

13. Ероценков, С. А. Определение коэффициента остаточных газов в двухтактном двигателе с искровым зажиганием [Текст] / С. А. Ероценков, В. А. Корогодский, А. А. Хандримайлов, О. В. Василенко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2011. – № 2. – С. 13–19.
14. Лебедев, С. Е. Исследование продувки двухтактного двигателя методом газовых анализов [Текст] / С. Е. Лебедев, М. С. Хо-вах // Дизелестроение. – 1940. – № 1, 2.
15. Корогодский, В. А. Повышение топливно-экологических показателей двухтактного ДВС с искровым зажиганием за счет совершенствования процессов внутреннего смесеобразования [Текст] / В. А. Корогодский // Двигатели внутреннего сгорания. – 2013. – № 2. – С. 21–26.

*Зростання кількості відходів, що містять кольоро-ві метали, призводить до забруднення навколишнього середовища. Вторинне використання компонентів відходів економічно вигідно не тільки з екологічних позицій. Представлено теоретичне обґрунтування та результати чисельного моделювання розділення відходів кабельно-провідникової продукції у вібраційному пневматичному сепараторі в потоці повітря. Показано, що чисельне комп'ютерне моделювання дозволяє визначити раціональну розпушеність частинок лому в робочому просторі сепаратора, що забезпечує необхідну якість продуктів розділення. Залучення відходів у вторинну переробку дозволить знизити техногенне навантаження на навколишнє природне середовище*

*Ключові слова: відходи, кабельно-провідникова продукція, компоненти, розділення, повітряна сепарація, чисельне моделювання, розпушеність*

*Рост количества отходов, содержащих цветные металлы, приводит к загрязнению окружающей среды. Вторичное использование компонентов отходов экономически выгодно не только с экологических позиций. Представлено теоретическое обоснование и результаты численного моделирования разделения отходов кабельно-проводниковой продукции в вибрационном пневматическом сепараторе в потоке воздуха. Показано, что численное компьютерное моделирование позволяет определить рациональную разрыхленность частиц лома в рабочем пространстве сепаратора, обеспечивающую необходимое качество продуктов разделения. Вовлечение отходов во вторичную переработку позволит снизить техногенную нагрузку на окружающую природную среду*

*Ключевые слова: отходы, кабельно-проводниковая продукция, компоненты, разделение, воздушная сепарация, численное моделирование, разрыхленность*

УДК 502.55

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.59786

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЕПАРАЦИИ ОТХОДОВ КАБЕЛЬНО-ПРОВОДНИКОВОЙ ПРОДУКЦИИ

**Е. И. Назимко**

Доктор технических наук, профессор\*

E-mail: ele-nazimko@ukr.net

**С. В. Малько**

Кандидат биологических наук, доцент\*

E-mail: sergmalko@rambler.ru

**А. Ю. Семенова**

Ассистент\*

E-mail: selivan\_anna@mail.ru

\*Кафедра «Экология моря»

Федеральное государственное

бюджетное образовательное

учреждение высшего образования

«Керченский государственный морской

технологический университет»

ул. Орджоникидзе, 82, г. Керчь, 298309

### 1. Введение

Развитие различных отраслей промышленности приводит к нарушению экологической обстановки, особенно в крупных городах и мегаполисах, где антропогенное воздействие сконцентрировано на ограниченной территории и проживает значительная часть населения. Резко увеличившийся рост производства электронной техники в ходе хозяйственной деятельности человечества создал одну из глобальных экологических проблем современности – проблему защиты

окружающей природной среды от негативного воздействия отходов производства и потребления.

Наиболее интенсивно отходы накапливаются в городской среде, несвоевременное удаление и обезвреживание их часто приводят к экологическому кризису. Наличие различных материалов и химических веществ в отходах способствуют загрязнению атмосферного воздуха, почв, поверхностных и грунтовых вод. При этом известно, что многие отходы содержат ценные компоненты, которые могут быть вторичным сырьем для ряда отраслей промышленности. Пробле-

ма заключается лишь в сепарации этих компонентов и сопутствующих материалов.

Технический прогресс в электронной промышленности привел к появлению новых видов лома и отходов, представляющих собой агрегаты различных материалов и металлы, проводников и диэлектриков, сплавов [1]. Металлическая часть лома представлена медью, алюминием, никелем, серебром, золотом, палладием, оловом [2].

В мировом производстве металлов использование вторичного сырья, содержащего благородные и цветные металлы, постоянно растет. По оценкам экспертов Соединенные Штаты Америки и государства Европы производят около 20 % золота и порядка 30 % серебра из вторичного сырья [3].

Использование лома цветных металлов во вторичной цветной металлургии, которая производит сбор, подготовку и переработку вторичного сырья с целью извлечения из него ценных компонентов, способствует экономии ресурсов и охране окружающей среды [2, 4].

Отходы выгодно перерабатывать, так как использование ценных компонентов из них рентабельно вследствие высокой стоимости этих компонентов, а энергетические затраты при разработке первичных руд значительно превышают затраты на получение из отходов, часто сдаваемых по низким расценкам.

С целью охраны водных ресурсов, атмосферного воздуха, почв, а также утилизации содержащихся в отходах ценных компонентов разрабатывают и внедряют различные промышленные технологии переработки отходов.

В мировой практике для переработки отходов широко применяются гравитационные методы разделения, имеющие наиболее низкие затраты [5, 6]. Гравитационное разделение, основанное на разнице в скоростях перемещения частиц различной формы, крупности и веса в разделительной среде, находит применение и для такого сложного для сепарации объекта как многокомпонентный лом кабельно-проводниковой продукции. В качестве разделительной среды используются тяжелые жидкости, суспензии, вода и воздух [7].

При сухом гравитационном разделении в качестве разделительной среды используется воздух, что часто обусловлено дефицитом воды в регионе переработки. Лом цветных металлов в больших количествах концентрируется в местах сосредоточения высокопроизводительных отраслей промышленности. Здесь обычно присутствует и напряженный водный баланс. Воздушная сепарация может быть альтернативой методам, использующим воду.

Аналитические и экспериментальные исследования разных авторов свидетельствуют о сложности проведения натуральных экспериментов [7–9]. Подавляющее число практических результатов, достигнутых в совершенствовании воздушной сепарации, получено эмпирически. В связи с этим изучение перемещения частиц лома в сепараторе в зависимости от разрыхленности является актуальной научно-практической задачей. Решение этой задачи будет способствовать разработке рациональных параметров ведения процесса, что имеет важное значение для переработки вторичного сырья и снижения техногенной нагрузки на окружающую среду.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Во многих странах для переработки кабельного лома разработаны различные технологии, но первой стадией обычно является разделение его компонентов [8, 9].

До настоящего времени механизм взаимодействия различных материалов в ходе воздушной сепарации, применяемой для разделения, изучен недостаточно, особенно на микроуровне. Исследование этих процессов весьма затруднено из-за размеров слоев, в которых происходит взаимодействие за тысячные и менее доли секунды. При этом параметры взаимодействия успевают значительно изменяться не только количественно, но и качественно.

Основные направления изысканий и развития процессов пневматической сепарации связаны с применением псевдооживленного слоя материала в рабочей зоне сепаратора [10, 11]. Компанией USI Engineering разработан комплекс для пневматической сепарации дробленых проводников тока, в котором для первой стадии разделения применяется аппарат воздушно-проходного типа, а во второй – сепаратор кипящего слоя. В первой стадии отделяются наиболее мелкие частицы изоляции, а во второй – кусочки изоляции и токонесущих металлических жил. Необходимая эффективность разделения обеспечивается многократным измельчением лома и узкой шкалой его классификации.

Технология, разработанная японской фирмой Horai Iron Works Co, предусматривает комбинированную вибросепарацию дробленых отходов кабеля, где сочетается разделение в потоке воздуха и в псевдооживленном слое [11]. В ходе исследований было установлено, что началом флюидизации является момент, когда частицы постели начинают приходить в движение. Минимальный поток воздуха, необходимый для перехода частиц в псевдооживленное состояние, зависит от крупности частиц и их веса, а также от вязкости газового потока.

В работе [7] приводится эмпирическая зависимость для определения минимального газового потока, необходимого для флюидизации, имеющая следующий вид:

$$U = 18d_s^{1.82} [\delta_a (\delta_s - \delta_a)]^{0.94} \mu^{-0.88}, \quad (1)$$

где  $U$  – минимальный газовый поток через единицу сечения постели,  $\text{кг/мин м}^2$ ,  $d_s$  – диаметр частиц твердой фазы,  $\text{м}$ ;  $\delta_a$ ,  $\delta_s$  – плотность газа и твердой фазы, соответственно,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\mu$  – вязкость газа,  $\text{Н с/м}^2$ .

Между плотностью фаз и кажущейся плотностью постели установлена эмпирическая зависимость, справедливая для момента начала флюидизации постели частиц:

$$\delta_{as} = (1 - \varepsilon) \delta_s + \varepsilon \delta_a, \quad (2)$$

где  $\delta_{as}$  – кажущаяся плотность постели частиц,  $\varepsilon$  – пористость (пористость) постели.

В свою очередь пористость постели связана с разрыхленностью слоя прямопропорциональной зависимостью.

В работе [10] приведены результаты исследований параметров движения газового потока и указывается, что при увеличении скорости ламинарный режим его движения переходит в турбулентный, что отрицательно сказывается на флюидизации и нарушает процесс сепарации.

Исследованию взаимосвязи параметров флюидизации и разрыхленности постели посвящен ряд работ зарубежных авторов при разделении различных материалов [12, 13]. Однако для кабельного лома, содержащего частицы разной формы и крупности, такие исследования не проводились. В связи с этим в данной работе поставлены задачи, приведенные ниже.

### 3. Цель и задачи исследования

Исследования процессов, происходящих при воздушной сепарации, выполненные в мировой практике, свидетельствуют о том, что одним из определяющих результаты разделения параметров является разрыхленность материала в рабочем пространстве сепаратора. От этого параметра зависит взаимодействие частиц при разделении и, соответственно, показатели качества получаемых продуктов.

Для повышения эффективности процесса сепарации многокомпонентного лома кабельно-проводниковой продукции следует изучить влияние разрыхленности на результаты разделения.

Целью работы является моделирование процесса взаимодействия частиц лома друг с другом при перемещении в сепараторе и определение влияния разрыхленности материала на траекторию движения частиц.

Для достижения цели исследования поставлены следующие задачи:

- определить метод исследования для изучения свойств отходов кабельно-проводниковой продукции;
- адаптировать модель с учетом свойств частиц кабельного лома;
- исследовать влияние разрыхленности материала на параметры движения частиц отходов.

### 4. Материалы и методы исследования взаимодействия частиц лома в камере сепаратора с помощью компьютерного моделирования с использованием метода дискретных элементов

Многокомпонентный лом кабельно-проводниковой продукции представлен кусками кабеля и проводников тока. При вторичной переплавке его получают некондиционные сплавы, что влечет за собой потери ценных металлов. Кроме того, происходит загрязнение окружающей среды продуктами разложения пластмасс и изоляционных материалов. Металлическая часть содержит медь, алюминий и другие металлы.

Эта смесь разнородна, благородные металлы обычно присутствуют в ней в виде покрытий различной толщины, припоев и компонентов сплавов [14]. Основные металлы составляют около 40 % от общей массы и содержат 50 % меди, 20 % железа, 10 % олова, никеля, свинца и алюминия по 5 % каждого и цинка порядка 3 %. Содержание благородных металлов находится в пределах: серебро – 1,8 кг/т, золото – 930 г/т и палладий – 45 г/т [15, 16].

При обобщении деталей строения кабелей и проводов можно выделить следующие основные особенности:

- 1) наличие одной или нескольких жил – проводников тока;
- 2) разделение этих жил изоляцией (резиновой, полиэтиленовой или пластмассовой);
- 3) наличие наружной оболочки из стальной брони;
- 4) внешнее покрытие – битум или пластик.

При разделении частиц многокомпонентного лома кабельно-проводниковой продукции в рабочем пространстве сепаратора их траектории будут зависеть от скоростей перемещения, которые определяются при прочих равных условиях формой и массой частиц, а также стесненными условиями движения и механическими взаимодействиями частиц при столкновениях.

Одним из современных методов исследования процессов, происходящих в сложных системах, является численное моделирование, которое сочетает в себе динамику, точность и рассмотрение широкого спектра деталей.

Для определения кинетики взаимодействия частиц друг с другом при столкновениях, определения влияния такого важного параметра как разрыхленность слоя на показатели разделения принято использование численного моделирования с помощью метода дискретных элементов и пакета компьютерных программ [17]. В работе [18] подробно описан алгоритм модели для моделирования кинетики взаимодействия фаз, которая основана на дискретных элементах. На базе этого метода многие исследователи создали его модификации, применяемые в различных сферах, например, для описания взаимодействия частиц пород между собой, для изучения течения потоков в порах осадка [19].

Работа программы базируется на основополагающих законах механики: законе Гука и втором и третьем законах Ньютона. Алгоритм расчета предполагает замену реальных твердых частиц различного вещественного состава элементами в форме шара, которые перемещаются независимо друг от друга и взаимодействуют посредством прямых соприкосновений.

На рис. 1 представлена схема взаимодействия частиц при перемещении в рабочем пространстве воздушного сепаратора [20, 21].

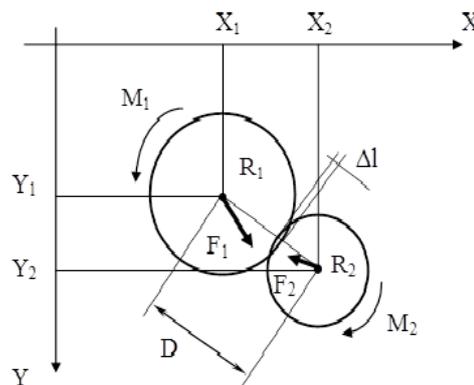


Рис. 1. Схема взаимодействия двух элементов:  $R_1, R_2$  – радиусы элементов;  $F_1, F_2$  – равнодействующая сил;  $M_1, M_2$  – моменты вращения;  $D$  – расстояние между центрами тяжести элементов;  $\Delta l$  – перекрытие поверхностей элементов при взаимодействии;  $X_1, Y_1$  и  $X_2, Y_2$  – координаты центров тяжести элементов

Размер частиц задается радиусами  $R_1$  и  $R_2$ . Рассматриваемые элементы перемещаются в результате действия сил  $F_1$  и  $F_2$ . В ходе столкновений частиц возникает их вращение в соответствии с законом Ньютона за счет действия моментов  $M_1$  и  $M_2$ . Взаимодействие рассматривается в прямоугольной системе координат  $X-Y$ .

Каждому элементу программой присваивается конкретный номер, с помощью чего можно проследить за изменением координат его центра тяжести, определяющих положение элемента в пространстве. В процессе моделирования циклически осуществляется последовательный перебор всех элементов в порядке возрастания их порядкового номера. Перемещения исследуемых элементов рассматриваются в дискретные периоды времени, которые в компьютерной реализации обозначаются как циклы счета. Комбинированные базы структуры модели позиционируются согласно итерационному циклу [22, 23]. В пределах каждого цикла координаты центров тяжести элементов  $X_1, Y_1$  и  $X_2, Y_2$ , скорости  $V_1$  и  $V_2$ , и силы являются постоянными. При переходе к следующему отрезку времени (циклу) эти параметры пересчитываются.

Ко всем элементам модели приложено постоянно действующее вертикальное ускорение  $g$ , соответствующее ускорению свободного падения тела. В результате его воздействия элементы циклически получают приращение или снижение скорости. Снижение скорости (торможение элемента) появляется, когда направление действия равнодействующей сил противоположно направлению вектора скорости перемещения элементов. Равнодействующая сил возникает от действия силы тяжести, Архимедовой (расположения) силы, демпфирующей силы или силы сопротивления среды, а также от влияния смежных элементов – «соседей» [20].

Алгоритм выполнения операций программой можно представить в следующем упрощенном виде. Из общих законов физики известно, что сила, действующая на элемент на определенном цикле счета, связана с массой элемента и ускорением соотношением:

$$F_n = a_n m, \tag{3}$$

где  $F_n$  – сила, действующая на элемент,  $m$  – масса элемента,  $a_n$  – ускорение элемента,  $n$  – номер цикла счета.

Ускорение и скорость элемента на  $n$ -ном цикле счета определяются как:

$$a_n = \frac{F_n}{m}; \tag{4}$$

$$V_n = \int_0^t a_n dt. \tag{5}$$

Здесь  $dt$  – приращение времени за один цикл счета, с.

Пользователь задает приращение времени  $\Delta t$ , равное  $10^{-4}$ – $10^{-6}$ с, которое при очень маленьких значениях в пределе стремится к  $dt$ .

После определения скорости рассчитываются изменения координат центра тяжести элемента:

$$\Delta X_n, \Delta Y_n = \int_0^t V_n dt. \tag{6}$$

Далее программа переходит на следующий цикл счета, определяются новые координаты центра тяжести элемента:

$$X_{n+1} = X_n + \Delta X_n, \quad Y_{n+1} = Y_n + \Delta Y_n. \tag{7}$$

На основании расчетов элементы перемещаются в новые координаты и определяются новые значения равнодействующей сил, появляющихся от взаимодействия элементов:

$$F_{n+1} = k \Delta l_n, \tag{8}$$

где  $k$  – коэффициент демпфирования, учитывающий сопротивление среды, а также потери энергии при взаимодействии элементов, жесткость материала элементов и другие параметры,  $\Delta l_n$  – перекрытие поверхностей элементов, возникающее при столкновениях и взаимодействии.

На новом цикле счета выполняется пересчет параметров для элементов по соотношениям (4)–(7), приведенным выше, исходя из величины силы  $F_{n+1}$ . Затем элементы перемещаются к следующей позиции, соответственно приращению компонентов скорости и времени. После перемещения элемента в новое положение за один цикл расстояние  $D$  между центрами тяжести смежных элементов изменяется и нахлестка (перекрытие)  $\Delta l$  определяется заново.

Чтобы учесть реальные процессы, протекающие при взаимодействии элементов, а именно, инерционность, сопротивление среды и потери энергии при переходе из одного состояния в другое, в алгоритм введены коэффициенты, учитывающие потерю энергии в этих случаях. В частности, имеется возможность задавать сопротивление среды движущимся элементам, а также коэффициент потерь энергии при взаимодействии элементов (коэффициент внутреннего сопротивления, определяемый взаимодействием элементов), коэффициент жесткости. Для учета силы трения, возникающей при взаимодействии отдельных элементов, в процессе вычисления приращений сил учитываются указанные в исходных данных коэффициенты трения.

В течение каждого цикла соседние смежные элементы проверяются на условия когезии и адгезии. В исходных параметрах, которые вводятся в специальный файл перед началом работы программы, введено три предела для действующих сил: предел нормального сжатия  $L_t$ , предел сдвига  $L_s$ , предел изгиба  $L_b$ .

Программа выполняет моделирование перемещения в пространстве и взаимодействия отдельных и связанных в группы элементов. Используемая модель позволяет получать достоверное динамическое поведение элементов и исследовать влияние разных параметров при взаимодействии фаз в различных физических процессах. Полученные результаты представляются в графическом виде, который отображает положение всех элементов в конкретные моменты времени. Дополнительная информация может быть получена в виде текстовых файлов, содержащих информацию о координатах центров тяжести каждого элемента, углах их поворота при взаимодействии, разрушении связей и действующих силах. Кроме того, имеется возможность наглядного анимационного представления взаимодействия и перемещения исследуемых элементов.

Работа с пакетом программ заключается в подготовке файла исходных данных, выполнении расчета, анализе полученных результатов.

**5. Результаты исследования параметров перемещения частиц лома в рабочем пространстве сепаратора в зависимости от разрыхленности материала**

В лабораторных условиях движение легких и тяжелых частиц лома (алюминия и резины) в модели сепаратора происходит под действием потока воздуха, подаваемого снизу через сетчатое днище, по схеме, представленной на рис. 2.

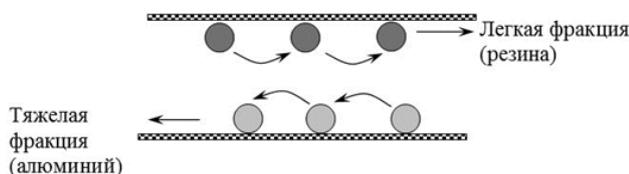


Рис. 2. Схема движения частиц легкой и тяжелой фракций в рабочей камере лабораторного сепаратора

При движении рабочей камеры сепаратора вверх под действием вибраций происходит подбрасывание и транспортирование частиц тяжелых фракций к месту разгрузки. При движении рабочей камеры вниз осуществляется подбрасывание и транспортирование частиц легкой фракции.

При моделировании учтены свойства разделяемых материалов – резины и алюминия – и задано их количественное соотношение как в дробленом ломе. Разрыхленность материала учитывается количеством и расположением частиц, а также их размерами. Стенки сепаратора имеют характерные для них свойства, поддерживаемые с помощью серии мелких элементов (№ 1–100), режим движения, угол наклона. Поддача воздуха учтена заданием соответствующей скорости частиц.

Один цикл времени счета в модели соответствует  $5 \times 10^{-5}$  с натурального времени. На рис. 3, а–в показано исходное, промежуточное и конечное положение частиц по истечении 750000 и 1500000 циклов счета (фрагменты анимации с монитора компьютера) при высокой разрыхленности материала.

При наведении курсора на частицу на мониторе высвечивается ее номер, соответствующий номеру в файле исходных данных. В текстовом файле указываются координаты центра тяжести каждого элемента, по которым можно определить его местоположение и траекторию движения. Как следует из представленных графических фрагментов, частицы не только витают в потоке воздуха, но и вращаются, сталкиваясь друг с другом и стенками сепаратора, что видно по изменению положения их радиуса.

Оценку процесса имитации можно выполнять разнообразным набором комбинированных методов в зависимости от задач исследования [24–26].

На рис. 4, а–в показаны результаты моделирования при низкой разрыхленности материала при тех же исходных данных.

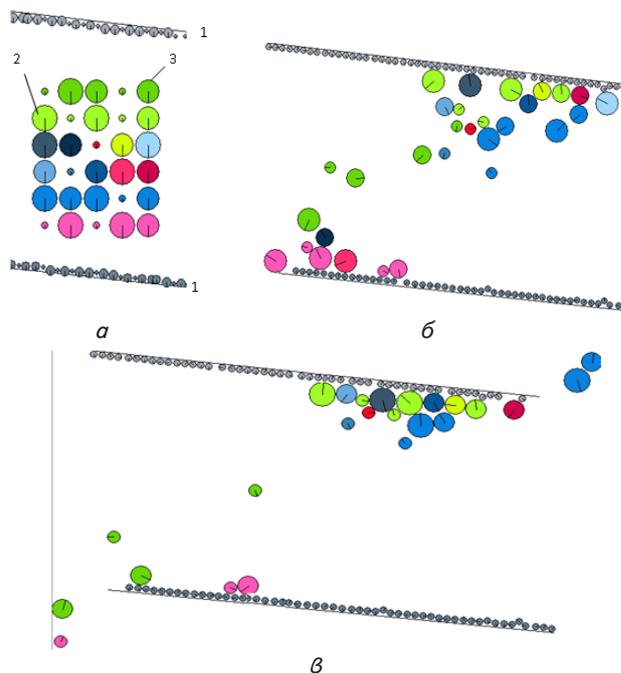


Рис. 3. Анимационные фрагменты состояния модели при высокой разрыхленности (0,9) в моменты времени: а – исходное состояние, б – 3,75 с, в – 7,5 с; 1 – стенки сепаратора, 2 – слой частиц из резины, 3 – слой частиц из алюминия (в средних слоях частицы резины и алюминия расположены случайным образом)

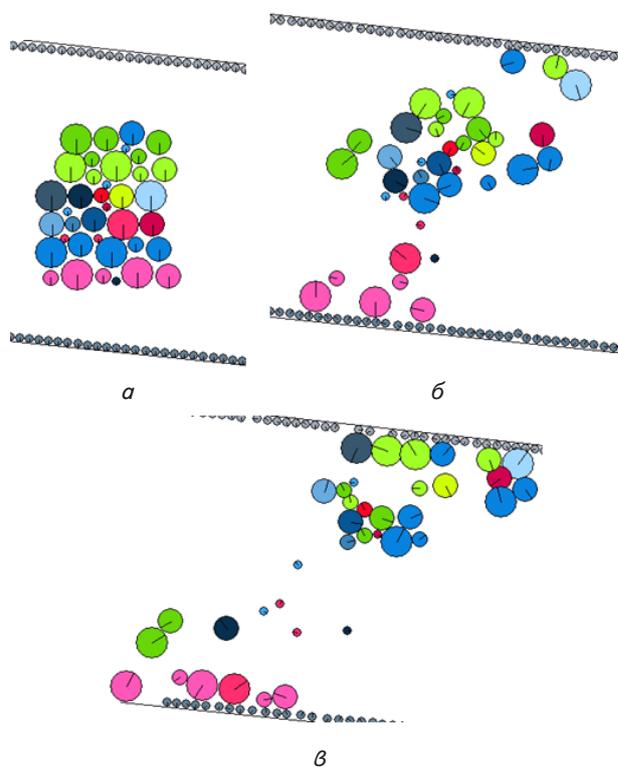


Рис. 4. Состояние модели при низкой разрыхленности (0,3) в моменты времени: а – исходное состояние, б – 3,75 с, в – 7,5 с

Из анимационных фрагментов состояния модели можно заключить, что при плотной упаковке раз-

деление частиц происходит неудовлетворительно (рис. 4, б, в). Мелкие частицы резины защемляются между более крупными частицами алюминия и наоборот. На рис. 4, в виден сформировавшийся конгломерат не разделившихся частиц. Эти конгломераты находятся длительное время в средней части сепаратора и перегружают аппарат, снижая качество разделения.

**6. Обсуждение результатов исследования влияния разрыхленности материала на траекторию перемещения частиц в рабочем пространстве сепаратора**

На основе полученных выходных данных моделирования построены траектории движения частиц резины и алюминия, представленные на рис. 5.

Здесь пунктирными линиями показаны траектории движения частиц резины, а сплошными – алюминия. Начало траектории движения частиц в рабочем пространстве моделируемого сепаратора отмечено маркером в виде косоугольного крестика.

На рис. 5, а видно, что при высокой разрыхленности материала частицы резины поднимаются вверх и перемещаются затем вправо вдоль верхней перфорированной стенки сепаратора, разгружаясь в легкий продукт (наклонный участок траектории АВ). Тяжелые частицы алюминия (сплошные линии) смещаются влево и вниз и разгружаются в тяжелый продукт.

При высокой разрыхленности (0,9) разделение материала заканчивается за принятое время моделирования, т. к. явно видны траектории движения частиц в различные продукты, которые концентрируются возле верхней и нижней стенки сепаратора. За время моделирования частицы проходят условную площадь, ограниченную координатами  $160 \times 350 = 56000$ .

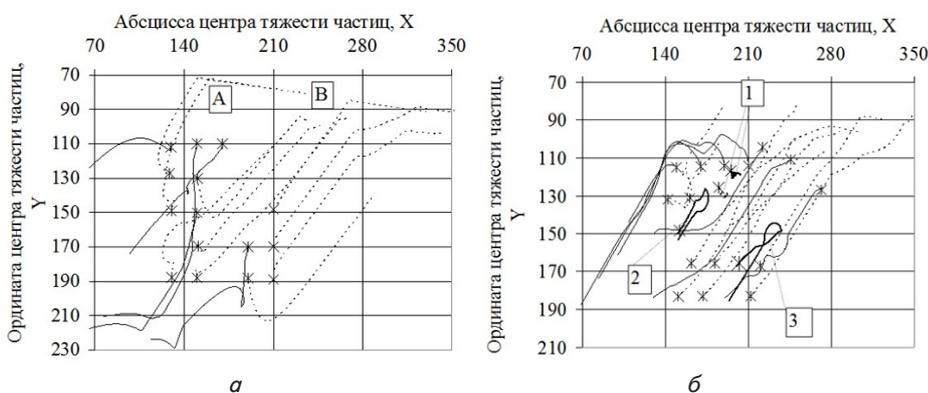


Рис. 5. Траектории движения частиц резины и алюминия: а – при рыхлой упаковке; б – при плотной упаковке

При низкой разрыхленности (0,3), рис. 5, б цифрой 1 отмечены траектории частиц алюминия и резины, циркулирующих в центральной части сепаратора в зоне исходного положения. Цифрами 2 и 3 – частицы алюминия с траекториями в виде петли (выделены жирными линиями).

Эти частицы первоначально были увлечены соседними кусочками резины и двигались вверх, после чего начали перемещаться вниз в тяжелый продукт, но за равное время моделирования так и не успели в него попасть. За время моделирования частицы проходят условную площадь, ограниченную координатами  $120 \times 280 = 33600$ , т. е. происходит снижение пути частиц в 1,7 раза.

Достоинство использованного метода заключается в возможности исследовать сложные физические процессы на микроуровне. Результаты моделирования способствуют более детальному их пониманию, что определяет возможность совершенствования технологии и оборудования для сепарации. Дальнейшие исследования будут направлены на выявление влияния других важных факторов на процесс.

**7. Выводы**

Из приведенных данных моделирования следует, что при низкой разрыхленности мелкие частицы разделяются в сепараторе неудовлетворительно. За полное время моделирования они не достигают стенок сепаратора и остаются в средней его части, образуя своеобразные конгломераты. Это приводит к засорению продуктов разделения посторонними фракциями и снижает качество разделения.

В результате проведенных исследований с помощью современного численного моделирования выполнена адаптация модели к реальным свойствам изучаемых отходов кабельно-проводниковой продукции. При этом получены анимации, отражающие процесс взаимодействия частиц лома при соударениях, а также траектории перемещения частиц в зависимости от разрыхленности материала.

Компьютерное моделирование процесса сепарации отходов кабельно-проводниковой продукции позволяет подобрать такие сочетания веществного

и гранулометрического состава отходов и производительности оборудования, обеспечивающих приемлемое качество разделения материала.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на определение скоростей и ускорений частиц различных отходов при воздушной гравитационной сепарации, что будет способствовать определению оптимальных режимов ведения процесса. Вовлечение отходов во вторичную переработку позволит снизить техногенную нагрузку на окружающую природную среду.

**Литература**

1. Самсонов, А. И. Исследование и оценка содержания драгоценных металлов в электронном ломе на первых

- стадиях шихтоподготовки [Текст] / А. И. Самсонов, К. П. Козловский, Т. И. Шуляк и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2005. – № 2. – С. 73–76.
2. Бредихин, В. Н. Технологические проблемы переработки алюминиевых отходов [Текст] / В. Н. Бредихин, В. А. Кожанов, В. Ю. Кушнерова // XIV МНТК «Машиностроение и техносфера XXI века». – Севастополь, 2007. – С. 112–116.
  3. Bredikhin, V. Intensification of Non-Ferrous Turnings Preparation for Metallurgical Processing [Text] / V. Bredikhin, A. Shevelev, I. Mirovich // XXII Int. Min. Proc. Cong. Cape Town: South Africa, 2003. – P. 450–452.
  4. Назимко, Е. И. Использование отходов цветных металлов как фактор снижения техногенной нагрузки на окружающую среду [Текст] / Е. И. Назимко, М. Л. Яковенко, А. Н. Корчевский // *Актуальные проблемы социального, гуманитарного и научно-технического знания*. – 2015. – № 2. – С. 97–99.
  5. Золотухин, В. А. Технологические и конструктивные аспекты переработки лома РЭА [Текст] / В. А. Золотухин, В. Н. Бредихин, А. В. Пластовец и др. // МНТК «Машиностроение и техносфера XXI века». – Севастополь, 2007. – С. 288–294.
  6. Назимко, Е. Исследование разделения отходов на концентрационном столе [Текст] / Е. Назимко, А. Корчевский, К. Гумениук // *Proceedings of XII-th National Conference with International Participation of the open and underwater mining of minerals*. – Bulgaria, 2013. – P. 381–388.
  7. Lupa, Z. Dry Gravity Concentration in Fluidizing Separators [Text] / Z. Lupa, J. Laskowski; J. Laskowski (Ed.) // *Int. Min. Proc. Cong. Warsaw, 2006*. – P. 1195–1215.
  8. Самсонов, А. И. Исследование работы концентрационного стола СКО-0.5 для обогащения продуктов дробления лома РЭА [Текст] / А. И. Самсонов, В. Н. Бредихин, К. П. Козловский // *Металлургия*. – 2005. – Вып. 12. – С. 41–48.
  9. Snoby, R. Dry Jigging: Advantages and Limitations [Text] / R. Snoby, R. Q. Honaker, R. Weinstein // *Proc. of XV Int. Cong. of CP. China, 2006*. – P. 448–456.
  10. Chan, E. W. Pneumatic Beneficiation using the Counter-Current Fluidizing Cascade [Text] / E. W. Chan, S. Beekmans // *International Journal of Mineral Processing*. – 2002. – Vol. 9, Issue 2. – P. 157–165. doi: 10.1016/0301-7516(82)90024-2
  11. Кофман, В. Я. Производство цветных металлов из вторичного сырья в Японии. Вып. 3 [Текст] / В. Я. Кофман. – М: ЦНИИЭИЦМ, 2006. – 39 с.
  12. Shen, L. The compound Dry Cleaning Machine and its Application [Text] / L. Shen // *Proceedings of XIV International Congress of CP. South Africa, 2002*. – P. 419–423.
  13. Li, C. Compound Dry Cleaning Technique – Study and Practice [Text] / C. Li // *Proceedings of XV International Congress of CP. – China, 2006*. – P. 439–447.
  14. Самсонов, А. И. Обогащение модулей радиоэлектронного лома, содержащего драгоценные металлы [Текст] / А. И. Самсонов, А. П. Козловский, А. В. Пластовец и др. // *Металлургия. Тр. ЗГИА*. – 2004. – Вып. 9. – С. 56–59.
  15. Романтиев, Ю. П. *Металлургия благородных металлов* [Текст] / Ю. П. Романтиев. – М.: МИСиС, 2007. – 260 с.
  16. Бредихин, В. Н. Медь вторичная [Текст] / В. Н. Бредихин, Н. А. Маняк, А. Я. Кафтоненко. – Д.: ДонНТУ, 2006. – 416 с.
  17. Nazimko, L. I. Kinetics of Phases Interaction during Mineral Processing Simulation [Text] / L. I. Nazimko, E. E. Garkovenko, A. N. Corchevsky, I. N. Druts // *Proceedings of XV International Congress of CP. – China, 2006*. – P. 785–798.
  18. Cundall, P. A. A discrete numerical Model for granular assemblies [Text] / P. A. Cundall, O. D. L. Strack // *Geotechnique*. – 1979. – Vol. 29, Issue 1. – P. 47–65. doi: 10.1680/geot.1979.29.1.47
  19. O'Connor, P. M. Discrete Element Modeling of Sand Production [Text] / P. M. O'Connor et al. // *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* – 2008. – Vol. 34, Issue 3-4. – P. 231.
  20. Гарковенко, Е. Е. Особенности флотации и обезвоживания тонкодисперсных углесодержащих материалов [Текст] / Е. Е. Гарковенко, Е. И. Назимко, А. И. Самойлов и др. – Донецк: Норд-Пресс, 2006. – 266 с.
  21. Корчевский, А. Н. Моделирование процесса сухой сепарации материалов. Настройка модели [Текст]: *наук.-техн. зб.* / А. Н. Корчевский // *Збагачення корисних копалин*. – 2005. – № 23 (64). – С. 113–119.
  22. Chernyi, S. The implementation of technology of multi-user client-server applications for systems of decision making support [Text] / S. Chernyi // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2015. – Vol. 3. – P. 60–65
  23. Логунова, Н. А. Моделирование процессов развития сложных структур на примере морской отрасли [Текст] / Н. А. Логунова, С. Г. Черный, А. Ю. Семенова, И. В. // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2015. – Т. 6, № 2 (78). – С. 37–46. doi: 10.15587/1729-4061.2015.56030
  24. Chernyi, S. The implementation of technology of multi-user client-server applications for systems of decision making support [Text] / S. Chernyi // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2015. – Vol. 3. – P. 60–65.
  25. Zhilenkov, A. Investigation performance of marine equipment with specialized information technology [Text] / A. Zhilenkov, S. Chernyi // *Energy Procedia*. – 2015. – Vol. 100. – P. 1247–1252. doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.490
  26. Chernyi, S. Analysis of complex structures of marine systems with attraction methods of neural systems [Text] / S. Chernyi, A. Zhilenkov // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2015. – Vol. 1. – P. 37–44.