

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕПАРАЦИИ ЛОМА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

*А.Н. Корчевский, ДонНТУ, г. Донецк, Украина*

Исследовано влияние разрыхленности слоя материала на показатели сепарации лома цветных металлов в пневмовибрационном сепараторе.

**Проблема ее связь с научными и практическими задачами.** Отходы производства и потребления бытовых электронных приборов, к которым относится и лом радиоэлектронной аппаратуры, являются одним из видов вторичного сырья. Такое сырье представлено различными изоляционными материалами, а также цветными и благородными металлами. Использование лома цветных металлов в цветной металлургии, занимающейся переработкой вторичного сырья, т.е. вторичной цветной металлургии, будет способствовать экономии ресурсов и охране окружающей среды [1]. Следует подчеркнуть, что в мировой практике использование вторичного сырья, содержащего благородные и цветные металлы, постоянно увеличивается. Эксперты считают, что в государствах Европы и США производится около 20% золота и 30% серебра из вторичного сырья [2].

Состав цветного лома и свойства его компонентов колеблются в широких пределах, что создает определенные трудности при разработке технологии его разделения [3].

В связи с этим исследования, направленные на изучение свойств этого материала и моделирование поведения частиц в разделительной среде с целью разработки технологии его дальнейшей сепарации, являются актуальными.

**Анализ исследований и публикаций.** Одним из наиболее дешевых методов разделения лома цветных металлов может быть сухая гравитационная сепарация в восходящем потоке воздуха, которая широко используется в зарубежной и отечественной практике для сыпучих материалов [4, 5].

Частицы сложного лома отличаются по форме и плотности, что приводит к значительным колебаниям их скоростей перемещения и соответственно траекторий в рабочем пространстве сепаратора [5].

**Постановка задачи.** Целью настоящей работы является исследование параметров перемещения частиц многокомпонентного лома цветных металлов и моделирование их разделения в пневматическом сепараторе.

**Изложение материала и результаты.** Гранулометрические характеристики материала позволяют отметить относительно равномерное распределение классов крупности в дробленной пластиковой изоляции и преобладание мелких классов алюминия с размером менее 10 мм. Средний размер частиц металлов составляет порядка 4, изоляции – 5 мм [5].

Распределение частиц в рабочем пространстве сепаратора и их разделение зависит от скоростей их перемещения, что в свою очередь связано с формой и весом частиц. Были выполнены расчеты скоростей витания и стесненного перемещения с учетом коэффициента формы частиц, связанного с коэффициентом сферичности, который в свою очередь зависит от значений параметра Лященко. Для определения расчетных значений скорости стесненного движения использовалась известная формула Лященко:

$$V_{cm} = V_{вum} m^\lambda.$$

Здесь  $V_{вum}$  – расчетная скорость витания частиц,  $m$  – коэффициент разрыхленности материала,  $\lambda$  – показатель степени, зависящий от характеристик материала.

Результаты расчетов для разных значений разрыхленности слоя материала представлены на рис. 1. Расчеты свидетельствуют о том, что разделение частиц в стесненных условиях, соответствующим условиям в рабочем пространстве пневматического сепаратора, осложнено,

так как расчетная скорость стесненного движения частиц разных материалов имеет близкие значения при различной разрыхленности.

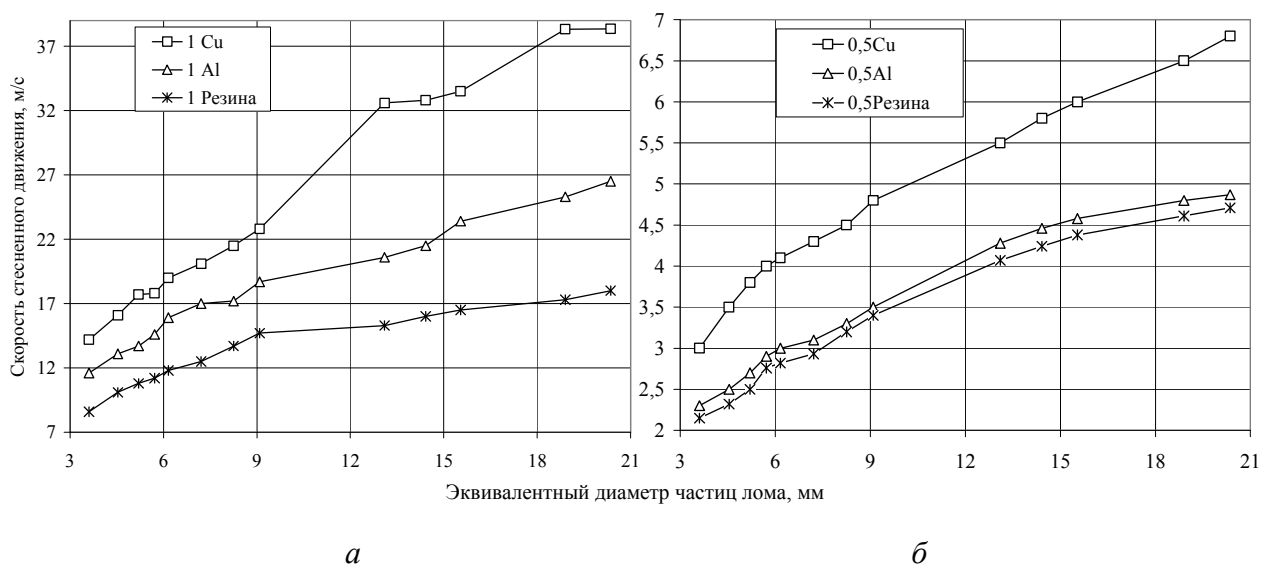


Рис. 1. Скорость стесненного перемещения при высокой *a* и низкой *б* разрыхленности слоя материала

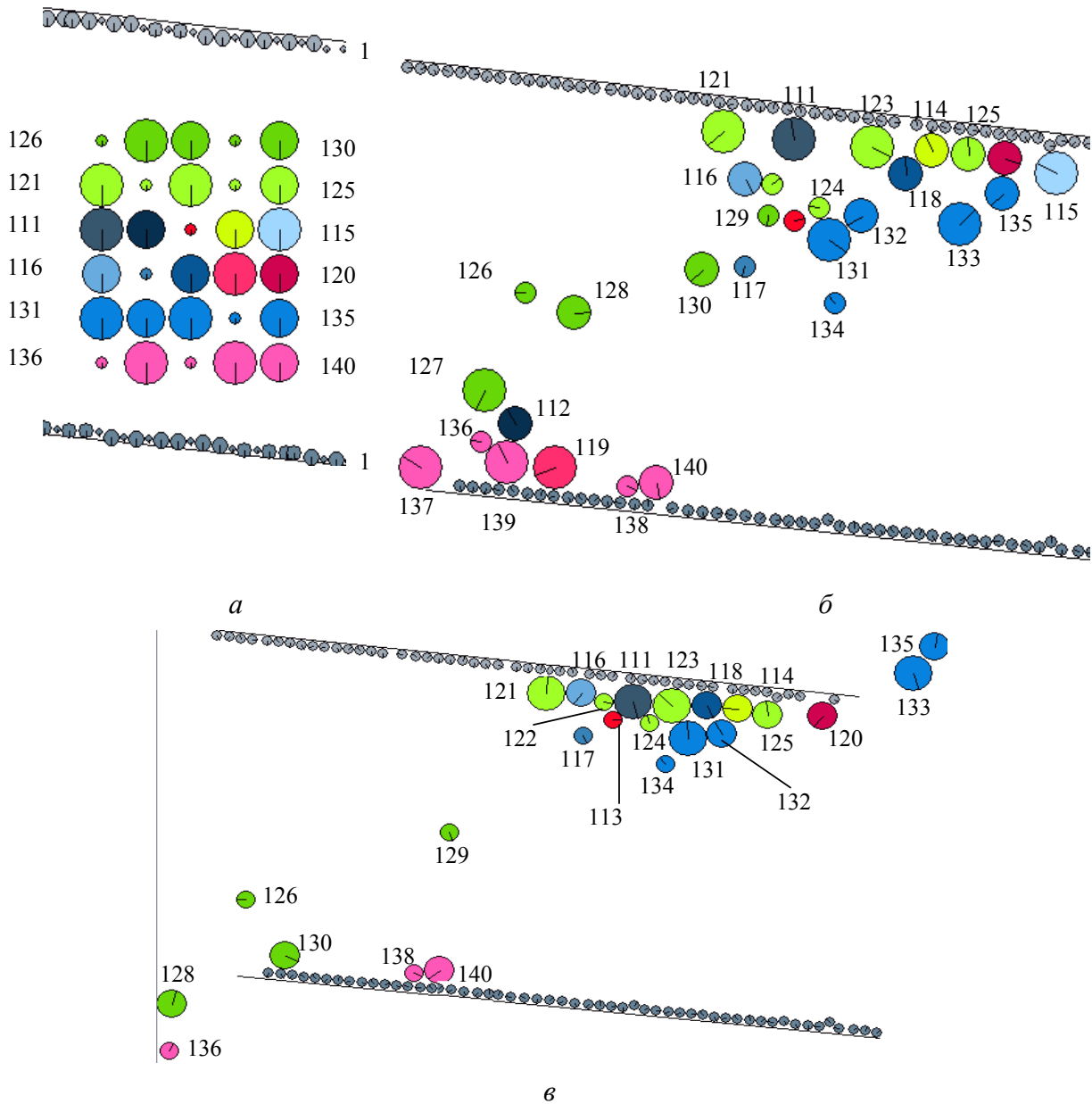
Исключением являются только частицы меди при высокой разрыхленности слоя (рис. 1, *a*). Медные частицы могут быть эффективно отделены от смеси других во всем диапазоне изменения эквивалентного диаметра. Скорости стесненного перемещения частиц алюминия и резины при высокой разрыхленности значительно отличаются друг от друга только при эквивалентном диаметре более 12 мм, т.е. для относительно крупных частиц.

Анализ данных рис. 1 позволяет заключить, что частицы меди, имеющие наибольший из всех материалов удельный вес, имеют и максимальные значения расчетной скорости стесненного перемещения. При увеличении эквивалентного диаметра от 3.6 до 20 мм расчетная скорость стесненного перемещения повышается с 14 до 38 м/с. Для частиц резины этот параметр изменяется в пределах 9-18 м/с. Скорость стесненного перемещения кусочков алюминия занимают промежуточное положение между наиболее тяжелыми и наиболее легкими частицами меди и резины и имеет значение от 11 до 26 м/с для того же диапазона изменения эквивалентного диаметра.

При низкой разрыхленности частицы алюминия и резины имеют скорости, отличающиеся друг от друга на небольшую величину (см. рис. 1, *б*). Следовательно, разделение этих материалов будет затруднено. Это потребует тщательного определения шкалы классификации материала, его разрыхленности и подбора оптимального технологического режима ведения процесса. Для исследования влияния разрыхленности на разделение частиц алюминия и резины в восходящем потоке воздуха было использовано численное моделирование. В лаборатории Моделирования необратимых процессов ДонНТУ разработана компьютерная модель для моделирования кинетики взаимодействия фаз, которая базируется на дискретных элементах и успешно применяется для исследования различных процессов [6]. Методика моделирования и физические основы, заложенные в компьютерной программе для выполнения расчетов, более подробно описана в работе [7]. В результате работы программы можно получить графические и текстовые файлы для анализа.

В модели учтены свойства разделяемых материалов - резины и алюминия - и задано их количественное соотношение, соответствующее реальному в дробленом ломе. Стенки сепаратора имеют характерные для них свойства, поддерживаемые с помощью серии мелких шариков (№1-100), и режим движения, а также угол и направление наклона. Подача воздуха снизу учтена путем задания соответствующей скорости частиц. Один цикл времени счета в

модели соответствует  $5 \times 10^{-5}$  с натурального времени. На рис. 2 показано исходное, промежуточное и конечное положение частиц по истечении 750 000 и 1 500 000 циклов счета для модели, имеющей высокую разрыхленность слоя частиц ( $m = 0,9$ ).



1 – стенки сепаратора, 111-140 – номера частиц

Рис. 2. Положение частиц в различные моменты времени: *a* – исходное, *б* – 3,75с, *в* – 7,5с

При моделировании отдельные зерна отмечены разным цветом и номером. При наведении курсора на частицу на дисплее высвечивается ее номер, соответствующий номеру в файле исходных данных. В текстовом файле указываются координаты центра тяжести каждого зерна, по которым можно определить его местоположение в данный момент времени (в пикселях) и траекторию движения. Поэтому моделирование с использованием дискретных элементов позволяет анализировать тонкие процессы взаимодействия частиц при разных режимах скоростей подачи воздуха и вибрации стенок сепаратора, которые происходят в очень маленькие промежутки времени. 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.

На рис. 3 показана наиболее плотная упаковка частиц при тех же исходных данных ( $m = 0,1$ ).

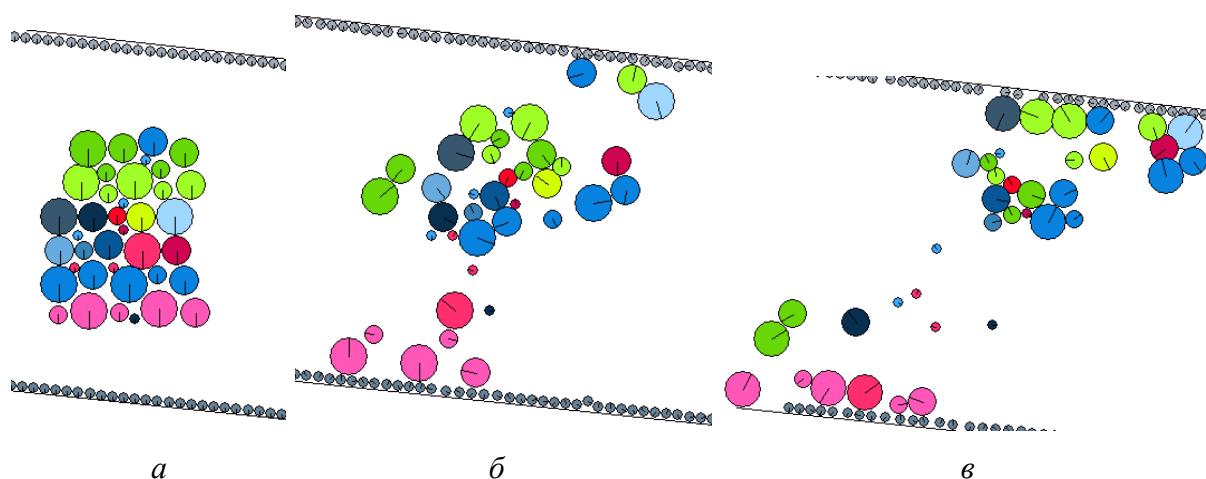


Рис. 3. Состояние модели при плотной упаковке частиц в моменты времени:  
*a* – исходное, *б* – 3,75с, *в* – 7,5с

Из анимационных фрагментов состояния модели можно заключить, что при плотной упаковке разделение частиц происходит неудовлетворительно (см. фрагменты рис. 2, б, в). При низкой разрыхленности материала в рабочем пространстве сепаратора наблюдается защемление мелких частиц более крупными с образованием конгломератов. Это замедляет процесс сепарации и приводит к взаимному засорению продуктов. Мелкие частицы не достигают стенок сепаратора и остаются в средней его части. Частицы сталкиваются друг с другом, скорость их перемещения изменяется по величине и направлению, что снижает величину их свободного пробега и отрицательно сказывается на качестве продуктов разделения.

На основе полученных выходных данных моделирования построены траектории движения частиц резины и алюминия, а также графики изменения скоростей и ускорений [8]. Эти результаты позволили определить время свободного пробега частиц и взаимодействия друг с другом, и выполнить статистическую обработку данных (рис. 4-5).

В ходе статистических исследований было установлено, что распределение значений длины свободного пробега частиц подчиняется распределению Пирсона (*Chi-square distribution*), которое описывается следующим выражением:

$$f(x) = \{1 / [2^{v/2} * \Gamma(v/2)]\} * \{x^{(v/2)-1} * e^{(-x/2)}\}, \quad (1)$$

где  $v$  - число степеней свободы,  $e$  – основание натуральных логарифмов,  $\Gamma$  – гамма-функция [9].

Число степеней свободы (количество значений) изменяется в интервале  $v = 1, 2, \dots, n$ . Параметр  $x$  (интервал изменения значений длины свободного пробега в данном случае) должен быть положительным:  $0 < x$ .

Статистический анализ свидетельствует о том, что для длины свободного пробега (рис. 4) характерно преобладание невысоких значений этого параметра при любом значении разрыхленности, т.е. частицы движутся без столкновений в небольших объемах пространства. При высокой разрыхленности большая часть значений не превышает 0,5, при низкой – 0,2. При этом в первом случае максимум параметра составляет 5,0, а во втором – не превышает 3,4.

Время контакта частиц при столкновениях подчиняется нормальному закону распределения, о чем свидетельствуют данные рис. 5. При высокой разрыхленности наибольшее число значений времени контакта находится в интервале 0,5-0,7 с, при низкой – от 2,8 до 3,4 с.

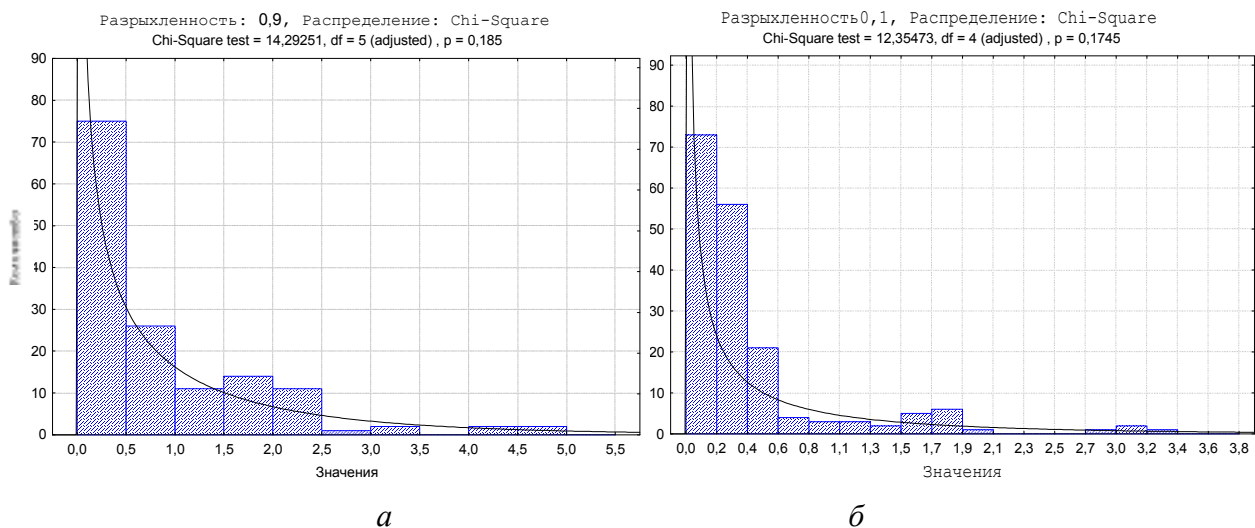


Рис. 4. Распределение Пирсона для длины свободного пробега при разных значениях разрыхленности: *a* -  $m = 0.9$ ; *б* -  $m = 0.1$

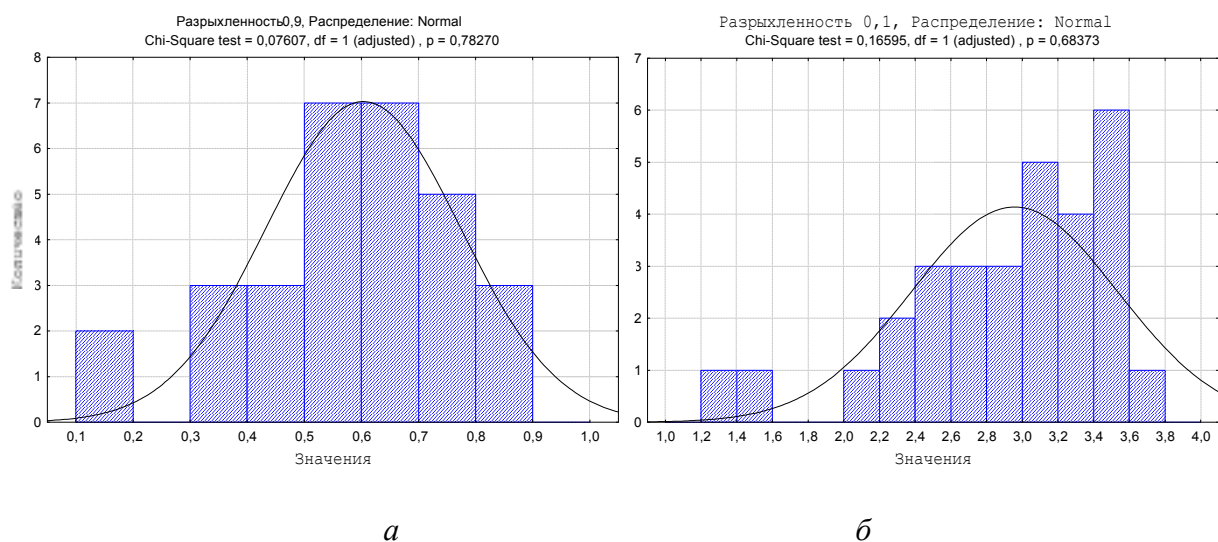


Рис. 5. Нормальный закон распределения значений времени контакта частиц при значениях разрыхленности: *a* -  $m = 0.9$ ; *б* -  $m = 0.1$

Выполненные компьютерные исследования параметров движения частиц в рабочем пространстве пневматического сепаратора позволили заключить, что оптимальный технологический режим разделения должен определяться соотношением удельных значений длины свободного пробега частиц и времени их контакта. В графической форме это выражено на рис. 6.

Из графика следует, что снижение удельного времени контакта частиц и повышение удельной длины свободного пробега начинается со значения разрыхленности в диапазоне  $m = 0,3-0,5$ . Значение разрыхленности равное 0,5 соответствует началу изменения этих параметров, когда следует ожидать улучшения результатов разделения материала без существенного снижения производительности сепаратора.

Проведенное численное моделирование по исследованию влияния разрыхленности на параметры перемещения частиц сложного лома цветных металлов в рабочем пространстве пневмовибрационного сепаратора с помощью компьютерной программы, основанной на дискретных элементах, позволили сделать следующие основные выводы.

Из анимационных фрагментов состояния модели можно заключить, что при плотном расположении частиц (низкой разрыхленности) разделение происходит неудовлетворительно.

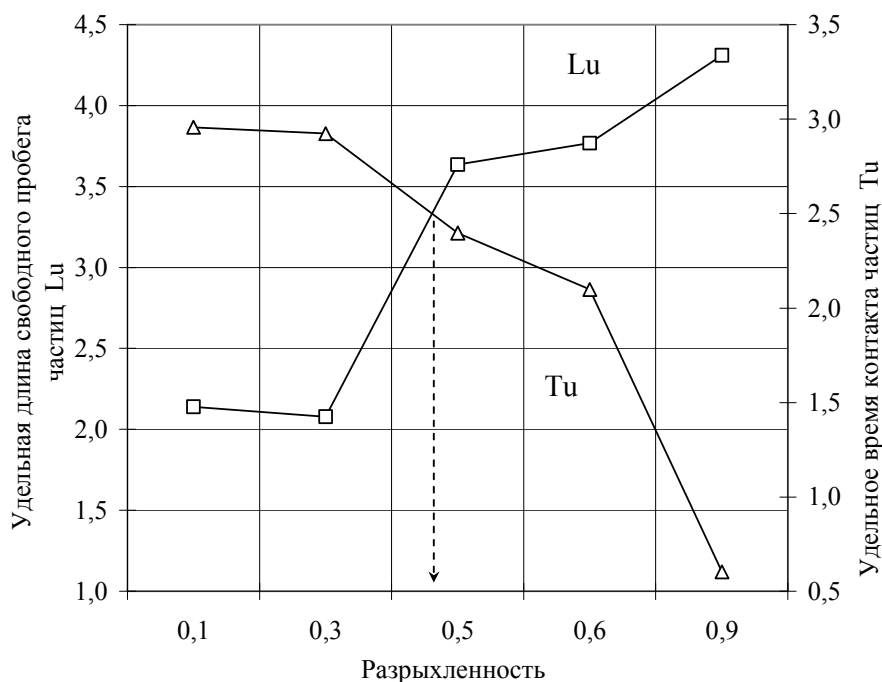


Рис. 6. Влияние разрыхленности слоя материала на длину свободного пробега частиц и время взаимодействия друг с другом

При этом мелких частиц образуют конгломераты с более крупными, что замедляет процесс сепарации и приводит к взаимному засорению продуктов. Мелкие частицы не достигают стенок сепаратора и остаются в средней его части, образуя циркулирующую нагрузку.

Графики ускорения частиц резины и алюминия, имеющие значительные горизонтальные участки, свидетельствуют о том, что при высокой разрыхленности ( $m = 0,9$ ) большую часть времени частицы движутся без столкновений с соседними зёрнами. При уплотнённом расположении частиц на графиках ускорений практически отсутствуют горизонтальные участки, когда ускорение не изменяется, т.е. частицы постоянно сталкиваются друг с другом и возникает как следствие резкое изменение скорости по величине и направлению.

При высокой разрыхленности большое число частиц имеет значительную длину свободного пробега.

Максимальное время контакта (взаимодействия) частиц между собой при столкновениях увеличивается при снижении разрыхленности и имеет наибольшее значение при самом плотном расположении разноразмерных частиц ( $m = 0,1$ ). Удельное время контакта частиц имеет максимальное значение при минимальной разрыхленности  $m = 0,1$  (см. рис. 6).

В ходе статистических исследований установлено, что для длины свободного пробега характерно преобладание невысоких значений этого параметра при любом значении разрыхленности, т.е. частицы движутся без столкновений в небольших объёмах пространства. При высокой разрыхленности большая часть значений  $L$  не превышает 0,5, при низкой – 0,2.

Время контакта частиц при столкновениях подчиняется нормальному закону распределения. При высокой разрыхленности наибольшее число значений времени контакта находится в интервале 0,5-0,7 с, при низкой – от 2,8 до 3,4 с.

Снижение удельного времени контакта и повышение удельной длины свободного пробега частиц начинается со значения разрыхленности в диапазоне  $m = 0,3-0,5$ . Значение разрыхленности равное 0,5 соответствует началу изменения этих параметров, когда следует ожидать улучшения результатов разделения материала без существенного снижения производительности.

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Дальнейшие исследования процесса сепарации лома цветных металлов гравитационными методами могут быть направлены на разработку технологических режимов разделения с учетом полученных данных о влиянии разрыхленности на процесс.

#### Список литературы

1. Ю.А. Котляр, М.А. Меретуков. *Металлургия благородных металлов. Учебное пособие.* – М.: Академия средств массовой информации (АСМИ). - 2002. – 465 с.
2. Л.С. Стрижко. *Металлургия золота и серебра.* – М.: МИМиС. - 2001. – 336 с.
3. Козловский К.П., Шуляк Т.И., Пластовец А.В. Подготовка лома интегральных микросхем в пластмассовых корпусах, содержащих золото, для гидрOMETаллургической переработки. // *Металлургическая и горнорудная промышленность. Днепропетровск.* – 2003. - № 2. - С. 74-75.
4. Сухин Н.В., Корчевский А.Н., Назимко Е.И. Применение вибрационного пневматического сепаратора при разделении лома цветных металлов // *Збагачення корисних копалин.* – 2004. - № 20 (61). – С. 83-88.
5. Корчевский А.Н., Назимко Е.И., Апоначенко С.С. Исследование свойств лома цветных металлов как объекта обогащения // *Вісник Криворізького технічного університету.* – 2007. - №16. - С. 68-71.
6. L.I. Nazimko, E.E. Garkovenko, A.N. Corchevsky, I.N. Druts *Kinetics of Phases Interaction during Mineral Processing Simulation // Proceedings of XV International Congress of Coal Preparation. China. 2006. p. 785-798.*
7. Корчевский А.Н. Моделирование процесса сухой сепарации материалов. Настройка модели. // *Збагачення корисних копалин.* – 2005. - № 23(64). – С. 113-119.
8. Корчевский А.Н. Влияние разрыхленности слоя материала на показатели пневматической сепарации лома цветных металлов // *Збагачення корисних копалин.* – 2008. - № 33(74). – С. 106-111.
9. Козин В.З. *Экспериментальное моделирование и оптимизация процессов обогащения полезных ископаемых.* М., Недра, 1984, 112 с.