

УДК 621.926

**Л. А. Сиваченко**<sup>1</sup>, доктор технических наук, доцент,**Л. Л. Сотник**<sup>2</sup>, кандидат технических наук, **М. С. Кузьменкова**<sup>3</sup><sup>1</sup>Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», пр-т Мира, 43, 212000 Могилев, Республика Беларусь, +375 (44) 792 86 83, 228011@mail.ru<sup>2,3</sup>Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, <sup>2</sup>+375 (29) 803 45 28, Sotnikdin037@gmail.com, <sup>3</sup>+375 (29) 534 63 81, maryiask@yandex.by

## К ФОРМИРОВАНИЮ ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ АДАПТИВНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕРАБОТКИ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье показана несомненная практическая актуальность и описаны основные подходы реализации адаптивных методов переработки дисперсных материалов на базе процессов измельчения, диспергирования, смешивания, разделения по крупности, механоактивации, микрогранулирования, дозирования и др. Изложены наиболее характерные направления адаптации рабочего оборудования технологических машин к физико-механическим и реологическим свойствам переработки продуктов. Рассмотрены конкретные варианты практической реализации аппаратов адаптивного действия с использованием новых классифицирующих признаков.

**Ключевые слова:** адаптивные механизмы; дезинтеграторные технологии; дисперсные материалы; рабочий орган; помол; механоактивация; энергонапряженность.

Рис. 4. Библиогр.: 12 назв.

**L. A. Sivachenko**<sup>1</sup>, DSc in Technical Sciences, Associate Professor,**L. L. Sotnik**<sup>2</sup>, PhD in Technical Sciences, **M. S. Kuzmenkova**<sup>3</sup><sup>1</sup>Interstate Educational Institution of higher Education "Belarusian-Russian University",

43 Mira Ave., 212000 Mogilev, the Republic of Belarus, +375 (44) 792 86 83, 228011@mail.ru

<sup>2,3</sup>Institution of Education "Baranavichy State University", 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy, the Republic of Belarus, <sup>2</sup>+375 (29) 803 45 28, Sotnikdin037@gmail.com, <sup>3</sup>+375 (29) 534 63 81, maryiask@yandex.by

## TO THE FORMATION OF THE ADAPTIVE MECHANISMS TECHNICAL BASE FOR DISPERSED MATERIALS PROCESSING

The undoubted practical relevance is shown and the main approaches to the implementation of adaptive methods of dispersed materials processing based on the processes of grinding, dispersing, mixing, separation by size, mechanical activation, micro granulation, dosing and others are described. The most characteristic directions of the working equipment adaptation of technological machines to the physic-mechanical and rheological properties of products processing are described. Specific variants of the practical implementation of adaptive action devices using new classifying features are considered.

**Key words:** adaptive mechanisms; disintegrator technologies; dispersed materials; working organ; grinding; mechanical activation; energy stress.

Fig. 4. Ref.: 12 titles.

**Введение.** Из всего многообразия используемых в промышленности технологий дезинтеграторные являются одними из важнейших. Они включают в себя дробление, помол, в том числе тонкий и сверхтонкий, диспергирование, механоактивацию и механосинтез, классификацию материалов по крупности, уплотнение, гранулирование, механотермическую обработку и целый ряд других процессов. Дезинтеграторные технологии основаны на механизмах разрушения, деформирования, диспергирования и других видах интенсивных

внешних и внутренних воздействий, обеспечивающих управляемое изменение структуры и свойств как отдельных частиц, их конгломератов и дисперсных сред, так и композиционных материалов в целом [1; 2].

Мировые тенденции развития техники убедительно показывают, что дезинтеграторные аппараты из простого орудия труда, обеспечивающего, как правило, одну операцию, превращаются в технологические комплексы, осуществляющие сложную и глубокую переработку материалов. Многообразие используемых машин и еще большее многообразие перерабатываемых продуктов и особенно их свойств требует особых подходов и методов. Магистральный путь к решению этих и многих других задач — создание новых поколений технологических машин, способных оптимизировать весь процесс получения качественных продуктов, начиная с единичных актов воздействий и заканчивая системным управлением всего производственного цикла [3; 4].

Используемое сегодня дезинтеграторное оборудование обладает существенными недостатками и имеет огромный потенциал для развития, а технологии на его основе являются важнейшим фактором энерго- и ресурсосбережения, экологической безопасности и экономической устойчивости. В целом это направление уже в среднесрочной перспективе станет составной частью цивилизационного прогресса в качестве умных машин и технологий [1; 2].

Технические средства, используемые для реализации дезинтеграторных технологий, тем не менее достаточно активно развиваются во всем мире. В качестве примера можно назвать следующие машины и аппараты: центробежно-ударные и конусно-инерционные дробилки, вибрационные, планетарные, струйные, электромагнитные, вихревые, кавитационные и коллоидные мельницы, дезинтеграторы, бисерные аппараты, атриторы, гомогенизаторы, башенные помольные агрегаты и многие другие виды оборудования [5].

Большинство из перечисленных технических средств имеет свои ограниченные области использования и характеризуется существенными недостатками как конструктивного, так и технологического плана, что определяет и задает в настоящее время исходные требования к создаваемым видам оборудования с учетом задач современного материаловедения. Именно эти факторы, а также огромная энергоемкость дезинтеграторных переделов оказывают стимулирующее влияние на разработку новых эффективных конструкций технологических машин [1; 3; 4].

**Материалы и методы исследования.** Одним из важнейших направлений совершенствования машин для дезинтеграторной переработки материалов является дополнение их рабочего оборудования адаптивным. Основные направления адаптации, которые основаны на механических методах и доступны для практического использования, включают в себя [6; 7]:

- выбор траектории движения, например, по пути наименьшего сопротивления при перемещении в обрабатываемой среде;
- выбор положения в пространстве;
- выбор или подстройка под скорость, ускорение или характер движения;
- резонансная подстройка частоты колебаний или демпферное преобразование энергии внешнего возбуждения колебаний в полезную работу;
- выбор рабочего усилия или силы сопротивления внешнему воздействию;
- изменение кинетической энергии движущегося рабочего органа или рабочего агрегата;
- подстройка по температуре, внешнему давлению, влажности, освещенности, крупности частиц;
- демпфирование внешних воздействий для снижения динамических нагрузок.

Техническая реализация адаптивных методов в дезинтеграторных технологиях содержит дополнительные методологические направления: технологическую вибротехнику, прикладную физико-химическую механику, вариативные механизмы организации и проведения технологических процессов, а также использование аномальных эффектов при их протекании. Перечисленные подходы и методы в максимальной степени положены в основу проектирования новых видов оборудования для дезинтеграторной переработки материалов [7].

**Результаты исследования и их обсуждение.** Анализ описанных направлений использования адаптивных механизмов для дезинтеграторной переработки дисперсных материалов позволяет вычлениить те из них, которые могут быть реализованы доступными методами, построенными на известных и собственных исследованиях и разработках [6—8]: кинематическое деформирование рабочих органов; управляемое движение обрабатываемого материала в рабочей камере; кинематика движения рабочих органов; управление контактными взаимодействиями в рабочих зонах.

С учетом описанной методической базы предложены разработанные варианты новых конструкций аппаратов адаптивного действия для комплексной переработки материалов дезинтеграторными способами. Эти конструкции систематизированы с точки зрения функциональных признаков адаптивного воздействия на обрабатываемые материалы. Примеры выполнения некоторых видов технологических аппаратов адаптивного действия приведены ниже. Дадим краткую оценку каждой из представленных конструкций.

На рисунке 1 представлены схемы с кинематическим деформированием рабочих органов [5; 9; 10].

*Схема 1. Виброуплотнитель бетонных смесей.* В качестве излучателя колебаний, передаваемых в уплотняемую среду, используется цилиндрическая пружина, связанная с генератором колебаний. Направление колебаний совпадает с вектором силы тяжести. Конструкция обладает высокой эффективностью, так как может работать по методу протяжки и кроме уплотнения позволяет непосредственно в процессе укладки производить виброобработку и механоактивацию компонентов бетонной смеси.

*Схема 2. Пружинный питатель-дозатор.* Транспортирующим звеном устройства является вращающаяся в трубчатом корпусе дугообразно изогнутая пружина, которая обеспечивает равномерную подачу сыпучего материала с одновременным его диспергированием, а при загрузке двух или более компонентов — качественным перемешиванием. Конструктивно отличается простотой и эффективностью работы за счёт совмещения ряда технологических функций.

*Схема 3. Смеситель-диспергатор с гибким корпусом.* Конструкция выполнена в виде перистальтического пустотелого ротора, который может быть изогнут для образования клиновидных зон между гофрами. Подобная установка способна достаточно эффективно перерабатывать пастообразные продукты и различные другие дисперсные составы и композиции, а также взрывоопасные, токсичные и горючие продукты.

*Схема 4. Пружинная мельница.* Рабочими органами пружинных мельниц являются установленные в опорах и связанные с приводом вращения дугообразно изогнутые цилиндрические пружины с плотно прижатыми витками в зоне минимального радиуса их изгиба. Процесс измельчения в пружинных мельницах характеризуется высокой интенсивностью и происходит непрерывно в клиновидных пространствах между витками пружин. Область применения пружинных мельниц — тонкий и сверхтонкий помол материала твёрдостью до 5...7 единиц по шкале Мооса, прочностью до 150...200 МПа, механоактивация строительных смесей, приготовление суспензий, эмульсий и паст.



Схема 1



Схема 2

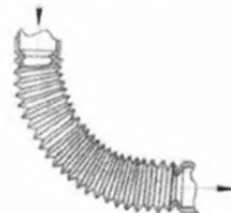


Схема 3



Схема 4

**Рисунок 1. — Адаптивные механизмы с кинематическим деформированием рабочих органов**

Конструкция механизмов с управляемым движением обрабатываемого материала показана на рисунке 2 [5—7; 11].

*Схема 1. Измельчитель с многолезвийным рабочим оборудованием.* Рабочее пространство данного измельчителя заполнено набором режущих элементов, включая зубчатые фрезы. Смонтированные на коническом роторе режущие элементы образуют клиновидные рабочие зоны, уменьшающиеся по его высоте. Удаление измельчённого продукта осуществляется в поле центробежных сил через боковые решётки, выполненные в корпусе. Основное назначение данной конструкции — измельчение бутылок из полиэтилентерефталата (ПЭТФ), волокнистых и неоднородных по структуре материалов, а также переработка твёрдых коммунальных отходов, растительного сырья и других подобных материалов.

*Схема 2. Рессорно-стержневый измельчитель.* Его основное назначение — предварительное измельчение минеральных материалов, механоактивация строительных смесей, селективное дробление горных пород и т. д. Измельчитель содержит установленное на раме в шарнире на опорной стойке подвижное коромысло с вибратором на одном конце и стержневым рабочим оборудованием на другом. Процесс измельчения осуществляется между двумя рядами параллельных между собой рядов дугообразно изогнутых стержней (рессор), причём их нижний ряд неподвижен, а верхний совершает колебательные движения вместе с коромыслом, на котором он закреплён. Измельчение продукта происходит без задержки его в рабочих зонах.

*Схема 3. Валковый щеточно-щечковый измельчитель.* Повышение эффективности переработки анизотропных и сложных по составу и свойствам материалов обеспечивается совместной работой щеточного вала и подвижной вибрацией щетки, образующей сходящееся серповидное пространство, что способствует активной подаче кусков исходного материала зоны разрушения.

*Схема 4. Дробилка молотковая с управляемым движением обрабатываемого материала.* Основной отличительной особенностью дробилки следует считать расстановку ударных элементов посекционно с определёнными разрывами между ними и расположенными над ними расширительными зонами. Такое выполнение конструкции позволяет создать управляемый характер движения материала, который после каждого последовательного перехода через секции ударных элементов, попадая в расширительные зоны, теряет свою скорость и поступает на нижерасположенный по уровню ряд ударных элементов с максимальной разницей в скоростях между ними. Итогом такого решения является повышение степени измельчения, улучшение селективности процесса разрушения частиц материала и снижение энергоёмкости.

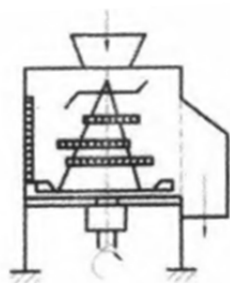


Схема 1

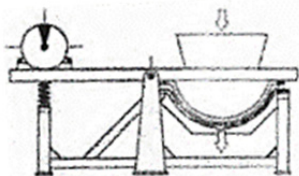


Схема 2

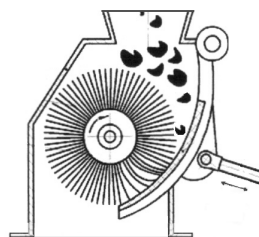


Схема 3

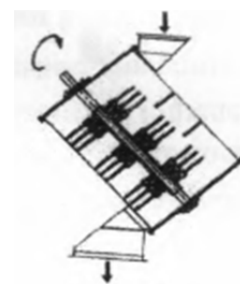


Схема 4

**Рисунок 2. — Адаптивные механизмы с управляемым движением материала**

Кинематика движения рабочих органов приведена на рисунке 3 [6; 7; 12].

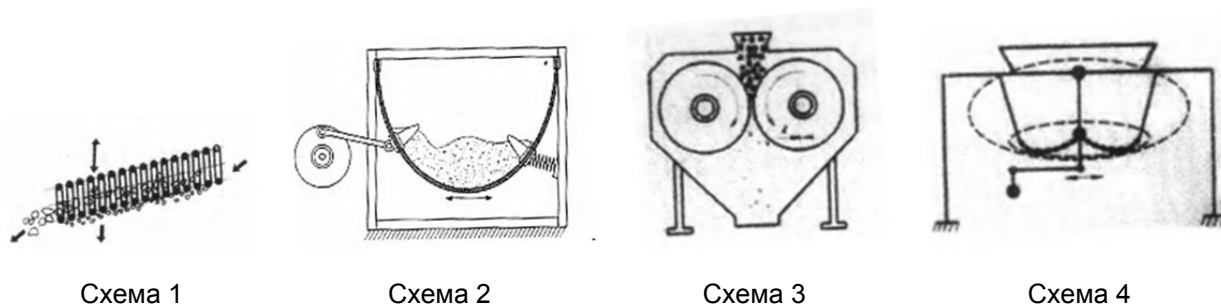
*Схема 1. Пружинный грохот.* Просеивающей поверхностью грохота являются пружины, связанные с механизмом колебаний. Подлежащий разделению материал загружается в полость пружин, где под действием вибрации мелкая (подрешетная) фракция просыпается через зазоры между витками, а крупная (надрешетная) проходит через нижние отверстия полости пружин, не попадая в зазоры между витками. Граница разделения регулируется изменением зазора между витками и находится в диапазоне 0,2...5,0 мм.

*Схема 2. Многоцелевой аппарат с волновой рабочей камерой.* Основу конструкции составляет гибкая лоткообразная наклонно установленная оболочка, у которой один борт связан с приводом её колебаний, а второй — с демпфером. Интенсивные перемещения стенок камеры обеспечивают высокую интенсивность процесса переработки находящегося в ней материала. Соответствующее исполнение рабочей камеры (оболочки) позволяет эффективно проводить процессы перемешивания, грохочения, сушки или гранулирования.

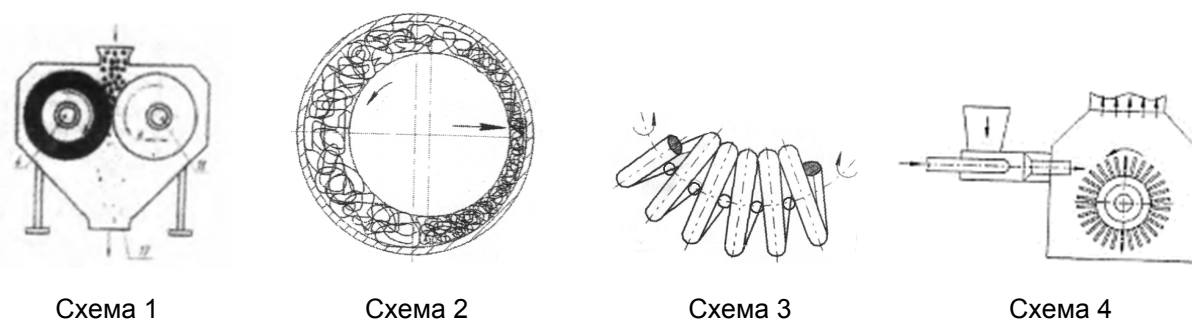
*Схема 3. Вибровалковый агрегат.* Содержит два горизонтальных вала, один из которых совершает вращательное движение, а второй — вибрационные колебания совместно с эксцентриковым валом. Обеспечивает сложное напряженное состояние в разрушаемом слое материала и отличается высокой удельной динамической энергонапряженностью. Может найти применение для селективной переработки минерального сырья, механоактивации, разупрочнения структуры и измельчения особо прочных горных пород.

*Схема 4. Цепной агрегат для переработки влажных сырьевых материалов.* Конструкция выполнена из набора цепных элементов, соединенных между собой и образующих лоткообразную рабочую камеру, которая своей нижней частью приводится в возвратно-поступательные перемещения. Для интенсификации рабочего процесса цепные элементы могут оснащаться зубьями.

Адаптивные механизмы с управлением контактными взаимодействиями показаны на рисунке 4 [5—7; 9].



**Рисунок 3. — Адаптивные механизмы с кинематикой движения рабочих органов**



**Рисунок 4. — Адаптивные механизмы с управлением контактными взаимодействиями**

*Схема 1. Иголфрезерный валковый измельчитель (см. рисунок 4).* Его рабочий процесс осуществляется между двумя вращающимися навстречу друг другу валками, один из которых выполнен в виде цилиндрической щётки. Подобное решение позволяет интенсифицировать единичные акты разрушения частиц исходного материала и получать готовый продукт с измененными и улучшенными свойствами, например, активировать композиции вяжущих веществ и осуществлять селективное измельчение полезных ископаемых. Иголфрезерные агрегаты отличаются большим конструктивным разнообразием и основываются на использовании металлических щёток, которые в данном случае выполняют принципиально новые технологические функции.

*Схема 2. Волоконная мельница.* Основой такого оборудования являются наборы тончайших металлических волокон, образующих кольцевую зону измельчения, которая имеет возможность кинематического деформирования для взаимного перемещения волокон относительно друг друга. Процесс помола осуществляется по мокрому способу с принудительной прокачкой мелкодисперсной суспензии через пространство между соприкасающимися волокнами. Предполагается, что такая конструкция позволит получать ультрадисперсные композиции различного назначения.

*Схема 3. Пружинная мельница с загрузкой мелкими мелющими телами (шариками).* Конструкция позволяет создать максимально возможные контактные напряжения и тем самым повысить энергонапряженность процесса и дисперсность измельченного продукта. Является хорошим механоактиватором и способна производить механосинтез ряда органических и минеральных веществ.

*Схема 4. Иголфрезерный струйный аппарат.* Принцип действия заключается в разгоне частиц материала газовым потоком до высоких скоростей и подаче через сопло на быстро вращающийся ротор с иголфрезерными насадками. Таким образом суммируется скорость удара, а разрушение частиц происходит не на плоской поверхности, которая релаксирует их кинематическую энергию как за счёт демпферного слоя, так и вследствие устранения эффекта выдувания частиц из рабочей зоны. Аппарат предназначен для тонкого и сверхтонкого помола различных материалов.

Описанные варианты конструкций новых видов разработанного оборудования охватывают наборы единичных аппаратов, которые могут образовывать технологические цепи агрегатов для комплексной переработки сырья и материалов. В каждой из приведенных схем использованы соответствующие механизмы интенсификации рабочих процессов. Представленные конструкции в своем большинстве основаны как на экспериментальных образцах, которые испытаны в лабораторных условиях и показывают высокую технологическую эффективность, так и на аппаратах, которые достаточно широко используются в промышленных условиях.

Предлагаемый перечень технологических аппаратов основан на обобщении предшествующих исследований и наработок в области создания технологических машин адаптивного действия. Резюмируя накопленный потенциал, можно выделить технологические ниши, в которых использование аппаратов адаптивного действия позволит достичь высоких технико-экономических показателей:

- первичное дробление влажных сырьевых материалов, сортировка, камнеудаление и т. д.;
- измельчение ударным способом с получением тонких порошков, селективное дробление, диспергирование, механоактивация, смесеприготовление;
- тонкий и сверхтонкий помол различными способами широкой гаммы продуктов;
- разделение материалов по крупности, в том числе грубое и тонкое грохочение;
- приготовление смесевых композиций для продуктов с любым дисперсным составом;
- механоактивация компонентов строительных материалов, их смесей и других продуктов;
- уплотнение бетонных смесей с форсированной механической обработкой;
- механотермическая обработка материалов путем совместного измельчения и сушки;

– набор аппаратов для пробоподготовки;  
– специальное оборудование на основе адаптивных методов воздействия на перерабатываемую среду.

Отдельные виды аппаратов адаптивного действия положены в основу разработки принципиально новых технологических комплексов.

**Заключение.** Представленные в статье варианты технологического выполнения аппаратов для реализации различных видов дезинтеграторных технологий основаны на адаптивных механизмах воздействия на обрабатываемые материалы. Выбор классифицирующих признаков разделения аппаратов адаптивного действия на отдельные группы базируется на принципиально новой их совокупности, что способствует более качественному анализу рассматриваемого оборудования и выбору максимально эффективных конструкций для практического использования. Описанные методы и средства адаптивных механизмов переработки дисперсных материалов могут быть полезны научно-техническим работникам в качестве справочно-информационной базы.

#### Список цитированных источников

1. Порошки: получение, свойства, анализ : монография / С. А. Бабенко [и др.] ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исследоват. Томск. политех. ун-т. — Томск : Изд-во Томск. политех. ун-та, 2011. — 264 с.
2. Селективное разрушение минералов / В. И. Ревнивцев [и др.] ; под. ред. В. И. Ревнивцева. — М. : Недра, 1988. — 286 с.
3. *Витязь, П. А.* Высокие технологии и наноматериалы в строительной индустрии / П. А. Витязь, В. Г. Горбцов // Строит. наука. — 2009. — № 6. — С. 4—16.
4. *Вайтехович, П. Е.* Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил / П. Е. Вайтехович. — Минск : БГТУ, 2008. — 220 с.
5. *Сиваченко, Л. А.* Технический уровень аппаратов для тонкого и сверхтонкого помола материалов и пути их развития / Л. А. Сиваченко, Е. В. Заровчатская, И. М. Дыдышко // Гор. механика и машиностроение. — 2022. — № 2. — С. 57—71.
6. Технологические аппараты адаптивного действия / Л. А. Сиваченко [и др.]. — Минск : Издат. центр БГУ, 2008. — 375 с.
7. Интенсификация технологических процессов в аппаратах адаптивного действия : коллектив. монография / Л. А. Сиваченко [и др.] ; под науч. ред. Л. А. Сиваченко ; М-во образования Респ. Беларусь, Баранович. гос. ун-т. — Барановичи : БарГУ, 2020. — 359 с.
8. *Патури, Ф.* Растения — гениальные инженеры природы / Ф. Патури ; пер. с нем. Ю. И. Куколева. — М. : Прогресс, 1982. — 271 с.
9. Развитие техники и технологии сверхтонкого помола материалов / Л. А. Сиваченко [и др.] // Инженер-механик. — 2018. — № 4. — С. 6—11.
10. Проблемы, задачи и пути развития пружинных технологических аппаратов / Л. А. Сиваченко [и др.] // Вестн. Баранович. гос. ун-та. Сер. «Технические науки». — 2021. — № 2. — С. 67—77.
11. *Сиваченко, Л. А.* Энерготехнологические проблемы дезинтеграторных технологий в промышленности строительных материалов и пути их решения / Л. А. Сиваченко, Л. Л. Сиваченко, Н. В. Курочкин // Энергоэффективность. — 2014. — № 12. — С. 22—25.
12. *Сотник, Л. Л.* Интенсификация процесса дезинтеграции в вибровалковом измельчителе : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Л. Л. Сотник. — Минск, 2022. — 172 л.

Поступила в редакцию 06.02.2023.