.); t – текущее время; T – период колебаний, т. е. время полного цикла, после которого процесс повторяется.

Величина, обратная периоду, называется частотой и показывает число колебаний в единицу времени

$$f = \frac{1}{T} [\text{сек}^{-1}]. \quad (2)$$

Частота, равная одному колебанию в секунду, называется герцем.

Удобно пользоваться выражением круговой (угловой, циклической) частоты, которое представляет собой число колебаний за 2π сек.

$$P_k = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f [\text{сек}^{-1}]. \quad (3)$$

Частота является одним из важнейших параметров колебаний.

Механические колебания системы характеризуются поступа-

тельным или вращательным перемещением (виброперемещением) отдельных точек системы (или центра ее массы), т. е. их удалением от нейтрального положения, меняющимся во времени в определенных пределах

$$y = y(t). \quad (4)$$

Максимальное отклонение системы, отсчитываемое в одну сторону от нейтрального положения, называется амплитудой колебаний A . Размах колебаний равен сумме отклонений (амплитуд) в обе стороны от нейтрального положения.

Первая производная от виброперемещения по времени называется скоростью колебательного движения

$$\frac{dy}{dt} = v. \quad (5)$$

Вторая производная от виброперемещения по времени называется ускорением колебательного движения

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \omega. \quad (6)$$

От ускорения зависит величина инерционных сил, возникающих при незатухающих колебаниях

$$F = m \cdot \omega, \quad (7)$$

где m – характеристика массы системы [1, 2, 3].

Незатухающие собственные колебания возникнут, если частота вынуждающей силы ω совпадает с частотой собственных колебаний P_k , т. е. в состоянии резонанса. В зависимости от вида виброперемещений точек механической системы различают продольные крутильные и изгибные колебания.

Рассмотрим изгибные колебания как наиболее характерные и имеющие важное практическое значение при проектировании виброгрохотов. Если некоторый стержень изогнут в плоскости XOY (рисунок 1), то между изгибающими моментами M_x в сечениях и линейной жесткостью EJ существует известная приближенная дифференциальная зависимость

$$EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = M_x. \quad (8)$$

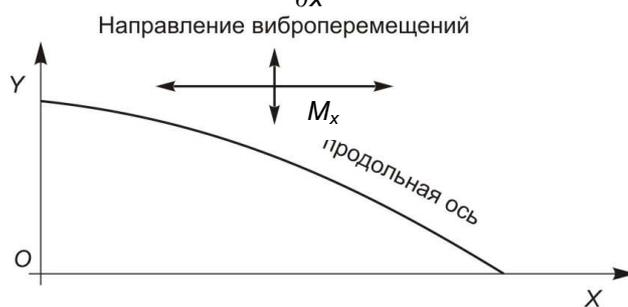


Рисунок 1 – Вид изгибного колебания стержня

Момент, в свою очередь, связан с вызывающей его нагрузкой от материала выражением

$$\frac{\partial^2 (M_x)}{\partial x^2} = -q. \quad (9)$$

Тогда

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \cdot \left(EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) = -q.$$

Для случая колебаний нагрузкой от материала массой m являются инерционные силы

$$q = m \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}.$$

Подставляя их значение в предыдущее равенство, получим дифференциальное уравнение изгибных колебаний, утверждающее равенство внутренних упругих сил инерционными силами [1, 2, 3]

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \cdot \left(EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0. \quad (10)$$

Данные теоретические положения обосновывают возможность реализации на новом виброгрохоте [4] классификацию на фракции вязкого битумного порошка, обладающего внутренними упругими силами, используя изгибные колебания продольных выпуклых стержней под полотнами сит.

Состав порошка из КБО представляет собой вязкую основу из частичек битума с волокнистыми включениями из картона и стекловолокна. Такая измельченная масса с адгезионной связью между частичками трудно поддается разделению на фракции. Поэтому при разработке нового классификатора – виброгрохота основное внимание при проектировании было уделено математическому анализу системы и механизма колебаний сит и питателя на бункере распределяющего поток подачи порошка на сито.

Универсальный виброгрохот УВГ [4, 5] состоит из опорной горизонтальной плиты из швеллеров сварной конструкции, на которой жестко закреплены трубчатые стойки с шарнирными подвесками (рисунок 2, 3).

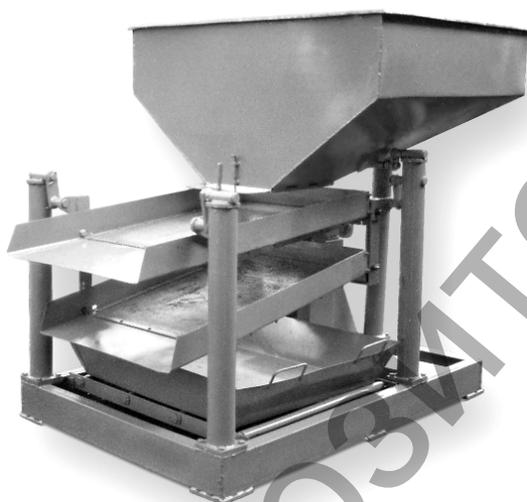
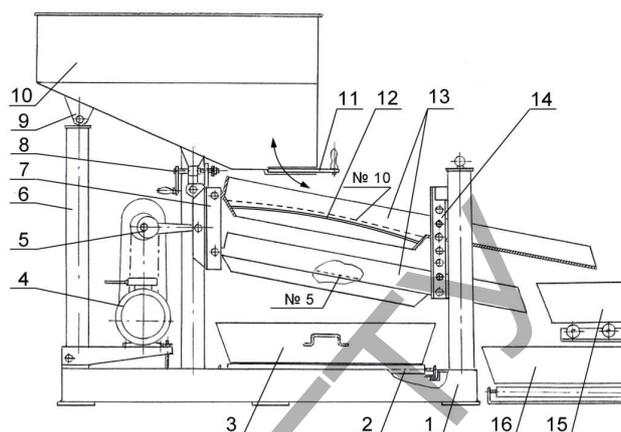


Рисунок 2 – Общий вид виброгрохота

В плите предусмотрен проем для размещения в нем съемного рольганга или бункера конвейера. Кроме того, на плите закреплены опорные стойки для электродвигателя и эксцентрикового вала с шатуном.

Загрузочный бункер представляет собой сварную конструкцию из листовой стали пирамидальной формы, в усеченной конической части которой размещен дозировочный питатель и шибер с ручкой. Бункер закреплен на шарнирных подвесках к трубчатым опорным стойкам и имеет возможность приводиться в вибрационные колебания от ударных воздействий, передаваемых от возвратно-перемещаемых сит через винт с регулировочной ручкой, закрепленными на бункере.

К трубчатым опорным стойкам на шарнирных подвесках закреплена корзина рамной конструкции и кронштейны с системой монтажных отверстий для подвески и регулирования угла наклона двухъярусных сит в них.



1 – плита; 2 – рольганг; 3 – емкость для порошка фракции № 5; 4 – электродвигатель; 5 – эксцентриковый вал с шатуном; 6 – трубчатая опора бункера; 7 – корзина; 8 – регулировочный винт с бойком; 9 – шарнир; 10 – бункер; 11 – шибер питателя; 12 – криволинейные металлические стержни; 13 – рамки с ситами; 14 – монтажные отверстия; 15 – емкость для отходов более № 10; 16 – емкость для порошка № 10

Рисунок 3 – Конструктивная схема универсального виброгрохота УВГ

Корзина с ситами через рычаг и шарнирную кривошипную систему связана с эксцентриковым валом, размещенным в подшипниках опорного корпуса и который снабжен шкивом для ременной передачи. Верхняя часть корпуса корзины содержит боек, входящий в ударные воздействия с винтом с регулировочной ручкой, закрепленными на нижней наклонной стенке бункера.

На горизонтальной опорной плите закреплен натяжной качающийся опорный столик с электродвигателем, который снабжен шкивом и ременной передачей кинематически связан со шкивом на эксцентриковом валу.

Вращающиеся шкивы и ременная передача укрыты защитным кожухом.

Двухъярусные сита выполнены однотипной конструкции и представляют собой сварные жесткие рамки из уголков с ограничивающими бортами вверху и внизу. В рамках размещают и крепят съемные полотна сит с определенными размерами ячеек.

Для предотвращения провисания полотен сит от просеиваемой массы материала под ними устанавливают дискретно металлические прутковые упоры криволинейной выпуклой поверхностью вверх под сито.

Угол наклона сит регулируют на кронштейнах, в которых предусмотрена система монтажных отверстий.

Универсальный виброгрохот УВГ работает следующим образом.

При разделении измельченного материала на определенную фракцию в корзине должно быть установлено, например, два яруса рамок с определенным уклоном, который задается оператором.

Положение углов рамок фиксируют в корзине в монтажных отверстиях (этот угол может варьироваться от 0 до 30°).

Затем в рамках размещают и крепят полотна сит. В верхнем ярусе – сито с крупными ячейками, например 10x10 мм, в нижнем ярусе – с ячейками, например 5x5 мм – товарный выход фракции просеиваемого материала. В корзине может быть установлено и 3 яруса рамок с полотнами сит. Чтобы полотна сит в процессе их загрузки просеиваемым материалом не провисали, под них разрозненно подкладывают с жестким креплением к рамке криволинейные металлические стержни выпуклостью вверх.

Корзину с системой сит шатуном объединяют с эксцентриковым валом, который размещен в корпусе подшипника. Эксцентриковый вал ременной передачей объединяют с электродвигателем, установленным на плите.

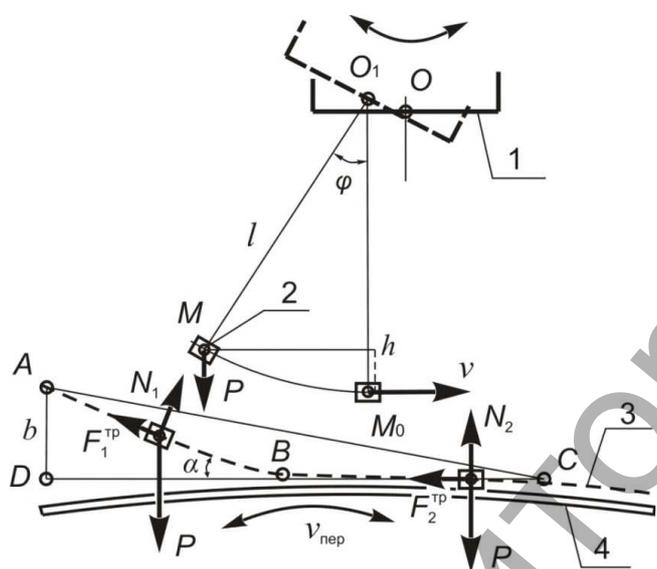
В бункер, шарнирно установленный на стойках, при закрытом шибере засыпают неразделенный измельченный материал. За счет шарнирной подвески бункер может совершать свободные колебания от контакта с корзиной с ситами.

От электродвигателя в работу включается корзина с ситами. Из щели питателя на бункере извлекается шибер, с помощью которого

можно регулировать величину разгрузочной щели на питателе и соответственно плотности потока просеиваемого материала, падающего на полотно сита.

Измельченные в порошок битумные кровельные отходы содержат волокна и обладают вязкостью и липкостью. Такой материал может быстро слеживаться и налипать на стенки бункера. Такой порошок необходимо постоянно поддерживать в разрыхленном состоянии с несвязанными друг с другом частичками. Для этого на бункере установлен регулировочный винт, который периодически закручивают и вводят в контактное соприкосновение с бойком, закрепленным на корзине с ситами и постоянно совершающим вибрационные колебания. От ударно-вибрационных колебаний материал в бункере встряхивается, поддерживается в разрыхленном состоянии и через питатель равномерно распределяется на полотне сита. Чтобы уменьшить шум, боек и регулировочный винт (его ударяющаяся часть) укрыты пористым эластичным и упругим материалом (резина, пластик).

При ударе бойком на корзине с ситами о боек винта на бункере происходит мгновенное отклонение на угол φ питателя с отклонением от вертикали на такой же угол φ (со смещением точки O в положение O_1) и падающего из него потока разделяемого на фракции материала (рисунок 4), который по ходу перемещения рассеивается на сите равномерным слоем.



1 – питатель; 2 – классифицируемый на фракции сыпучий материал; 3 – полотно сита; 4 – криволинейный выгнутый стержень
Рисунок 4 – Расчетная схема классификатора универсального. Виброгрохот УВГ

При возвратном колебании корзины с ситами контактная связь между бойками исчезает и скорость V питателя на бункере в этот момент, когда угол отклонения его от вертикали достигает наибольшего значения φ , равна нулю. Работа силы тяжести от массы m просеиваемого материала на пути MM_0 равна $(-mgh)$, и уравнение кинетической энергии имеет вид [6]

$$-\frac{mv^2}{2} = -mgh,$$

откуда находим

$$v = \sqrt{2gh}. \quad (11)$$

Замечаем на рисунке 4, что

$$h = l - l \cdot \cos \varphi = l(1 - \cos \varphi) = 2l \sin^2 \frac{\varphi}{2},$$

получаем

$$v = 2\sqrt{gl} \cdot \sin \frac{\varphi}{2}. \quad (12)$$

Таким образом, чем больше будет скорость v при возвращении питателя на бункере в исходное положение (из точки O_1 в точку O), тем эффективнее и производительнее будет происходить разделение на

фракции волокнистого и вязкого битуминозного материала. Из рисунка 4 видно, что чем меньше расстояние l от точки O на питателе до точки M_0 на полотне сита, тем меньше будет и скорость v . Поэтому в универсальном виброгрохоте УВГ предусмотрена система монтажных отверстий, позволяющих устанавливать оптимальные расстояния l для различных сыпучих разделяемых на фракции материалов.

Частицы просеиваемого материала в потоке, отклонившегося от вертикального положения на угол φ в возвратном направлении колебания питателя, падают в движении со скоростью V на полотно сита, которое установлено под определенным углом α относительно горизонтальной плоскости. Причем участок полотна сита AB с углом наклона α переходит в горизонтальную плоскость BC , которая образуется над криволинейными стержнями (рисунок 4). Частички материала, перемещаясь из точки A со скоростью V по плоскости наклонного участка сита под углом α , смещаются к точке B . Пройдя затем некоторый путь по горизонтальной плоскости BC , в момент возвратного колебания корзины с ситами в противоположную сторону, останавливаются.

Принимаем длину наклонного пути AB равную S_1 ; длину горизонтального пути BC равную S_2 .

В универсальном виброгрохоте УВГ полотна в двухъярусных ситах вместе с просеиваемыми частицами сыпучего материала постоянно перемещаются в возвратно-поступательных направлениях и являются составляющими сложного колебания. В этом случае, когда частицы просеиваемого материала перемещаются по движущейся поверхности сит, их скорость складывается геометрически из двух скоростей: относительной и переносной [6]. Относительная скорость v создается падающим рассеиваемым потоком частиц сыпучего материала из колеблющегося питателя, а переносная скорость $V_{пер}$ создается за счет механических колебаний сит. Поэтому нормальные реакции N_1 и N_2 соответственно на наклонной и горизонтальной поверхностях сит с переменной скоростью от сита могут образовать любой угол – как острый, так и тупой. При этом частицы материала не просто скользят по поверхности сит, а за счет силы тяжести и трения на участках S_1 и S_2 активно проникают через ячейки сит.

В этом случае сумма работ всех действующих на просеиваемые частицы материала сил на пути ABC складывается из работ на наклонном AB и горизонтальном BC участках сит.

Работа на пути AB составляется:

- 1) из работы сил тяжести просеиваемых частиц $P_b = PS_1 \sin \alpha$;
- 2) из работы силы трения частиц материала, равной $-F_1^{mp} \cdot S_1$.

Но сила трения F_1^{mp} равна произведению нормальной реакции $N_1 = P \cos \alpha$ на коэффициент трения f . Следовательно, работа этой силы равна

$$-P \cdot f \cdot S_1 \cdot \cos \alpha.$$

Работа силы трения частиц на горизонтальном пути сита BC равна

$$-P \cdot f \cdot S_2.$$

Так как нормальная реакция N_2 горизонтальной плоскости сита равна весу частиц P , то сила трения определяется из выражения

$$F_2^{mp} = f \cdot P.$$

Таким образом, получаем уравнение

$$P \cdot S_1 (\sin \alpha - \cos \alpha) - P \cdot f \cdot S_2 = 0, \quad (13)$$

откуда находим:

$$f = \frac{S_1 \sin \alpha}{S_1 \cos \alpha + S_2}. \quad (14)$$

Из рисунке 4 имеем:

$$DA(b) = S_1 \sin \alpha, \quad DB = S_1 \cos \alpha \text{ и } BC = S_2.$$

Подставляя эти значения в формулу (14), получаем:

$$f = \frac{DA}{DB + BC} = \frac{DA}{DC} = \operatorname{tg} \angle ACD. \quad (15)$$

Отсюда видим, что угол ACD равен углу трения. Как известно из статики [6], тангенс угла трения равен коэффициенту трения.

Из уравнения (15) следует, что:

- 1) если $\operatorname{tg} \alpha > f$, то движение просеиваемого порошка по наклонному полотну сита вниз будет равномерно ускоренным;
- 2) если $\operatorname{tg} \alpha < f$, то движение будет равномерно замедленным;
- 3) если $\operatorname{tg} \alpha = f$ (т. е. если угол наклона плоскости сита равен углу трения), то движение частиц просеиваемого материала будет равномерным.

В модернизированном варианте виброгрохота УВГ применялись полотна сит с ломаным профилем с переходом их наклонных участков в горизонтальное положение, которые формировались над выпуклыми металлическими стержнями. В качестве сит использовались сетки стальные плетеные одинарные по ГОСТ 5336-87 с ячейками 10x10 и 5x5 мм.

Необходимость выбора многорельефной энергообменной поверхности сит с большим коэффициентом трения связана с физико-химическими свойствами классифицируемого битуминозного материала. Измельченные в порошок КБО представляют собой волокнистую с адгезионной связью между частичками массу, из которой требуется отделить битумные частицы, а также минеральные и органические составляющие рубероида.

Такая битуминозная масса на традиционных плоских грохотах практически не поддается классификации из-за образования на полотнах сит так называемых «застойных зон» или неразрушающихся слипшихся комков-ядер.

Поэтому остановились на управляемой подаче массопотока битуминозного порошка из питателя бункера виброгрохота УВГ в определенном процессе его классификации.

Резкие и мгновенные изменения во времени амплитудные колебания питателя и значительные скорости v разделения падающего на сито массопотока в виде мелкодисперсного равномерного рассева сыпучего материала. Причем этот процесс рассева на сите происходит с большой скоростью классифицируемых частиц. При движении высокоскоростного массопотока в нем постоянно изменяются координаты составляющих его частиц, при этом изменяются и координаты центра массопотока.

Поэтому можно выразить количество движения K массопотока сыпучего классифицируемого материала через массу m массопотока и скорость v его центра массы [6]

$$K = \sum m v. \quad (16)$$

Направленное вертикально-горизонтальное колебание двухъярусных сит в универсальном виброгрохоте УВГ приводит к процессу классификации порошка по крупности на отрезках прямых, когда условия разделения естественным образом зависят от массопотоков, а те, в свою очередь, определяются количеством движения крупных и мелких частиц.

Под действием амплитудно-частотного режима на ситах постоянно и мгновенно происходит непрерывное подбрасывание зерен, которые в результате трения и мгновенных ударов о профиль сит и друг с другом дробятся и рассыпаются на мелкие частицы, протекающие через соответствующие ячейки, и разделяются на фракции.

На основании теоретических и экспериментальных исследований макетного, а затем и опытных образцов универсального виброгрохота УВГ [5] автором был определен конкретный конструктивный и компоновочный вид агрегата, обеспечивающий регулирование массопотока любых сыпучих материалов с определением конкретной скорости и классификации для плоских сит на грохоте.

Универсальные виброгрохоты УВГ выпускаются в заводском ис-

полнении с реализацией их заказчикам.

Проектирование виброгрохотов для классификации вязких битуминозных порошков, в частности из КБО, выполняли на основе математического анализа с учетом закономерностей классической механики, базирующихся на опытных исследованиях конструктивных деталей на макетных образцах агрегатов [4, 5] с последующей отбраковкой отдельных узлов и выбором оптимальных вариантов.

Техническая характеристика виброгрохота УВГ приведена в таблице 1.

Таблица 1

Наименование показателей	Значение
Производительность, м ³ /час, не менее	0,8-1,0
Вместимость бункера, м ³ , не более	1,0
Число ярусов сит, шт.	2
Угол наклона, град.	0-30
Рабочие размеры сита, мм:	
длина.....	800
ширина.....	600
Электродвигатель АИР90L6У3, об/мин	1000
Потребляемая мощность, кВт	2,2
Номинальное напряжение питания сети, В	380/220
Частота, Гц.....	50
Габаритные размеры, мм:	
длина.....	2050
ширина.....	1124
высота.....	1200
Масса, кг, не более.....	150
Обслуживающий персонал, чел.....	2

При разработке универсального виброгрохота УВГ использовался математический метод с изучением системы механизма подачи массопотока сыпучего материала с амплитудно-частотным воздействием классифицируемого порошка на качающиеся сита с большим их коэффициентом трения, обеспечивающих максимальное проникновение битуминозных частиц через ячейки сит.

Изготовленные опытные образцы агрегатов УВГ, предусмотренные для классификации битуминозных порошков, а также других материалов на товарные фракции, успешно прошли заводские и производственные испытания и могут быть использованы на малых предприятиях, в том числе – предпринимателями.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сорокин, Е. С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. – М.: Госстройиздат, 1960.
2. Пановко, Я. Г. Внутреннее трение при колебаниях внутренних систем. – М.: Физматгиз, 1960.
3. Каноненко, В. О. Колебательные системы с ограниченным возбуждением. – М.: Изд. «Наука», 1964.
4. Пат. ВУ 9992. Виброгрохот / Б. С. Устинов, Д. Б. Устинов, 2007.
5. Устинов, Д. Б. Отечественные машины и оборудование для кровельных работ переработки твердых строительных битумных отходов в порошок и технологии его вторичного применения // «Зеленый контейнер», Минск, ГП «Жилкомиздат», Минск. – 2014. – № 1, № 2. – С. 17–22.
6. Воронков, И. М. Курс теоретической механики. – М.: Госиздат физико-математической литературы, 1961. – 592 с.

Материал поступил в редакцию 12.03.2018

USTINOV D. B. Accounting of viscoplastic properties of powder from roofing bituminous waste when developing a vibroroller classifier

Vibrating screen for classification into fractions of shredded roofing bitumen waste and other loose materials. The results of mathematical analysis and experimental studies of two longline vibrators and a hopper are presented with their collision through an elastic screw stopper with a working organ of the exciter.

Vibrating machine for classification into fractions of shredded roofing bitumen waste and other bulk materials. The results of mathematical analysis and experimental studies of two longline vibrating sieves and a loading hopper are represented by their collision through a spring-loaded limiter with a working member of the vibrating mechanism.