

ВИБРОПНЕВМОСЕПАРАЦИЯ ИЗМЕЛЬЧЕННЫХ ПРОДУКТОВ РЕЗИНОТКАНЕВЫХ ОТХОДОВ

А.М. Козлов, В.Н. Блиничев

Александр Михайлович Козлов *, Валерьян Николаевич Блиничев

Кафедра «Машины и аппараты химических производств», Ивановский государственный химико-технологический университет, просп. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: ale3069@yandex.ru *, blinich@isuct.ru

Данная работа посвящена проблеме вибропневмосепарации измельченных продуктов резинотканевых отходов. Установлено, что изношенные резиновые изделия являются ценным вторичным сырьем. Нами исследована механическая технология по переработке резинотехнических изделий, базирующаяся на процессах многоступенчатого измельчения с первоначальным извлечением бортового кольца и металлокорда. Выявлено, что задача разделения полидисперсной резинокордной смеси мало изучена и не решена. Проведенный анализ показал, что наиболее простым и качественным способом отделения резиновой крошки от распушенного волокна является вибропневморазделение. Сепарация измельченных резинотканевых отходов на вибростоле с применением отдува воздухом текстильной составляющей позволит максимально эффективно разделить разнородные частицы исходной смеси. На работу вибропневмосепаратора оказывают влияние множество факторов, в том числе угол наклона вибростола, амплитуда его колебаний, а также величины аэродинамической подъемной силы воздушного потока. Нами были проведены исследования, позволяющие выявить влияние перечисленных факторов на эффективность просева и чистоту резиновой крошки различных фракций на выходе. Целью данной работы является исследование процесса вибропневмосепарации резинотканевой смеси и разработка его аппаратурного оформления. Для ее достижения были поставлены и решены следующие задачи: разработка нового модернизированного аппарата для разделения резинотканевой смеси; определение зависимостей, связывающих скорость транспортирования резинотканевой смеси с углом наклона вибростола и его амплитудно-частотными характеристиками; получение расчетных зависимостей, позволяющих определить скорости уноса кордного волокна и резиновой крошки, отличающиеся от ранее предложенных в научной и учебной литературе общепринятых зависимостей для частиц сферической формы.

Ключевые слова: вибропневмосепарация, продукты резинотканевых отходов, скорость уноса, скорость транспортирования, угол наклона вибростола, амплитудно-частотные характеристики

VIBRATION PNEUMATIC SEPARATION OF MILLED PRODUCT OF RUBBER-FIBRE-WASTE

A.M. Kozlov, V.N. Blinichev

Alexey M. Kozlov *, Valer'yan N. Blinichev

Department of Machines and Apparatuses of Chemical Production, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetievskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: ale3069@yandex.ru *, blinich@isuct.ru

This work is devoted to the problem of vibration pneumatic separation of milled product of rubber-fibre waste. It is established that worn rubber products are a valuable secondary raw material. We studied the mechanical technology for the processing of rubber products, based on the processes of multistage grinding with an initial removing the bead wire and steel cord. The analysis showed that the most simple and qualitative way of separating of crumb rubber is vibration pneumatic separation. A separation of crushed rubber waste on the vibrating table with the use of air blowing of the textile component will allow separating of dissimilar particles of the initial mixture as efficiently as possible. The operation of the vibro-pneumatic separator is influenced by many factors, including the angle of inclination of the vibrating table, the amplitude of its oscillations, as well as the magnitude of the aerodynamic lifting force of the air flow. We have conducted research to identify the impact of these factors on the efficiency of sieving and purity of the crumb rubber of different fractions at the outlet. The aim of this work is to study the process vibration pneumatic separation of rubber-cord compound and the development of its hardware design. To achieve this aim the following tasks were set and solved: development of a new modernized system; determination of dependencies between the rate of transport of rubber-cord compound, the angle of inclination of the vibrating table and the amplitude-frequency characteristics; obtaining the calculated dependencies allowing to determine the velocity of entrainment of the cord fibers and crumb rubber.

Keywords: vibration pneumatic separation, products of rubber-cord waste, entrainment velocity, transportation velocity, inclination angle of vibrating table, amplitude-frequency characteristics

Для цитирования:

Козлов А.М., Блиничев В.Н. Вибропневмосепарация измельченных продуктов резинотканевых отходов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2018. Т. 61. Вып. 6. С. 96–102

For citation:

Kozlov A.M., Blinichev V.N. Vibration pneumatic separation of milled product of rubber-fibre-waste. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2018. V. 61. N 6. P. 96–102

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что ежегодно во всех странах мира остается около одного миллиарда использованных автопокрышек. Почти такое же количество изношенных шин хранится в качестве отходов на свалках. В настоящее время наблюдается тенденция долгосрочного роста поступлений использованных автопокрышек.

Шины представляют собой уникальное вторичное сырье, так как они выходят из эксплуатации главным образом вследствие износа, расслоения и разрыва корда. Резина шин в процессе эксплуатации подвергается структурным изменениям, однако свойства ее, как правило, остаются относительно близкими к первоначальным. Механическая технология по переработке резинотехниче-

ских изделий позволяет сохранить свойства резиновой крошки в процессе переработки. На стадии тонкого измельчения получается смесь, включающая полидисперсные и поликомпонентные материалы, а именно, резиновую крошку широкого фракционного состава, измельченный текстильный корд в виде отдельных нитей длиной от 5 до 35 мм, нити, прочно связанные с частицами резины, отдельные волокна, которые окутывают практически каждую частицу резины, а также агрегаты волокон, внутри которых находятся запутанные частицы резины неправильной формы с размерами от 0,02 до 6 мм.

Весовое содержание текстильного материала (нитей и волокон) в большинстве измельченных шин составляет от 10 до 45%, в то время как в тонкодисперсной резиновой крошке, в результате процесса разделения смеси, не должно быть более

1,5% волокна (требования к процентному содержанию текстильного материала в резиновой крошке устанавливаются производителями товаров, использующими ее в качестве сырья). В настоящее время существуют технологии, частично решающие вопросы отделения волокна от резиновой крошки, но их главным недостатком является недостаточно высокое качество разделения резиноканевой смеси и их многостадийность.

Обзор научных работ [4-7] по вопросам переработки изношенных шин и их вторичного использования был сконцентрирован на изучении состояния и перспектив переработки изношенных автомобильных шин и потребления регенерата, а также методов разделения резиноканевой смеси.

Анализ литературных источников [1-3] показал, что в настоящее время работ, посвященных разделению резиноканевых смесей, чрезвычайно мало. Практически не имеется сведений ни в России, ни за рубежом об устройствах для разделения резиноканевых смесей. Анализ конструкций грохотов [8-20] показал, что для целей разделения резиновой крошки на фракции целесообразнее всего использовать виброгрохот с упругими виброопорами и дебалансным вибровозбудителем гармонических колебаний.

Целью данной работы является исследование процесса вибропневмосепарации резиноканевой смеси и разработка его аппаратного оформления.

Исследование влияния основных факторов на динамику транспортирования резиноканевой смеси по просеивающей поверхности вибропневмосепаратора

Ориентировочные расчеты скорости транспортирования резиноканевой смеси по наклонной поверхности виброситола с использованием решений классических уравнений (1, 2) показали существенное отличие от экспериментальных данных.

$$\dot{v}_\zeta = -g \cos \alpha + A_y \omega_y^2 \sin(\omega_y t + \varphi_y), \quad (1)$$

$$\dot{v}_\xi = g \sin \alpha + A_x \omega_x^2 \cos(\omega_x t + \varphi_x), \quad (2)$$

где, \dot{v}_ζ и \dot{v}_ξ – проекции скорости на оси ζ , ξ ; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; α – угол наклона вибропневмосепаратора; A – амплитуда колебаний вибропневмосепаратора, мм; φ – фаза колебания плоскости.

Расхождение экспериментальных данных с расчетными обусловлено поликомпонентной и весьма сложной структурой исходного материала. В нашем случае, кроме силы тяжести и возмущающей силы инерции виброускорения, на частицы материала также действует аэродинамическая подъемная сила воздушного потока (рис. 1), с учетом которой уравнения (1,2) примут вид:

$$\dot{v}_\zeta = -g \cos \alpha + A_y \omega_y^2 \sin(\omega_y t + \varphi_y) + P'_{a\zeta}, \quad (3)$$

$$\dot{v}_\xi = g \sin \alpha + A_x \omega_x^2 \cos(\omega_x t + \varphi_x) + P'_{a\xi}, \quad (4)$$

где, \dot{v}_ζ и \dot{v}_ξ – проекции скорости на оси ζ , ξ ; $P'_{a\zeta}$, $P'_{a\xi}$ – проекции сил аэродинамического сопротивления на соответствующие оси ζ , ξ , отнесенные к массе частицы.

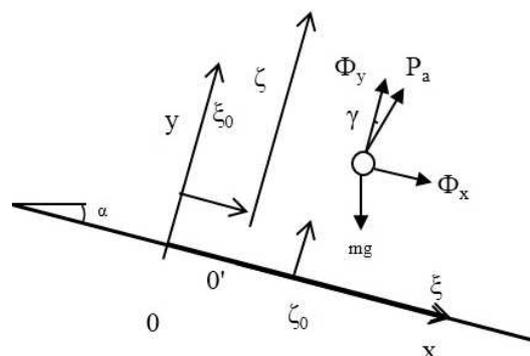


Рис. 1. Расчетная схема движения частицы над вибрирующей поверхностью (m – масса частицы; P_a – аэродинамическая подъемная сила; γ – угол между направлением действия аэродинамической подъемной силы и нормалью к поверхности виброситола)

Fig. 1. The scheme for calculation of motion of a particle over a vibrating surface (m – particle mass, P_a – aerodynamic lift, γ – angle between the direction of action of the aerodynamic lift and the normal to the surface of the vibrating table)

Даже с учетом аэродинамической подъемной силы расчетные данные по уравнениям (3,4) существенно расходятся с данными, полученными экспериментальным путем. Поэтому для расчета вибропневмосепаратора, возникает необходимость получения эмпирического расчетного уравнения скорости транспортирования резиноканевой смеси по наклонной поверхности виброситола.

Для проведения исследований нами был разработан и собран пилотный вибропневмосепаратор производительностью до 200 кг/ч. На данной установке были проведены исследования влияния частоты колебаний виброситола на скорость транспортирования резиноканевой смеси, и было выявлено, что существуют два диапазона частот (10-13 Гц; 23-26 Гц), при которых амплитуда колебаний вибропневмосепаратора резко возрастает во времени, что похоже на появление резонансных явлений в конструкции вибропневмосепаратора. Поэтому нами была выбрана такая частота колебаний виброситола (20 Гц), при которой скорость транспортирования была бы достаточно высокой, а амплитуда его колебаний не изменялась во времени.

Исследования показали, что при фиксированной частоте колебаний 20 Гц, на скорость транспортирования частиц оказывает влияние угол

наклона вибростола и его амплитуда колебаний, которая, в свою очередь, зависит от величины возмущающей силы инерции дебалансного вибровозбудителя колебаний и массы вибростола.

Из результатов проведенных исследований [6] было установлено, что амплитуда колебаний вибростола не зависит от угла наклона вибропневмосепаратора, а зависит лишь от массы вибростола и возмущающей силы дебалансного вибровозбудителя колебаний. Для проведения исследований на вибропневмосепараторе были установлены монолитные резиновые виброопоры, модуль упругости которых равен 9,5 кг/мм. Результаты исследований показывают, что амплитуда колебаний вибростола возрастает с увеличением возмущающей силы инерции вибровозбудителя, а также линейно снижается с ростом массы вибростола, что в итоге было представлено в виде расчетных зависимостей.

Исследования транспортирования частиц по вибростолу проводились при трех углах наклона и пяти различных амплитудах колебаний вибростола.

Обработка экспериментальных данных позволила получить эмпирическую зависимость для определения скорости транспортирования резиновой крошки (u , м/с) по поверхности вибропневмосепаратора, установленного под углом к горизонту:

$$u = \alpha(0,01A - 0,006), \quad (5)$$

где, α – угол наклона вибростола, °; A – амплитуда колебаний, мм;

Расчетные данные удовлетворительно совпадают с результатами эксперимента. Уравнение справедливо в диапазоне амплитуд колебаний $A = 0-3$ мм и углах наклона $\alpha = 0-16^\circ$. Максимальное расхождение экспериментальных с расчетными значениями не превышает 25%.

В ходе проведенных исследований было выявлено, что наличие волокна в резиноктаневой смеси оказывает влияние на скорость ее транспортирования по поверхности вибросепаратора.

Исследования показали достаточно сложную зависимость скорости транспортирования резиноктаневой смеси от процентного содержания в ней волокна (рис. 2).

При малых амплитудах колебаний вибростола (1-1,5мм) содержание в смеси текстильных включений не оказывает влияния на скорость транспортирования смеси. С возрастанием амплитуды колебаний текстильные включения существенно замедляют скорость транспортирования всей резиноктаневой смеси.

В результате обработки экспериментальных данных было получено эмпирическое уравне-

ние для определения влияния процентного содержания текстильного корда в смеси на общую скорость транспортирования смеси по поверхности вибростола (u , м/с):

$$u = 0,153 - 0,16 \cdot \theta + 0,097 \cdot \theta^2, \quad (6)$$

где, θ – процентное содержание волокна в резиноктаневой смеси, %.

Уравнение (6) справедливо в диапазоне амплитуд $A = 2,3-3$ мм, при $\alpha = 12^\circ$.

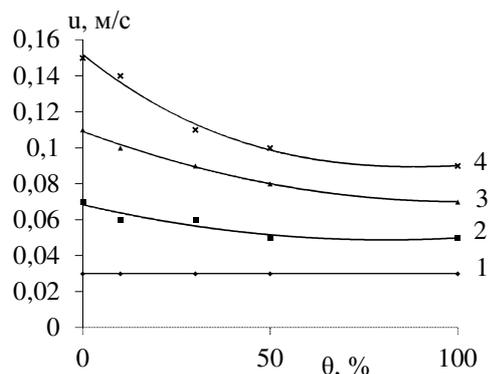


Рис. 2. Зависимость скорости движения резиноктаневой смеси от процентного содержания в ней волокна (θ):

$A=1,2$ мм; 2) $A=1,8$ мм; 3) $A=2,2$ мм; 4) $A=2,8$ мм

Fig. 2. The dependence of the velocity of movement of the rubber-fabric mixture on the percentage content of fiber in it (θ):

$A=1.2$ mm 2) $A=1.8$ mm 3) $A=2.2$ mm 4) $A=2.8$ mm

Конструкция вибропневмосепаратора

Схема нового, запатентованного [5] вибропневмосепаратора с двумя стадиями отделения резиновой крошки от волокна представлена рис. 3.

Под оптимальными понимаются такие режимы работы вибропневмосепаратора, при которых, с одной стороны, резиновая крошка должна быть как можно более полно отделена от волокон (содержание волокон в мелкой резиновой крошке не должно быть более 1,0-1,5%, при начальном содержании их в исходной смеси 10-45%), с другой – должны обеспечиваться минимальные потери самых мелких частиц резиновой крошки, уносимых воздушным потоком вместе с текстильными волокнами.

На основании проведенных исследований, предлагается интенсивно разрушать агрегаты волокна и резиновой крошки уже на входе в вибропневмосепаратор, в результате чего предложена новая конструкция вибропневмосепаратора.

Отдув распушенного волокна и нитей в устройстве (1) (рис. 3), а также в процессе транспортирования по вибростолу позволяют получить резиновую крошку (подрешеточный продукт с $d_4 < 1$ мм) с остаточным содержанием волокна менее 1,5% (при начальном его содержании 10-45%).

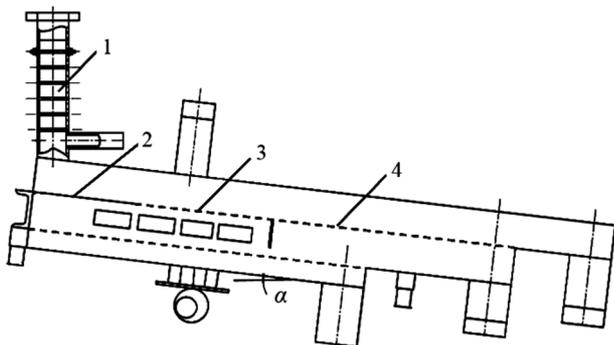


Рис. 3. Схема усовершенствованной пилотной установки по разделению резиноканевой смеси. (1 – зона разрушения и разрыхления агрегатов резиноканевой смеси и первичного удаления волокна; 2 – зона агломерации волокна; 3 – зона вторичного отделения мелких агрегатов волокна и микроволоконца, а также частичной классификации резиновой крошки; 4 – зона отсева резиновой крошки на фракции).
Fig. 3. The scheme of the improved pilot set up for the separation of rubber-fabric mixture (1 - the zone of destruction and loosening of the aggregates of the rubber-fabric mixture and the primary removal of fiber, 2 - the zone of agglomeration of the fiber, 3 - the zone of secondary separation of small aggregates of fiber and microfibre, and also the partial classification of rubber crumbs, 4 - the zone of dispersion of crumbs into fractions)

Для определения производительности вибропневмосепаратора необходимо уметь рассчитывать коэффициент эффективности разделения резиноканевой смеси в зависимости от угла наклона, амплитуды колебаний вибродола, а также величины аэродинамической подъемной силы воздушного потока. Поэтому были проведены исследования, позволяющие выявить влияние таких факторов, как угол наклона вибродола, его амплитуда и аэродинамическая подъемная сила воздушного потока на эффективность просева и чистоту резиновой крошки.

Анализ экспериментальных данных показал, что при углах наклона $\alpha = 10\text{--}16^\circ$ и амплитудах колебаний вибродола $A = 0,9\text{--}1,9\text{ мм}$, исследуемый материал просевается на 95% при длине вибродола 0,5 м. Наличие аэродинамической подъемной силы воздушного потока ускоряет транспортирование резиновой крошки по поверхности решетки вибродола, что уменьшает эффективность просева материала, но повышает чистоту тонкодисперсной резиновой крошки.

Обработка экспериментальных данных позволила получить эмпирическую зависимость

эффективности просева резиноканевой смеси ($\eta, \%$) от длины вибропневмосепаратора ($L_c, \text{ м}$) и скорости потока воздуха в отверстиях решетки ($v, \text{ м/с}$).

$$\eta = 100 \cdot (1 - e^{-(6,5 - 1,15 \cdot v) \cdot L_c}). \quad (7)$$

Под эффективностью подразумевается процент количества подрешетного продукта, прошедшего через сито, к массе этого продукта в исходной смеси. Погрешность между экспериментальными и расчетными по уравнению (7) данными составляет $\pm 8\%$ в диапазоне скоростей потока воздуха в отверстиях виброрешетки $v = 0\text{--}2,5 \text{ м/с}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Найдена зависимость скорости транспортирования резиновой крошки и текстильных волокон от угла наклона вибрирующей поверхности и ее амплитуды колебаний, которая, в свою очередь, зависит от величины возмущающей силы инерции дебалансного вибровозбудителя колебаний и массы вибродола при постоянном модуле упругости виброопор.

Показано, что наличие потока воздуха в отверстиях решетки вибропневмосепаратора, в диапазоне изменения его скоростей, достаточных для уноса волокон текстильного материала из вибро-транспортируемого слоя, повышает скорость транспортирования разделяемой резинотекстильной смеси на 15–20%. Выявлено, что при частоте 20 Гц и амплитудах 1,5–2,5 мм колебаний, интенсивное, многокаскадное разрушение агрегатов волокна и резиновой крошки, распределение разрыхленной смеси в виде тонкого, продуваемого потоком воздуха слоя позволяет уже на первой стадии разделения удалять до 60% массы текстиля.

Экспериментально обнаружено, что содержание текстильных волокон в резиноканевой смеси начинает снижать скорость ее вибро-транспортирования при амплитудах колебания вибродола более 2 мм.

ВЫВОДЫ

Результаты исследования процесса вибропневмосепарации резиноканевой смеси позволили нам разработать его аппаратное оформление. С учетом особенностей измельчения продуктов резиноканевых отходов нами предложена новая конструкция вибропневмосепаратора, защищенная патентом на полезную модель [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Беседин С.А., Хабарова Е.И.** Пути уменьшения отходов шинной промышленности. *Вестн. МИТХТ. Сер.: Соц.-гуманит. науки и экология*. 2015. Т. 2. № 2. С. 55-61.

REFERENCES

1. **Besedin S.A., Khabarova E.I.** Ways to reduce the waste of the tire industry. *Vest. MITKhT. Ser.: Sots.-Gumanit. Nauki i Ekologiya*. 2015. V. 2. N 2. P. 55-61 (in Russian).

2. Трофименко Ю.В., Воронцов Ю.М., Трофименко К.Ю. Переработка и использование изношенных шин. *Твердые бытовые отходы*. 2014. № 3 (93). С. 42-49.
3. Беляев П.С., Маликов О.Г., Меркулов С.А., Фролов В.А. Решение проблемы утилизации отходов резинотехнических изделий путем модификации дорожных вяжущих. *Вестн. Воронеж. гос. ун-та инженерных технологий*. 2014. № 2 (60). С. 129-131.
4. Козлова Е.В., Козлов А.М., Пузанова Л.А. Бизнес на страже экологии. Сб. научн. трудов вузов России "Проблемы экономики, финансов и управления производством". 2012. № 31. С. 197-201.
5. Козлов А.М., Блиничев В.Н., Комаров С.А. Устройство для сепарации резинотекстильных смесей. Патент РФ № 96795, опубл. 20.08.10.
6. Козлов А.М., Блиничев В.Н., Комаров С.А. Определение скоростей витания резиновой крошки и кордного волокна экспериментальным и расчетным путем. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2010. Т. 53. Вып. 3. С. 122 – 124.
7. Козлов А.М., Блиничев В.Н., Комаров С.А. Разработка высокоэффективного вибропневмосепаратора по разделению резинотканевых смесей. Тр. Междунар. симпозиума «Повышение ресурсо- и энергоэффективности: наука, технология, образование». М.: РХТУ. 2009. С. 12 – 13.
8. Башкарёв А.Я., Мусияко Д.В., Пешков В.С. Вибрационное перемещение поверхностного уплотнения. *Науч.-технич. ведомости СПб гос. политех. ун-та*. 2013. № 166. С. 175-178.
9. Васильев А.М., Мачихин С.А., Волков А.С., Киракосян Д.В. Вибрационное перемещение при негармонических колебаниях рабочих органов сепарирующих машин. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2013. № 10. С. 43-45.
10. Сельвинский В.В. Вибрационное перемещение в процессах транспортирования. *Вестн. Амурского гос. ун-та. Сер.: Естеств. и эконом. науки*. 2016. № 75. С. 10-15.
11. Герасимов С.А. Механизм вибрационного перемещения по поверхности. *Вестн. машиностроения*. 2005. № 5. С. 10-12.
12. Кинжебаева Д.А., Кинжебаева А.С. Математическое моделирование вибрационного перемещения тела при угловом колебании плоскости в программе Matlab. В сб.: Проблемы механики современных машин. Материалы VI Междун. конф. Восточно-Сибирский гос. ун-т технологий и управления. 2015. С. 183-189.
13. Герц М.Е., Герц М.М. Влияние привода на вибротранспортирование. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2008. № 2. С. 22-27.
14. Костарной А.В., Кудрявцев В.А. Математическое описание силы трения при вибротранспортировании в режимах без подбрасывания. *Фундаментал. исследования*. 2007. № 12-1. С. 136-137.
15. Репин С.В., Литвин Р.А., Монгуш С.С. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса вибротранспортирования строительных материалов. *Вестн. Тувинского гос. ун-та. №3 Технич. и физико-математич. науки*. 2016. № 3 (30). С. 121-129.
16. Афанасьев А.И., Чиркова А.А. Фрикционные характеристики горных пород при вибротранспортировании. *Изв. вузов. Горный журн*. 2014. № 1. С. 123-127.
2. Trofimenko Yu.V., Vorontsov Yu.M., Trofimenko K.Yu. Recycling and use of worn-out tires. *Tverdye Bytovye Ot-khody*. 2014. N 3 (93). P. 42-49 (in Russian).
3. Belyaev P.S., Malikov O.G., Merkulov S.A., Frolov V.A. The solution of the problem of waste disposal of rubber products through the modification of road binders. *Vest.Voronezh Gos. Un-ta Inzh. Tekhnologii*. 2014. N 2 (60). P. 129-131 (in Russian).
4. Kozlova E.V., Kozlov A.M., Puzanova L.A. Business is on guard of ecology. Coll. Sci. Papers of Russian Universities. "Problems of Economics, Finance and Production Management". 2012. N 31. P. 197-201 (in Russian).
5. Kozlov A.M., Blinichev V.N., Komarov S.A. Device for separation of rubber-textile mixtures. RF Patent. № 96795. Publ. 20.08.10 (in Russian).
6. Kozlov A.M., Blinichev V.N., Komarov S.A. Determination of the winding speed of rubber crumb and cord fiber by the experimental and calculated method. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim.Khim. Tekhnol*. 2010. V. 53. N 3. P. 122-124 (in Russian).
7. Kozlov A.M., Blinichev V.N., Komarov S.A. Development of a highly effective vibro-pneumatic separator for the separation of rubber-fabric mixtures. Proceedings of Int. Symp. "Improving resource and energy efficiency: science, technology, education". M.: RKhTU. 2009. P. 12 – 13 (in Russian).
8. Bashkarev A.Y., Musiyako D.V., Peshkov V.S. Vibrational displacement of the surface seal. *Nauchno-Tekhnich. Vedomosti of the St. Petersburg State.Polytekh. Un-ta*. 2013. N 166. P. 175-178 (in Russian).
9. Vasiliev A.M., Machikhin S.A., Volkov A.S., Kirakosyan D.V. Vibrational movement with non-harmonic oscillations of the working bodies of the separating machines. *Khranenie i Pererabotka Selkhozcyrya*. 2013. N 10. P. 43-45 (in Russian).
10. Selvinsky V.V. Vibrational movement in transport processes. *Vest. Amurskogo Gos. Un-ta. Ser.: Estesstv. i Gum. Nauki*. 2016. N 75. P. 10-15 (in Russian).
11. Gerasimov S.A. The mechanism of vibrational displacement on the surface. *Vest.Mashinostroeniya*. 2005. N 5. P. 10-12 (in Russian).
12. Kinzhebaeva D.A., Kinzhebaeva A.S. Mathematical modeling of the vibrational displacement of a body under angular plane oscillations in the Matlab program. In the collection: Problems of mechanics of modern machines. Materials VI Int. Conf. East Siberian State. Unt. Technology and Management. 2015. P. 183-189 (in Russian).
13. Hertz M.E., Hertz M.M. Influence of the drive on vibration transport. *Problemy Mashinostroeniya i Nadezhnosti*. 2008. N 2. P. 22-27 (in Russian).
14. Kostarinoiy A.V., Kudryavtsev V.A. Mathematical description of the frictional force at vibrotransporting in modes without tossing. *Fundamentalnye Issledovaniya*. 2007. N 12-1. P. 136-137 (in Russian).
15. Repin S.V., Litvin R.A., Mongush S.C. Theoretical and experimental study of the process of vibrotransportation of building materials. *Vest. Tuvinskogo Gos. Un-ta. Tekhnich. i Fiziko-Matem. Nauki*. 2016. N 3 (30). P. 121-129 (in Russian).
16. Afanasyev A.I., Chirkova A.A. Frictional characteristics of rocks during vibrotransporting. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Gornyy Zhurn*. 2014. N 1. P. 123-127 (in Russian).

17. **Голик В.И., Разоренов Ю.И.** Разработка транспортно-технологических схем виброtransportирования материалов и их эффективность. *Эксплуатация морского транспорта*. 2016. № 1 (78). С. 3-9.
18. **Дмитрак Ю.В.** Эффективность виброtransportирования материалов. *Науч. вестн. Южного инст. менеджмента*. 2017. № 4. С. 24-28.
19. **Герц М.Е., Герц М.М.** Арторезонансные режимы виброtransportирования. *Пробл. машиностр. и надежности машин*. 2008. № 5. С. 38-44.
20. **Никольский В.Г.** Современные технологические линии переработки изношенных автопокрышек. Основные направления использования активного порошка дискретно девулканизированной шинной резины [Электронный ресурс]. Институт химической физики РАН им. Н.Н. Семенова. <http://www.recyclers.ru>.
17. **Golik V.I., Razorenov Yu.I.** Development of transport-technological schemes of vibrotransportation of materials and their efficiency. *Ekspluatatsiya Morskogo Transporta*. 2016. N 1 (78). P. 3-9 (in Russian).
18. **Dmitrak Yu.V.** Efficiency of vibrotransportation of materials. *Nauchn. Vestnik Yuzhnogo Inst. MenedzhmentA*. 2017. N 4. P. 24-28 (in Russian).
19. **Hertz M.E., Hertz M.M.** Artoresonance modes of vibrotransportation. *Problemy Mashinostr. i Nadezhnosti*. 2008. N 5. P. 38-44 (in Russian).
20. **Nikolsky V.G.** Modern technological lines for processing worn tires. The main directions of using the active powder discretely devulcanized tire rubber [Electronic resource]. Institute of Chemical Physics RAS. N.N. Semenov. <http://www.recyclers.ru>.

*Поступила в редакцию 17.12.2017
Принята к опубликованию 18.04.2018*

*Received 17.12.2017
Accepted 18.04.2018*