

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования «Барановичский государственный университет»

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
В АППАРАТАХ АДАПТИВНОГО ДЕЙСТВИЯ**

Коллективная монография

Под научной редакцией Л. А. Сиваченко

Барановичи  
БарГУ  
2020

**Интенсификация технологических процессов в аппаратах адаптивного действия** : коллектив. моногр. / 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.

ISBN 978-985-498-924-2.

В монографии рассмотрены основные направления интенсификации технологических процессов в аппаратах адаптивного действия, описаны результаты теоретических и экспериментальных исследований, показана эффективность их практического использования в различных отраслях промышленности и дана оценка перспектив и направлений дальнейшего развития.

Адресуется научно-техническим работникам, специалистам различных отраслей промышленности, аспирантам, магистрантам и студентам технических специальностей университетов.

Рекомендовано к печати  
редакционно-издательским советом учреждения образования  
«Барановичский государственный университет»

Авторский коллектив:

*Л. А. Сиваченко*

*Л. Л. Сотник* (разделы 1.1—1.6, 2.4, 4.1—4.6, 8.2, 8.3, 9.1—9.3);

*Т. Л. Сиваченко* (разделы 1.2—1.7, 2.2, 2.3, 5.1, 5.2, 7.1—7.6, 8.1, 8.5, 9.1—9.3);

*В. А. Потапов* (разделы 3.1—3.5, 9.1—9.3);

*Г. М. Абукаликowa* (разделы 2.1, 6.3);

*И. М. Корзун* (разделы 6.2, 8.1);

*О. И. Наливо* (разделы 7.3—7.6, 8.4, 9.1—9.3);

*И. М. Дыдышко* (разделы 5.3—5.7, 6.1, 8.1, 9.1—9.3)

Под научной редакцией Л. А. Сиваченко

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механического оборудования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова» *В. С. Богданов*;

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машин и аппаратов пищевых производств учреждения образования «Могилевский государственный университет продовольствия» *А. В. Иванов*;

доктор технических наук, заведующий кафедрой транспортные систем и технологий Белорусского национального технического университета *С. А. Рынкевич*

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	6
<b>1 Анализ рабочих процессов технологических машин и направления повышения их эффективности .....</b>	<b>9</b>
1.1 Физические и физико-химические основы разрушения твердых тел ...	9
1.2 Способы разрушения твердых тел и диспергирования полифракционных зернистых материалов .....	17
1.3 Энергетическая эффективность процессов дезинтеграции материалов ...	23
1.4 Кинетические закономерности процессов измельчения .....	26
1.5 Механические методы активации химических процессов .....	32
1.6 Оценка основных направлений повышения эффективности дезинтеграторных технологий .....	37
1.7 Технологические задачи в области изменения материалов и пути их решения .....	45
<b>2 Адаптивные методы комплексной переработки сырья и материалов и их развитие .....</b>	<b>51</b>
2.1 Адаптивные методы в природе и технике и вопросы их практической реализации .....	51
2.2 Методологическая база создания новых видов технологических аппаратов адаптивного действия .....	54
2.3 Концептуальные положения выбора направлений развития технологических машин .....	60
2.4 Основы формирования технической базы проектирования технологических аппаратов адаптивного действия .....	63
<b>3 Цепные агрегаты для первичных стадий переработки сырьевых и неоднородных по составу и свойствам материалов .....</b>	<b>69</b>
3.1 Разработка конструкций цепных агрегатов и их анализ .....	69
3.2 Экспериментальные исследования процесса переработки материала ..	81
3.3 Выбор и определение основных параметров цепного агрегата с волновой рабочей камерой .....	85
3.4 Методика определения производительности цепного агрегата .....	89
3.5 Оценка области практического использования цепных агрегатов и основные направления развития .....	90
<b>4 Вибровалковый агрегат для измельчения и механоактиваций минеральных продуктов .....</b>	<b>94</b>
4.1 Анализ конструкции и рабочий процесс вибровалкового измельчителя ..	94
4.2 Методика расчета силовых характеристик .....	104
4.3 Методика расчета мощности привода .....	115
4.4 Методика расчета производительности .....	119
4.5 Экспериментальные исследования процесса измельчения .....	123
4.6 Выбор оптимальных режимов работы вибровалкового измельчителя .....	141

<b>5 Пружинные мельницы, смесители и механоактиваторы . . . . .</b>	<b>144</b>
5.1 Конструктивные особенности и принцип действия агрегатов с пружинными рабочими органами . . . . .	144
5.2 Способы организации процессов измельчения материалов в пружинных мельницах и варианты их интенсификации . . . . .	148
5.3 Теоретические исследования рабочего процесса агрегатов с пружинными рабочими органами . . . . .	153
5.4 Экспериментальные исследования помольных агрегатов с пружинными рабочими органами . . . . .	169
5.5 Пружинные агрегаты для приготовления высококачественных смесей и механоактивации композиционных материалов . . . . .	180
5.6 Использование пружинных аппаратов для тонкого и сверхтонкого помола материалов . . . . .	188
5.7 Оценка потенциальных возможностей и прогнозирование путей развития пружинных технологических аппаратов . . . . .	194
<b>6 Вибрационные пружинные аппараты в технологических процессах переработки различных материалов . . . . .</b>	<b>198</b>
6.1 Результаты технологической обработки различных материалов в вибрационных пружинных мельницах . . . . .	198
6.2 Вибрационные пружинные грохоты и их технологическая эффективность . . . . .	213
6.3 Виброуплотнители бетонных смесей с пружинным излучателем колебаний . . . . .	221
<b>7 Иголфрезерные аппараты многоцелевого назначения . . . . .</b>	<b>238</b>
7.1 Обоснование метода иголфрезерной дезинтеграторной переработки материалов . . . . .	238
7.2 Разработка технологических аппаратов с иголфрезерными рабочими органами . . . . .	241
7.3 Исследование деформаций и напряжений стержня, который движется в поле центростремительных сил . . . . .	251
7.4 Методика определения силы динамического взаимодействия пруткового стержня с материальной точкой . . . . .	256
7.5 Расчет основных параметров измельчителей с иголфрезерными рабочими органами . . . . .	261
7.6 Экспериментальные исследования измельчителей с иголфрезерными рабочими органами . . . . .	265
7.7 Создание иголфрезерных рабочих органов для технологических аппаратов промышленного назначения . . . . .	270
<b>8 Другие конструкции технологических аппаратов адаптивного действия . . . . .</b>	<b>274</b>
8.1 Аппараты на основе пружинных рабочих органов . . . . .	274
8.2 Дробилки ударного действия с управляемым движением обрабатываемых материалов . . . . .	286
8.3 Технологические аппараты ударно-вибрационного действия . . . . .	293

8.4 Агрегат для утилизации автомобильных шин по методу микрофрезерования . . . . .	295
8.5 Технологические агрегаты на основе прямого использования энергии ветра в качестве движущей силы . . . . .	297
<b>9 Технологические комплексы на основе аппаратов адаптивного действия, эффективность их использования и перспективы развития . . .</b>	<b>302</b>
9.1 Промышленное оборудование и комплексы на основе аппаратов адаптивного действия . . . . .	302
9.2 Новые технологические процессы с использованием аппаратов адаптивного действия . . . . .	320
9.3 Развитие технологического оборудования на основе адаптивных методов проведения рабочих процессов . . . . .	331
Заключение . . . . .	339
Список использованных источников . . . . .	342

Репозиторий БарГУ

## ВВЕДЕНИЕ

Устойчивое развитие промышленности невозможно без инновационного обновления технологической сферы и создания высокоэффективных технологий, машин и оборудования. В современных условиях наибольшую практическую значимость имеют те орудия труда, которые непосредственно связаны с комплексной переработкой сырья и материалов, предназначенной для получения продуктов, необходимых для удовлетворения жизненных потребностей человека. Особую группу машин здесь составляют рабочие или технологические машины, обеспечивающие переработку материалов в целях придания им нужных свойств или характеристик [150; 211].

Если системно рассматривать трудовую деятельность человека в сфере материального производства, то он, осуществляя многие процессы, выполняет главным образом три основополагающие функции:

- диспергирование (дробление, помол, расщепление, дезинтегрирование, резание, растворение, выветривание и т. д.);
- гомогенизация (смешивание, усреднение, диффузия, растворение и т. д.);
- компактирование (формование, уплотнение, агломерация, прессование, спекание, гранулирование и т. д.).

Из всех перечисленных сфер деятельности важнейшей является первая, связанная с измельчением материалов, что необходимо для обеспечения их подготовки к использованию в различных производственных условиях, в том числе при производстве строительных материалов, получении продуктов питания, выпуске металла, переработке отходов и многих других. Доля затрат на измельчение в технике огромна и продолжает увеличиваться. Например, среднестатистическое измельчение различных материалов в странах СНГ составляет по меньшей мере 14...15 тонн в год, на эти цели расходуется до 10 % всей вырабатываемой электроэнергии при КПД этих процессов, как правило, ниже 1...2 % [150; 211]. Если к этому добавить высокую стоимость оборудования, огромные эксплуатационные издержки и его низкую технологическую эффективность при переработке многих видов сырья и материалов, то проблема повышения эффективности дезинтеграторных технологий приобретает актуальность на уровне национальной безопасности.

Сложившиеся в этой сфере производства негативные тенденции усугубляются необычайно широким многообразием участвующих в переработке веществ, отличающихся своими свойствами, условиями обработки, степенью влияния на качество готового продукта и т. д. Характер обработки материалов определяет общую технологию проведения процессов и конструктивное исполнение оборудования. В итоге получается сложнейшая система, целостное описание которой аналитическими методами на современном этапе, к сожалению, невозможно [82; 240; 241].

Следствием перечисленных факторов является несовершенство большинства дезинтеграторных технологий, что выражается, прежде всего, в их высокой энергоёмкости и огромных эксплуатационных затратах. В сложившейся ситуации разобраться особенно сложно, так как отсутствует чёткая иерархия между оборудованием и технологией, хотя по определению, основанному на

принципах материаловедения, для большинства переделов конструкции и принцип действия машин и аппаратов должны определяться технологическими условиями [36; 262].

В мире уже накоплен огромный массив знаний в области определенных элементов технологий, условий и механизмов воздействия на перерабатываемую среду, но их системное представление, а тем более взаимосвязанное, отсутствует. Особенно тяжелое положение складывается с оборудованием, используемым в крупнотоннажных производствах, а также связанным с переработкой анизотропных и неоднородных по составу и свойствам материалов. Такое оборудование сложно моделировать, а тем более проводить апробацию новых технологических решений, что в итоге является главным сдерживающим фактором их развития [42; 138].

Множественность физико-механических и технологических свойств дисперсных материалов, подвергаемых различным видам обработки, требует создания таких видов воздействия на искомое сырье, которое обеспечили бы максимально необходимую степень переработки и максимальную эффективность при удовлетворении энергетических и эксплуатационных требований к механическому оборудованию. Все существующие методы воздействия на перерабатываемые материалы можно условно разделить на четыре основные группы [92; 174]:

- переработка сырья жестко выполненными рабочими органами;
- адаптивное, т. е. приспособляющиеся к свойствам перерабатываемой среды рабочими органами;
- физические методы воздействия, например, электромагнитные, ультразвуковые, лазерные и т. д.;
- химические методы, основанные на механизмах химической кинетики.

Круг научных интересов авторов касается второй группы оборудования. Его техническую основу составляют адаптивные методы и подходы, определяющие разработку таких механизмов воздействия на обрабатываемую среду, которые бы позволили с максимальной эффективностью и минимальных издержках производить требуемый вид переработки. Предлагаемая концепция затрагивает новые виды технологических агрегатов, рабочее оборудование которых имеет возможность путем дополнительных кинематических, деформационных или логистических решений создавать новые более совершенные механизмы переработки материалов, способные существенно повышать эффективность технологических процессов.

Высшей формой адаптации является саморегуляция — автоматическое поддержание определенного состояния механической системы. В природе и в технике наблюдается самосборка, проявляющем в упорядоченном объединении групп механизмов, приводящие к образованию новых важных структур.

Выделим, на наш взгляд, наиболее важные направления адаптации в технике:

- изменение линейных размеров звеньев в соответствии с внешними воздействиями;
- изменение объема или формы отдельной детали или механизма;
- изменение массы изделия в процессе движения;

- изменение поверхности, придание ей определенных защитных или технологических свойств;
- изменение реакционных свойств материалов;
- изменение структуры (рекомбинация или перегруппировка).

При совершении рабочим органом полезной работы адаптация может проявляться в виде:

- выбора траектории движения, например, по пути наименьшего сопротивления;
- выбора положения в пространстве;
- выбора или подстройки под скорость движения;
- резонансной подстройки частоты колебаний или демпфирования частоты внешнего возбудителя колебаний;
- выбор рабочего усилия или силы сопротивления внешнему воздействию;
- подстройки по температуре, внешнему давлению, концентрации солей, кислотности среды, влажности, освещенности.

Чем большим диапазоном саморегуляции будет обладать рабочий орган или механизм, тем большей работоспособностью он будет обладать при меньших затратах энергии.

На основе сформулированных положений разработан новый класс оборудования — пружинные мельницы, диспергаторы, смесители, грохоты, классификаторы и уплотнители, вибровалковые измельчители, цепные многоцелевые агрегаты, иглофрезерные аппараты и др. Во многих представленных конструкциях основные функции выполняют цилиндрические пружины, которые в зависимости от геометрического исполнения, а также кинематических, динамических и силовых параметров воздействия на обрабатываемую среду обеспечивают эффективное измельчение, смешивание, механоактивацию, транспортирование, разделение, уплотнение и другие виды рабочих процессов.

В представленных материалах последовательно отражены: вопросы обоснования целесообразности создания гаммы новых технологических аппаратов, морфологические основы разработки их базовых конструкций, теоретический анализ рабочих процессов, результаты экспериментальных исследований и промышленного использования, дана оценка основных направлений и путей их развития, которая дополнена исследованиями их потенциальных возможностей при переработке целого ряда природных и техногенных материалов. Основной задачей настоящего издания является информационное обеспечение и активизация научных и практических работ в технологической сфере и расширение аппаратной базы для комплексной переработки дисперсных материалов и сред.

# **1 АНАЛИЗ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН И НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

В технологиях производства подавляющего большинства современных материалов необходимо синтезировать конгломераты на основе самых разнообразных компонентов, которые требуют как отдельной, так и коллективной их обработки. Для этих целей широко применяются технологические машины: дробилки, мельницы, смесители, механоактиваторы, грохоты, классификаторы, уплотнители, сушилки, печи, грануляторы и т. д.

С учетом специфики представленных в монографии материалов, касающихся вопросов создания технологических аппаратов различного назначения, представляется целесообразным рассмотреть базовые теоретические и технологические положения рабочих процессов, которые функционально эффективно могут быть реализованы в них. В качестве основного объекта для анализа нами выбраны дизинтеграторные технологии, которые определяют целый ряд самых разнообразных процессов и могут быть использованы на всех этапах создания аппаратов.

## **1.1 Физические и физико-химические основы разрушения твердых тел**

*Основные положения и теоретические подходы аналитического описания процессов измельчения твердых тел.* На сегодня среди всего многообразия известных различных способов переработки минеральных материалов в дисперсное состояние наиболее распространенным и простым остается механическое измельчение.

Анализом построения моделей и изучением условий разрушения хрупких материалов ученые занимаются, начиная с XVI...XVII веков [222]. Однако все многообразие предлагаемых ими теорий описывает реальный процесс недостаточно точно [55; 151].

Основные подходы для изучения физической природы деформации и разрушения рассмотрены в трудах [45; 49; 61; 222; 258].

В них даётся представление о процессе деформации и разрушения твердых тел.

Описанная способность деформирования и прочности кристаллов зависит от большого числа факторов, в том числе от различия их размеров, структурной неоднородности материала, наличия внутренних дефектов и т. д. Ключевые условия пластической деформации и разрушения поликристаллов определяются механическими схемами их деформации, представляющими сочетание схем главных напряжений и главных деформаций. Однако необходимо учесть, что в различных местах деформируемого тела могут быть различные схемы главных напряжений и деформаций. Указанное обстоятельство способствует разрушению деформируемого материала по границам зерен. Еще одним немаловажным фактором является окружающая среда, которая может способствовать развитию поверхностных дефектов, что известно как эффект Ребиндера [84].

Существуют три «основных» закона измельчения — П. Р. Риттингера, Ф. Кика и Ф. С. Бонда, а также большое множество частных законов [2; 11; 41; 72; 151; 222]. Все законы опираются на экспериментальные исследования, однако полученные на их основе аналитические выражения, определяющие удельные энергозатраты в зависимости от степени измельчения частиц или от величины образованной поверхности, очень сильно различаются и дают несопоставимые результаты. Вышеуказанное основание ограничивает их применение, так как оценивается лишь качество процессов измельчения.

Рассмотрим эти теории как основополагающие при изучении физической природы пластической деформации и разрушения материалов.

Согласно теории, представленной П. Р. Риттингером в 1867 году, уравнение для определения энергозатрат на дробление материалов зависит от полученной удельной поверхности. Он установил, что затрачиваемая на измельчение работа  $A_p$  пропорциональна величине вновь образованной поверхности  $\Delta S$  в измельчаемом материале или квадрату его диаметра  $\Delta D^2$  и, как следствие, в эквивалентных количествах переходит в свободную поверхностную энергию [17; 21; 55; 222]:

$$A_p = K_p \Delta S \text{ или } A_p = K_p \Delta D^2, \quad (1.1)$$

где  $K_p$  — коэффициент пропорциональности.

Данная теория впоследствии получила название первого закона дробления (законом поверхности Риттенгера).

Линейная зависимость величины образованной поверхности от энергетических затрат для процесса, обладающего нелинейными характеристиками, объясняется тем, что она является огибающей семейство характеристик, описывающих различные стадии процесса. Поскольку в данном случае не учитывается энергия деформации тела без разрушения и не принимаются во внимание упругие предельные объёмные напряжения, выражение (1.1) можно считать справедливым при таких способах измельчения, при которых объём обрабатываемого материала не влияет на количество затрачиваемой энергии [53].

В. А. Кирпичевым (1874), Ф. Киком (1885) были предложены теории, согласно которым элементарная работа процесса измельчения затрачивается на упруго-пластическую деформацию, которую необходимо произвести, чтобы разрушить тело. Данные теории показывают, что расход энергии на измельчение  $A_k$  данного материала прямо пропорционален его объёму  $\Delta V$  или кубу его диаметра  $\Delta D^3$  [21; 41; 72]:

$$A_k = K_{\Pi} \Delta V \text{ или } A_k = K_{\Pi} \Delta D^3, \quad (1.2)$$

где  $K_{\Pi}$  — коэффициент пропорциональности.

Данную теорию — выражение (1.2) — принято считать законом объёмов (вторым законом дробления).

П. А. Ребиндер (1940) объединил описанные Кирпичевым-Киком и Риттенгером теории в одну [120]:

$$A_{\text{реб}} = K_p \Delta S + K_{\Pi} \Delta V. \quad (1.3)$$

Однако ключевым недостатком полученной теории является достаточная сложность определения коэффициентов пропорциональности  $K_p$  и  $K_{\Pi}$  выражения (1.3).

Теория элементарной работы Ф. Бонда является промежуточной между теорией Риттенгера и Кика [41]:

$$A_B = 10W \left( \frac{1}{d^{0,5}} - \frac{1}{D^{0,5}} \right), \quad (1.4)$$

где  $W$  — показатель работы;

$d$  — диаметр полученного куска материала после измельчения;

$D$  — диаметр исходного куска материала.

Данная теория считается третьим законом дробления.

В своих теоретических разработках Ф. Бонд делал акцент на положения теории А. Гриффитса (1920), согласно которым разрушение поликристаллов осуществляется в направлении образовавшихся трещин, появляющихся в зоне дефектов и высоких напряжений [7; 21]. В свою очередь, она, как и теория П. А. Ребиндера, рассматривается в качестве промежуточной между законами Риттингера и Кика. В ней предполагается, что энергия, передаваемая телу при сжатии, распределяется сначала по его массе, следовательно, пропорциональна  $D^3$ , но с момента начала образования на поверхности трещины эта энергия концентрируется на поверхности у краёв трещины и становится пропорциональной  $D^2$ . На этом основании работа разрушения тела принимается пропорциональной  $D^{2,5}$  ( $D$  — приведенный диаметр частицы).

Согласно экспериментальным данным [17], при тонком и сверхтонком измельчении результаты более точно описываются законом Риттингера, при дроблении и грубом измельчении — законом Кика, а для зоны дисперсностей, находящихся между указанными областями — законом Бонда.

Еще один подход к описанию энергии процесса разрушения был представлен А. К. Рундквистом (1954). Согласно его теории разрушения материалов, в соответствии с которым работа, затрачиваемая на измельчение, пропорциональна показателю степени размера куска измельчаемого материала. Данная теория объединила все теории [136]:

$$A_{\text{Рунд}} = K (\Delta D^{4-n}), \quad (1.5)$$

где  $K$  — коэффициент пропорциональности;

$4 - n$  — показатель степени, который определяется эмпирическим путем.

Приняв  $n = 2$  и подставив в равенство (1.5), получим уравнение Риттенгера (1.1), при  $n = 1$  — Кирпичева—Кика (1.2), при  $n = 1,5$  получим закономерность Бонда (1.4).

Однако в реальных условиях ни один из известных законов измельчения не применяется, так как на процессы измельчения и дробления оказывают влияние многие факторы:

- понятия «грубое», «среднее» и «тонкое» измельчение являются условными;

- исходный материал представляет собой совокупность частиц различного размера, находящихся во взаимном контакте и измельчающихся по своим различным законам;

- создаваемое напряженно-деформированное состояние измельчаемого материала, определяющее процесс его измельчения, зависит от конструкции устройства и размеров измельчителя, а также его оптимального режима работы.

Все вышеописанные законы измельчения не учитывают ни конструкции измельчителя, ни степени оптимизации его работы, ни характера, величины и направления силового воздействия, ни количественных результатов разрушения.

В условиях промышленности удельные энергозатраты определяются обычно путём натурных испытаний оборудования. При этом вопросы минимальной энергоемкости процесса, конструктивно-технологического соответствия оборудования требованиям, рациональных режимов, соответствия полученных результатов оптимуму решаются в каждом конкретном случае экспериментально.

Современные представления о теории разрушения хрупких материалов проведены рядом ученых: Д. Броек, Е. Г. Барановым, Л. И. Барон, Ю. И. Протасовым, Р. А. Родиным, Ю. Н. Работновым, С. Г. Ходоковым, Г. П. Черепановым и др. [29; 45; 83; 118; 126; 128—130; 132; 255; 258; 259].

Теоретические исследования, представленные в работах [255; 258] направлены на описание механизма разрушения твердых тел.

Согласно Л. И. Барону [30], при разрушении говорится о работе, которую необходимо совершить для достижения разрушения, поэтому в качестве объединенной характеристики разрушения материала при основных видах нагружения вводится понятие «полная удельная работа разрушения».

На основании трех характерных параметров (предел прочности на разрыв  $\sigma_p$ , МПа, предел прочности на сжатие  $\sigma_{сж}$ , МПа, предел прочности на сдвиг  $\tau_{сд}$ , МПа) находится полная удельная работа разрушения  $A_{Бар}$ , МДж / м<sup>3</sup>:

$$A_{Бар} = \frac{\sigma_p^2}{2E} + \frac{\sigma_{сж}^2}{2E} + \frac{\tau_{сд}^2}{2G},$$

где  $E$  — модуль продольной упругости, или модуль Юнга, МПа;  
 $G$  — модуль сдвига, МПа.

Тогда удельная работа от эквивалентного нормального напряжения

$$A_{Бар} = \frac{\sigma_{эКВ}^2}{2E} = \frac{\sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_{сж}^2 + 2(1 + \mu_p)\tau_{сд}^2}}{2E}, \quad (1.6)$$

где  $\mu_p$  — коэффициент Пуассона.

Выражение (1.6) показывает, что работа, затрачиваемая на разрушение твёрдого тела, пропорциональна квадрату эквивалентного напряжения, которое включает в себя пределы прочности на разрыв  $\sigma_p$ , на сжатие  $\sigma_{сж}$  и на сдвиг  $\tau_{сд}$ .

Так, Р. А. Родин [132] предположил, что процесс разрушения сжатием хрупких материалов проходит в три этапа: 1) появление трещин; 2) развитие трещины до критических размеров; 3) реализация накопленной в материале энергии до его разрушения.

В то же время согласно [128—132; 258] установлено, что энергия, затрачиваемая на процесс разрушения, распределяется следующим образом. На первой стадии наблюдается уплотнение слоя материалов (10 %), на второй стадии происходит образование зон всестороннего сжатия и появление трещин (70 %), на третьей стадии — развитие эффективной трещины, ее рост до критических размеров и разрушения (20 %).

Наличие второй стадии с расходом энергии порядка 70 % от общего объема свидетельствует о недостаточно реализованных процессах, наблюдаемых в материале, а также о потенциалах развития. Это говорит о необходимости создания наиболее благоприятных условий разрушения материалов, а также о значи-

мости механизма образования трещин и их развития до критических размеров.

Исследование Р. А. Родина [30; 130; 131] говорит о том, что работа, затрачиваемая на дробление хрупкого тела правильной формы с изотропными свойствами, равна:

$$A_{\text{Род}} = \frac{3}{8} \cdot \frac{\sigma_p^2}{K_\phi^2 K_p^2 \sigma_{\text{сж}} \text{tg}^2 \varphi R_D^{0,25-0,01R_D}}, \quad (1.7)$$

где  $K_\phi$  — коэффициент формы в зоне контакта ( $K_\phi = 0,32 \dots 0,5$ );  
 $K_p$  — коэффициент пропорциональности;  
 $\text{tg} \varphi = f_i$  — коэффициент внутреннего трения;  
 $R_D$  — радиус разрушаемого куска материала.

Из выражения (1.7) следует, что работа, затрачиваемая на разрушение твёрдого тела, пропорциональна квадрату прочности его на разрыв  $\sigma_p$  и обратно пропорциональна предельному напряжению на сжатие  $\sigma_{\text{сж}}$ . Предел прочности при растяжении составляет всего 2...5 %, при сдвиге — 10...15 % предела прочности при сжатии. Добиться в реальных условиях разрушения в менее энергоёмких направлениях на современном оборудовании вряд ли возможно.

Данная методика, как и другие представленные, не учитывает способ измельчения, величину и направление приложения усилия, которые зависят от технологии измельчения, оборудования и формы рабочих органов.

Таким образом, анализ исследований механизма разрушения твёрдых материалов показал, что теория измельчения включает в себя широкий спектр вопросов и проблем, для решения которых проводились и ведутся интенсивные исследования процессов измельчения и свойств материалов. Разнообразие решаемых задач обуславливают разные подходы и базовые концепции их решения. Это подтверждает сложность, многофакторность процесса разрушения, связанного с существенным изменением физико-химических свойств материалов и вызывающего различные физические явления.

Анализ результатов теоретических исследований в области хрупкого разрушения материалов позволяет сделать выводы

о необходимости дальнейшего проведения аналитических исследований, направленных на получение уравнений, описывающих процессы разрушения материалов.

*Физико-химические основы разрушения твердых тел.* К числу физико-химических методов интенсификации процессов измельчения относятся: адсорбционное понижение прочности, коррозия под давлением, упрочнение при пластическом течении под давлением и ряд других, а также температура и среда обработки [150; 257; 258].

*Адсорбционное понижение прочности.* Этот эффект впервые был обнаружен П. А. Ребиндером в 1928 году. Суть его состоит в том, что кристалл, поверхность которого покрыта поверхностно-активным веществом (далее — ПАВ), проявляет механические свойства, существенно отличающиеся от свойств «чистого» кристалла.

Отмечается существование трех весьма различных эффектов влияния среды [257]. В зависимости от конкретных условий действие среды проявляется либо в пластифицировании, либо в увеличении хрупкости, либо придает твердым телам способность к самопроизвольному диспергированию. Определяющим фактором принадлежности к одному из этих случаев является величина снижения поверхностной энергии твердого тела.

Рассмотрим механизм действия ПАВ. Пусть в двухфазную систему «твердое тело — жидкость (газ)» введено некоторое вещество, растворимое в жидкости (газе). В этом случае растворенное вещество непременно устремится к поверхности раздела фаз, если тем самым будет понижена поверхностная энергия. Этот эффект — прямое следствие второго закона термодинамики.

Поскольку дефекты структуры обладают избыточной свободной энергией, то на них происходит интенсивное взаимодействие молекул жидкости и твердого тела. По дефектам структуры осуществляется также поступление адсорбированных атомов с поверхности твердого тела к месту зарождения объемной трещины. Адсорбционные эффекты проявляются тем сильнее, чем выше дефектность структуры, а на дефектных кристаллах они отсутствуют.

Результаты действия ПАВ на процессы диспергирования твердых тел показывают, что наиболее эффективным оказыва-

ется применение ПАВ при обработке самых твердых и хрупких материалов. С уменьшением твердости материала влияние сред на их измельчение резко падает.

Применение ПАВ в качестве активатора помола позволяет в ряде случаев многократно повысить интенсивность обработки [257; 258].

*Коррозия под напряжением.* Снижение прочности зависит от времени напряжения, температуры и внешних условий. Агрессивной внешней средой чаще всего является вода, которая вступает в химическую реакцию с поверхностным слоем материала.

*Упрочнение при пластическом течении под давлением.* Этому направлению в последнее время уделяется все большее внимание. Интерес представляет факт приобретения веществами неожиданных свойств за счет процессов, познание которых обещает большие технологические успехи [150].

Влиянию физико-химических методов на интенсификацию обработки дисперсных материалов посвящено много работ [77; 121; 253; 257; 258]. Ряд мероприятий (использование ПАВ, тиксотропное разжижение, охрупчивание материалов типа полиэтиленов жидким азотом и др.) нами использовался при проведении экспериментальных исследований.

В заключение следует отметить, что современные технологии тонкого и сверхтонкого размолва порошков и получение ряда композиций с учетом жидкой фазы невозможны без использования методов физико-химической интенсификации этих процессов.

## **1.2 Способы разрушения твердых тел и диспергирования полифракционных зернистых материалов**

Разработка новых типов аппаратов для тонкого измельчения материалов в различных отраслях промышленности полностью определяется исторически сложившимися традициями данной отрасли, интуицией и личным опытом разработчика. В результате этого долгое время не находят применение прогрессивные конструкции измельчителей, а также затрачиваются значительные усилия и средства на совершенствование бесперспективных

моделей. На наш взгляд, разработка новых технологий тонкого измельчения может идти по трем направлениям:

1) совершенствование существующих способов измельчения и аппаратов, их реализующих, в целях повышения их производительности, эксплуатационной надежности и экономичности;

2) разработка принципиально новых способов разрушения материалов и на их основе создание целой гаммы новых конструктивных решений измельчителей;

3) на базе изучения структуры разрушаемого материала необходимо обеспечить совершенствование способов предварительной его обработки в целях понижения его первичной прочности структуры и величины физико-химической связи, а также снижения энергетических затрат на процесс измельчения.

Каждый из этих способов далеко не исчерпал себя. Однако действительный прогресс по одному из этих направлений возможен лишь при наличии такой методологической основы, которая обеспечит одновременное восприятие накопленного человечеством знания в области тонкого измельчения. Основой такого восприятия может служить классификация. Известные классификации не дают полного представления о реально протекающих процессах, так как построены путем систематизации существующих конструкций аппаратов для измельчения по конструктивному, технологическому или иному элементарному признаку [19; 243]. Также ограничена и классификация аппаратов по свойствам и дисперсности измельчаемого материала [95].

В то же время большое многообразие аппаратов для измельчения требует более точного выбора машин для конкретной технологии, выбора направления совершенствования данной машины при измельчении отдельно взятого материала. Известна классификация не машин, а способов измельчения материалов. На основе этого было определено место каждой измельчающей машины в ряде подобных устройств [264—266].

Разрушение структуры материала (будь то первичная структура или структура более высоких порядков) связано с энергетическим взаимодействием источника энергии и разрушаемого материала. Перенос энергии возможен либо в виде импульса силы при непосредственном контакте, либо в виде кванта электромагнитного излучения. Данные случаи энергетического вза-

имодействия могут сопровождаться переносом массы, теплоты, эмиссией электронов и другими физико-химическими эффектами. Кроме того, они могут комбинироваться между собой, образуя то многообразие способов разрушения, известное на сегодня, причем, большинство элементарных процессов переноса субстанции (импульса, тепла, массы) хорошо изучено, и предлагаемая система классификации, основанная на феноменологических методах изучения процессов измельчения, более консервативна и не подвержена столь скорым изменениям, как классификация аппаратов по технологическим, конструктивным либо иным признакам.

В работах [264—266] проведен анализ природных и искусственных, т. е. созданных человеком, способов разрушения, который позволил выявить как огромное многообразие этих способов, так и их сходство. Искусственные, созданные рукой человека способы разрушения материалов во многом воспроизводят природные процессы и явления, усиливая природные эффекты и сокращая время их протекания.

По характеру создаваемого в разрушаемом объекте напряженного состояния все процессы можно разделить на процессы, вызывающие точечное (удар), линейное (тепловой пробой), плоское (излом) и объемное напряженное состояние (взрыв и др.).

По характеру и природе движущей силы процесса способы диспергирования могут разделяться на следующие классы:

- 1) гидродинамические, движущей силой которых является гидродинамическое давление струи жидкости или газа или перепад давления в объеме разрушаемого тела;
- 2) массовые — силовое воздействие формируют гравитационные, центробежные или инерционные силы;
- 3) механические — основой разрушения является механическое усилие статического, импульсного или циклического характера;
- 4) термические — разрушение вызывает разность объемного расширения неодинаково нагретых слоев материала;
- 5) массообменные — напряженное состояние в материале формируется за счет объемного сжатия либо объемного расширения при диффузии структурообразующей влаги под действием разности концентраций, температур или осмотического давления;

б) электромагнитные способы диспергирования, в которых побудителем разрушения являются электромагнитные поля различной частоты и амплитуды колебаний, вызывающие один из видов напряженного состояния.

Чисто магнитные методы диспергирования не применяются в практике как самостоятельный способ разрушения ввиду крайне большой длительности процесса, поэтому эти способы передачи энергии разрушаемому материалу лишь сопровождают или предшествуют какому-либо из вышеперечисленных способов силового воздействия, например, магнитная обработка суспензий волокнистых материалов перед механическим диспергированием;

7) химические способы диспергирования основаны либо на объемном расширении продуктов химической реакции, например, в случае взрыва, либо на потере энергии связи, химического сроста части материала с основным массивом, как в случае окисной эрозии. Как промежуточный этап разрушения — ослабление энергии химического взаимодействия структурообразующих частиц материала за счет выщелачивания, растворения или диффузии каких-либо составных частей из скелета материала;

8) микробиологические способы диспергирования основаны на химическом или ферментативном воздействии бактерий, плесени и растений на материал. Биологические объекты потребляют составные части подложки в пищу либо разлагают материал продуктами выделений в процессе жизнедеятельности, причем эти природные процессы все чаще используют в технологии обогащения руд, выделения редкоземельных металлов, очистке гальванических стоков и разложении отходов различных производств.

Как видно из вышеперечисленного, классификация является подробным перечислением уже известных методов воздействия на диспергируемый материал. Однако упорядочение данных способов по более мелким признакам и группам позволяет определить ячейки, не заполненные сегодняшним уровнем знаний, и предсказать новые пути интенсификации и новые способы диспергирования материалов путем комбинации уже известных. Рассмотрим более подробно методы разрушения, вызывающие плоское или линейное напряженное состояние, классификация которых представлена на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 — Классификация методов разрушения, вызывающих плоское или линейное напряженное состояние

Дальнейшее развитие способов разрушения данной классификационной группы возможно комбинаторикой указанных методов, например, струйное разрушение струей ионизированного газа или плазмы или механическое разрушение в поле электромагнитного излучения (СВЧ) и т. п.

Вторую большую группу способов разрушения составляют методы, вызывающие объемное напряженное состояние в разрушаемом материале, классификация которых представлена на рисунке 1.2.

Как видно из схемы, многие методы хорошо известны и давно применяются в промышленности, другие, как, например, электродиализ, известны, но для целей дробления и разрушения не применяются. Хотя хорошо известно, что при набухании коллоидных и капиллярно-пористых структур в результате осмоса влаги (растворителя) через полупроницаемую мембрану структурообразующих клеток развиваются колоссальные напряжения, еще в древности применяемые для дробления монолитных камней.



Рисунок 1.2 — Классификация методов разрушения, вызывающих объемное напряженное состояние

Но этот процесс медленный. При наложении электромагнитного поля явление осмоса можно значительно ускорить — это и есть диализ.

Огромное многообразие конструктивных решений машин одноименного назначения свидетельствует не только о творческом поиске их создателей, но и об отсутствии единого подхода к созданию и проектированию нового оборудования. На наш взгляд, такой подход может обеспечить простая и наглядная классификационная таблица, анализирующая механизм нагружения единой частицы разрушаемого материала.

До недавнего времени к способам механического разрушения относили лишь удар, истирание, раздавливание, раскалывание, распил и различные их видопроявления.

При анализе кинематики различных машин удобнее всего оперировать не понятием способа нагружения, например, «излом», а понятием механизма напряженного состояния — «изгиб». При этом появляется возможность абстрагирования от частных проявлений конкретного способа и на основе простых структурных схем моделирования синтезировать различные напряженные состояния.

Итак, оперируя понятиями сопротивления материалов, основными напряженными состояниями материала могут быть: сжатие (раздавливание), растяжение (разрыв), изгиб (излом), кручение (скручивание), сдвиг (срез), трение (истирание). При такой классификации вроде бы остаются за кадром такие способы разрушения, как удар и раскол, однако при силовом анализе этих способов легко выявить, что от раздавливания они отличаются: удар — замыкание силовой цепи осуществляется инерционными силами самого материала; раскол — вид сосредоточенного сжатия.

Введение понятий сопротивления материалов к анализу способов дробления и измельчения тем более благотворно, что силовой векторный анализ дает наглядное представление о сложных процессах. Вектор силы или момента легко поворачивать, изменять точку приложения, т. е. осуществлять синтез нового способа механического разрушения.

Формирование сложного напряженного состояния в конкретной мельнице или дробилке осуществляется как за счет подбора кинематики относительного движения измельчаемого материала и элементов дезинтеграционной поверхности, так и путем профилирования самой поверхности (придание определенной кривизны, изменение направления и формы рифления).

Разработанные методы механического измельчения позволяют шире оценить возможные пути интенсификации единичных актов разрушения в составе единого технологического комплекса [38; 266].

### **1.3 Энергетическая эффективность процессов дезинтеграции материалов**

Для создания энергетически эффективных измельчительных машин необходимо качественно и количественно оценить влияние всех потерь, происходящих в них.

Первые опыты по определению КПД измельчителей были проведены в 1924 году В. Кари и Э. Халтоном [150]. Они основывались на калориметрических методах измерений. Эти и последующие исследования позволили установить, что собственно затраты на дезинтеграцию не превышают погрешностей измерений.

Как отмечается в работе [54], при дезинтеграции менее 1 % энергии полезно расходуется на образование новой поверхности, 80...85 % — на внешнее трение между частицами материала и рабочей гарнитурой, 12...20 % — на избыточную деформацию и около 2 % — на разного рода излучения [150].

Рассматривая совокупность процессов при дезинтеграции Ребиндер [122] показал, что работа измельчения складывается из работы упругой деформации, работы пластической деформации, работы разделения на более мелкие части и работы на придание разделяющимся частям кинетической энергии:

$$A = A_{\text{упр}} + A_{\text{пл}} + A_{\text{пов}} + A_{\text{к}}. \quad (1.8)$$

Полезной в данном выражении с точки зрения теории процессов разрушения является работа образования новой поверхности  $A_{\text{пов}}$ . Работа, затраченная на пластическую деформацию, может быть больше работы образования поверхности в  $10...10^3$  раз и, согласно [122], расходоваться на образование в твердом теле различного рода дефектов. На основании выражения (1.8) коэффициент полезного действия можно выразить уравнением

$$\eta = \frac{A_{\text{пов}}}{A_{\text{упр}} + A_{\text{пл}} + A_{\text{пов}} + A_{\text{к}}}.$$

Коэффициент полезного действия измельчения различных неорганических материалов составляет 0,01...1 % [54; 122; 150].

С точки зрения химии дефектных кристаллов твердое тело, содержащее повышенное, по сравнению с равновесным, количество дефектов, имеет более высокую реакционную способность. Это означает, что КПД следует относить не к процессу измельчения, а к процессу активации в целом. Следовательно, КПД такого процесса следует выразить уравнением [35]

$$\eta = \frac{A_{\text{пов}} + A_{\text{пл}}}{A_{\text{упр}} + A_{\text{пл}} + A_{\text{пов}} + A_{\text{к}}}.$$

По оценке ряда авторов, эта величина может составлять 5...10 % [33].

По данным работы [35], КПД образования дефектов существенно превосходит КПД образования новой поверхности. Графически полученные результаты представлены на рисунке 1.3.

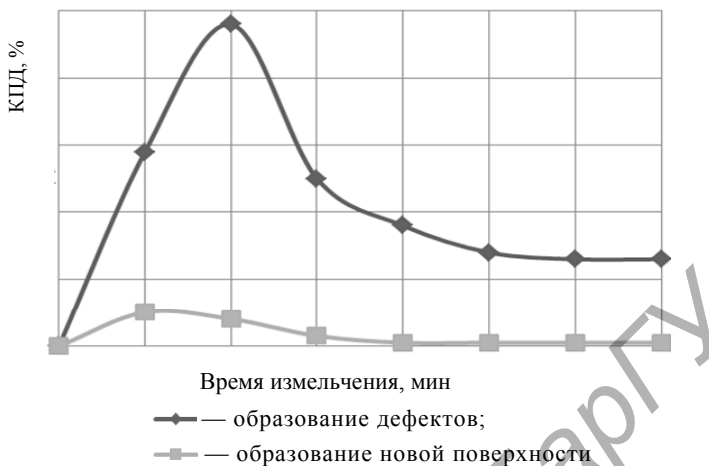


Рисунок 1.3 — Сопоставление КПД процессов

Необходимо отметить, что определение КПД измельчителей представляет определенные трудности, так как нет однозначного мнения о том, что принимать за «полезно затраченную работу». При анализе энергоемкости хрупкого разрушения твердых тел в физическом аспекте часто принимают, что полезно затрачена лишь та энергия, которая существует после разрушения в виде свободной энергии новой поверхности. На этом, например, основан закон Риттингера, в этом случае полный КПД процесса [254]  $\eta = \frac{E_{\text{оп}}}{E}$ , где  $E_{\text{оп}} = \gamma s$  — свободная энергия

вновь образованной поверхности, Дж;  $\gamma$  — удельная свободная энергия, Дж / м<sup>2</sup>;  $s$  — площадь образованной поверхности, м<sup>2</sup>;  $E$  — энергия, подводимая к измельчителю, Дж.

Важнейшим показателем процесса измельчения является энергонапряженность, которая в общем виде определяется из выражения [258]  $\mathcal{E}_H = \frac{N_{\text{пол}}}{V_k}$ , где  $N_{\text{пол}}$  — полезная мощность, затрачиваемая в измельчителе, кВт;  $V_k$  — объем помольной камеры, м<sup>3</sup>.

Приведенные здесь общие рассуждения необходимы для определения основных путей интенсификации работы дезинтеграторов. Основные закономерности, характеризующие процесс измельчения в целом, будут рассмотрены ниже.

## 1.4 Кинетические закономерности процессов измельчения

Основной особенностью измельчения, особенно на стадии помолы, является коллективное разрушение частиц, слагающих монослой.

При сжатии слоя частицы подвергаются объемному нагружению. Известно, что образцы кристаллических тел, подвергающиеся такому нагружению (например, сжатие с боковым давлением, сжатие образцов небольшой высоты), разрушаются на множество мелких частей [123]. При таком характере нагружения разрушение происходит преимущественно по дефектам структуры. Этим обеспечивается также определенная селективность процесса. Поэтому выявление изменения состояния слоя сыпучего материала при сжатии представляет практический интерес [123]. Диаграммы сжатия слоя ряда материалов представлены на рисунке 1.4 в координатах  $p$ — $\epsilon$ , где  $p$  — удельное (отнесенное к площади сжатия) давление на пуансоне,  $\epsilon$  — относительная деформация слоя.

Выявлено, что независимо от материала диаграммы имеют три явно выраженных участка: первый характеризуется прямолинейной зависимостью  $\epsilon$  от  $p$ ; второй имеет вид кривой, обращенной выпуклостью в сторону увеличения  $\epsilon$ ; третий — прямолинейной зависимости от  $p$ , но с большим углом наклона к оси  $\epsilon$ .

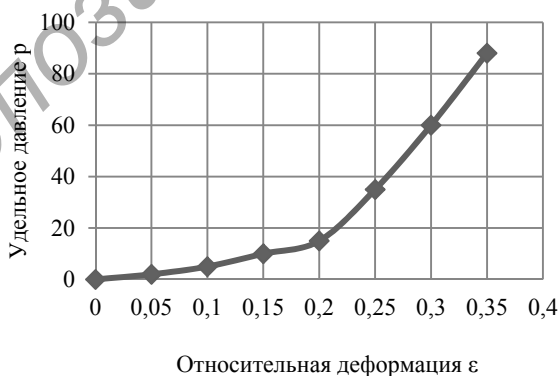


Рисунок 1.4 — Диаграмма  $p$ — $\epsilon$  при сжатии слоя кварцевого песка при пористости слоя 0,44

Среднее напряжение в сжимаемом слое [70; 123]

$$\sigma = D \frac{1-n}{n-\varepsilon} \varepsilon, \quad (1.9)$$

где  $D$  — модуль деформации;

$n$  — пористость слоя.

Для слоя сыпучего материала вследствие высокой концентрации напряжений в зонах контактов между зернами среднее напряжение существенно отличается от местных, приводя к деформации и разрушению отдельные куски.

Рассматриваемая модель деформации слоя материала будет отражать реальную картину до тех пор, пока не образуются столбики спрессованного мелкого материала. После образования столбиков происходит не только разрушение зерен, но и брикетирование материала. По этой причине формулу (1.9) следует использовать только для тех деформаций, величина которых не превосходит верхней границы второго участка диаграммы сжатия, т. е. находится в пределах  $0 < \varepsilon < \varepsilon_2$ .

По мере накопления мелкой фракции эффективность использования энергии снижается, так как растет количество контактов между частицами и при общей прежней нагрузке уменьшаются контактные силы, причем для значений ниже разрушающих нагрузок, при этом увеличиваются диссипация энергии и трение между частицами.

Из всего вышесказанного следует, что измельчать в «толстом» слое материал экономически нецелесообразно.

Попытки создания теорий измельчения делались уже более 100 лет назад, начиная с Риттингера, Кирпичева и Кика и продолжают до сих пор [27; 34; 55; 112]. В результате были предложены так называемые законы измельчения, под которыми понимается зависимость между затраченной на измельчение энергией и крупностью измельченного продукта [112], общее выражение которых может быть представлено в виде

$$dE = -k \frac{dx}{x^{f(x)}}, \quad (1.10)$$

где  $E$  — удельная энергия, сообщаемая единице объема разрушаемого тела, необходимая для прироста энергии вновь образованной поверхности, Дж;

$k$  — коэффициент пропорциональности;

$x$  — средний диаметр зерен, мм;

$f(x)$  — показатель степени, зависящий от крупности частиц.

Уравнение (1.10) может быть представлено в более простой форме:

$$dE = -k \frac{dx}{x^n}, \quad (1.11)$$

где  $n$  — коэффициент, зависящий от диапазона крупности и способа измельчения.

На рисунке 1.5 показана геометрическая интерпретация выражения (1.11). Эта зависимость есть обобщенная форма теоретических и эмпирических уравнений Риттингера, Кирпичева, Кика, Бонда, Стивенсона, Холмса и других авторов [9; 269].

Заканчивая рассмотрение описанных выше «законов» разрушения, отметим их общую черту: все они не связывают разрушение с каким-либо процессом, происходящим в материале, а также не учитывают неоднородности последнего.

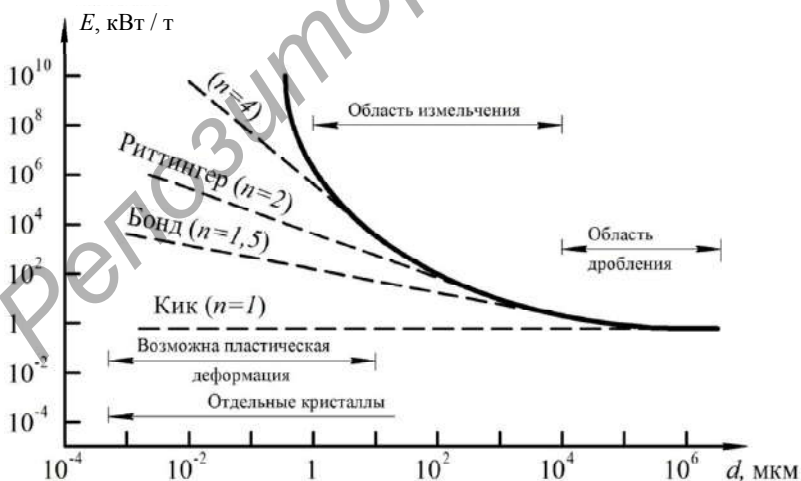


Рисунок 1.5 — Зависимость удельного расхода энергии  $E$  от крупности разрушаемых частиц

Поэтому, основываясь на них, невозможно детально рассмотреть явление процесса разрушения. Более того, стратегическая задача развития научных основ процессов дезинтеграции состоит в овладении знаниями об индивидуальных свойствах и взаимосвязях множества процессов, протекающих на разных масштабных уровнях [150].

Для определения минимума работы, необходимой для измельчения, существуют специальные методы. Одним из них является метод «свободного дробления» [14], который заключается в следующем: принимается, что разрушение отдельной частицы может быть произведено с реально возможным минимумом затрат энергии в том случае, когда частица разрушается без контакта с другими частицами. Стендовые исследования, основанные на раздавливании слоя частиц толщиной в одну из них, показали, что измельчители далеки от реально достижимого предела энергетической эффективности. Для увеличения этого показателя необходимо выполнение как минимум двух условий:

- 1) мельница должна работать в условиях, максимально приближенных к «свободному дроблению»;
- 2) полученный продукт должен немедленно удаляться из зоны измельчения.

Такой же подход характерен и для немецкой школы профессора Румпфа [11; 263], но он назван авторами методом «индивидуального зерна». При их исследованиях моделировался единственный акт разрушения, например, нагруженным сжатием со сдвигом. Оба метода дают близкие результаты. Это же отмечено и в отечественной работе [74].

Техника измельчения базируется в основном на двух воздействиях на отдельную частицу — разрушение между двумя поверхностями и соударение с твердой поверхностью при свободном ударе. Это и побудило немецких специалистов исследовать именно эти виды нагружения [8; 12].

При сопоставлении этих видов нагружений установлено, что для хрупких тел энергетически наиболее выгоден процесс медленного раздавливания. Так, по методу «индивидуального зерна» расход энергии на разрушение частиц до поверхности  $0,3 \text{ м}^2 / \text{г}$  составил  $2,5...5,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{т}$ , при свободном же ударе энергозатраты возрастают до  $25...58 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{т}$ .

При моделировании измельчения частиц с различными размерами [13; 146] были установлены причины снижения эффективности использования энергии по мере накопления мелкой фракции. Это связано с тем, что растет количество контактов между частицами и при общей прежней нагрузке уменьшаются контактные силы, причем их значения оказываются ниже разрушающих нагрузок, при этом увеличивается диссипация энергии.

В целях устранения этого недостатка Шонертом [13] был предложен двухступенчатый процесс: дробление прессованием хрупких материалов при высоких давлениях (30...50 МПа), а затем доизмельчение в шаровой мельнице. Данные подходы позволяют экономить до 30 % электроэнергии.

Одним из показателей работы мельницы является динамика износа рабочих органов в зависимости от дисперсности частиц [95]. На рисунке 1.6 показано изменение удельного износа с ростом дисперсности кварцевого песка при сухом помоле.

Из графика следует, что отношение суммарного намола металла ко всей образованной поверхности  $\sigma_0 / s$  уменьшается. Мокрый же помол характеризуется только большей величиной износа. Наши исследования показали, что при увеличении времени помола по достижении определенной дисперсности величина «примола» начнет увеличиваться.

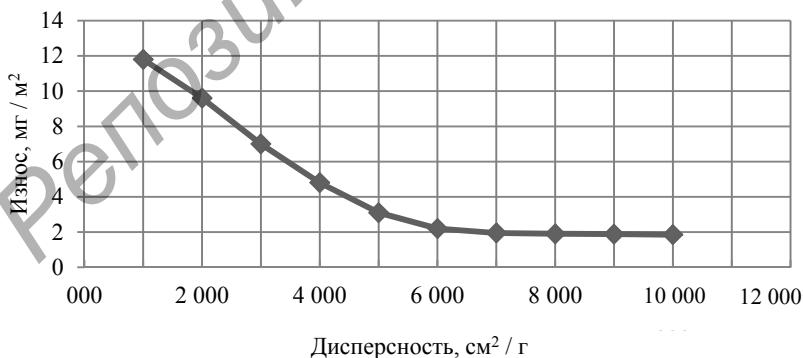


Рисунок 1.6 — Кинетика удельного износа с ростом дисперсности кварцевого песка при сухом помоле

Нас интересует также зависимость, определяющая скорость для разрушения частиц при ударе от их крупности. Такая зависимость, определенная теоретически в работе [257], представлена в виде графика на рисунке 1.7.

Из графика хорошо видно, что для частиц менее 1 мм рост потребной скорости идет лавинообразно. Кроме того, при расчете не учитывалась диссипация энергии удара, что ведет к необходимости увеличения скорости для разрушения частицы. Очевидно, что измельчение ударным способом на класс крупности 1 мм сопряжено со значительными издержками, особенно энергетическими.

Огромное многообразие технических средств дезинтеграции и еще большее многообразие перерабатываемых материалов привело к тому, что к настоящему моменту единых универсальных критериев оценки такого оборудования нет.

Нами рассмотрены и кратко проанализированы лишь те закономерности проведения процессов измельчения, которые в той или иной степени будут использованы в построении концептуальной базы, а также в проведении теоретических и экспериментальных исследований.

Часть информации, взятая из источников [28; 94; 124; 125; 146], будет использована без предварительного анализа и обобщения в настоящем разделе.

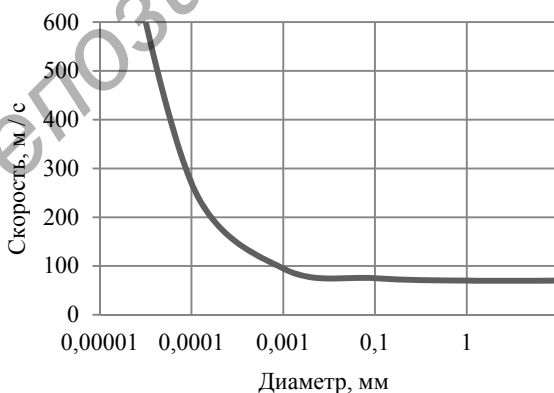


Рисунок 1.7 — Зависимость разрушающей скорости частицы от ее диаметра

## 1.5 Механические методы активации химических процессов

Активация измельчением, или механоактивация, — способ интенсификации физико-химических процессов. В ее основе лежит изменение реакционной способности твердых веществ под действием механических сил.

Повышение химической активности, снижение температуры плавления, спекания и других физико-химических явлений проявляются в веществах, накопивших энергию при измельчении. Измельченное вещество характеризуется при этом как активированное, а измельчение вещества — как активация.

В работах Болдырева, Аввакумова, Хайнике, Бутягина, Ходакова [17; 38; 39; 256] даются обширные сведения, объясняющие физическую сущность активации, включая изменение межионных расстояний в кристаллических решетках или межатомных расстояний в твердом теле. Активация представляет собой многоступенчатый процесс накопления энергии, хотя разделение на ступени производится чисто условно. Таких ступеней можно назвать четыре [87].

Первая ступень активации предшествует разрушению частицы под действием сил, не превышающих предел прочности данной частицы. Как уже отмечалось выше, формирующиеся зоны остаточных напряжений обусловлены статическим сдвигом атомов из своих «нормальных» позиций. Нарушенная кристаллическая решетка имеет возможность изменить как межмолекулярные, так и межатомные расстояния, а также углы их взаимной ориентации в структуре. Изменение энергетического состояния твердого тела на первой ступени активации можно оценить как изменение энергии вещества, равной работе внешних сил [87].

Вторая ступень активации — образование новой поверхности. Образование или развитие трещины в частице в процессе измельчения представляет собой изменение энергетического состояния вещества или трансформацию механической энергии измельчающего аппарата в поверхностную энергию измельчаемого материала. Увеличение полной энергии системы на  $1 \text{ м}^2$

вновь образовавшейся поверхности в изотермическом процессе выражается в виде  $\Delta H = G - T \frac{dg}{dt} = G + g$ , где  $G$  — удельная поверхностная энергия, Дж;  $g$  — энергия образования 1 м<sup>2</sup> новой поверхности, Дж.

Третья ступень активации — тонкое измельчение. Образование новой поверхности и концентрация энергии в поверхностном слое на границе раздела фаз при тонком измельчении коренным образом изменяют термодинамические функции состояния вещества и его реакционную способность. Увеличение свободной поверхности или уменьшение размера частиц влечет за собой изменение свободной энергии. Работу диспергирования и изменение свободной энергии при этом можно определить по формуле В. Томпсона [87]  $\Delta G = \frac{2\sigma_{\text{пн}}V}{r}$ , где  $\sigma_{\text{пн}}$  — сила поверхностного натяжения, Дж/м<sup>2</sup>;  $V$  — мольный объем, м<sup>3</sup>;  $r$  — радиус частицы, м.

Механообработка влечет за собой изменение энергии активации реакций, которая описывается уравнением  $\Delta E = RT \ln \frac{K_{\text{д}}}{K_{\text{и}}}$ , где  $\Delta E$  — изменение энергии активации, Дж;  $K_{\text{д}}$  и  $K_{\text{и}}$  — константы скоростей реакций с жидкостью диспергированных и идеальных кристаллов вещества соответственно.

Изменение термодинамической функции вещества при его тонком диспергировании является причиной изменений строения и состава вещества.

Четвертая ступень активации — сверхтонкое измельчение. На этой стадии исходный материал перестает существовать как таковой, превращаясь в совершенно новое вещество с другим строением, свойствами и даже элементарным составом. Это явление называется трансформацией вещества при диспергировании [87].

По мере увеличения дисперсности обрабатываемого вещества происходят следующие превращения:

- 1) переход веществ в новую модификацию без изменения химического состава;
- 2) аморфизация кристаллического вещества без изменения его химического состава и без растворения или возгонки его отдельных компонентов;



Если два слоя вещества смещаются друг относительно друга, то зародыш фазы  $A$ , находящийся между ними, можно рассматривать как своеобразный ролик. Ввиду большей прочности связи  $A-A$ , чем  $A-B$ , можно рассматривать фазу  $A$  как твердое тело, а фазу  $A-B$  — как жидкость. При большом смещении двух слоев фазы  $A-B$  относительно друг друга мимо зародыша проходит множество атомов обоих типов. Так как время перестройки электронных оболочек ( $10^{-13} \dots 10^{-14}$  с) значительно меньше времени их соприкосновения, то все атомы  $A$ , проходящие в непосредственной близости от зародыша, успевают присоединиться к нему (см. рисунок 1.8,  $a$ ).

На рисунке 1.8,  $b$  представлена развертка фазы  $A-B$  по плоскости скольжения при пластическом течении. Авторы [62] рассчитали, что для  $H = 1$  мм,  $L = 0,1$  мм и  $N = 2,5 \times 10^{13}$  атомов размер образующейся частицы равен примерно 0,03 мм.

Необходимым условием механической реакции в смеси твердых веществ является наличие контакта между частицами компонентов. В первом случае, когда реакция протекает по точечным контактам, скорость реакции определяется числом и площадью этих контактов. Во втором — точечные контакты переходят в контакты по всей поверхности одного трудноизмельчаемого компонента, когда оба компонента перейдут в пластическое состояние, скорость реакции также будет определяться величиной контактной поверхности.

Полагается [17], что общая скорость реакции в аппарате (рисунок 1.9)  $\omega = k_M x S_K$ , где  $k_M$  — константа, характеризующая вероятность протекания реакции при данном воздействии на единицу поверхности;  $x$  — вероятность попадания;  $S_K$  — площадь контактирующих участков веществ  $A$  и  $B$ ,  $m^2$ .

Известно, что зависимость  $S_k$  при диспергировании от времени выражается [263]  $S_k = S_{\max} (1 - e^{-k_2 t})$ , где  $S_{\max}$  — максимально достигаемая при заданных условиях поверхность вещества,  $m^2$ ;  $k_2$  — константа диспергирования.

На практике можно ограничиться выбором  $S_k$  на основе линейной зависимости  $S_k = kr$ .

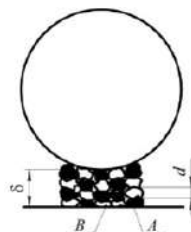


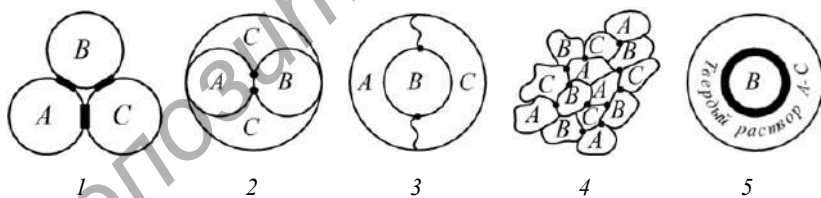
Рисунок 1.9 — Схема воздействия рабочего органа на смесь веществ  $A$  и  $B$

Особые возможности имеет метод механической активации для проведения твердофазного синтеза в многокомпонентных системах [263]. Так как тройные и более контакты между частицами маловероятны, синтеза здесь протекают через ряд промежуточных реакций, в которых участвуют шары контактирующих веществ (рисунок 1.10, 1).

При активации происходит пластическое течение твердых частиц, и точечные контакты превращаются в поверхностные. При этом возможно образование тройных контактов, как это показано на рисунке 1.10, 3. Происходит постоянное чередование контактных взаимодействий.

Все это в целом приводит к уменьшению числа промежуточных стадий, ускорению синтеза и повышению однородности.

Приведенные данные по вопросам активации твердых тел показывают, что этот процесс идет бок о бок с измельчением и диспергированием, в совокупности это может привести к новым положительным результатам. Основные положения механоактивации будем использовать при исследованиях по комплексной переработке вязущих веществ, порошков металлов, удобрений и других продуктов.



1 — двойные контакты в трехкомпонентной смеси при активации; 2, 3, 4 — образование тройных контактов при пластическом течении одного, двух, трех веществ в смеси; 5 — контактирование частицы вещества с твердым раствором из двух других веществ, образующихся при пластическом деформировании

Рисунок 1.10 — Схема, поясняющая образование контактов в трехкомпонентной смеси

## 1.6 Оценка основных направлений повышения эффективности дезинтеграторных технологий

Анализ исследований механизмов разрушения твердых тел показывает, что из всего их многообразия наибольшее применение имеют два — раздавливание и удар. По этой причине в измельчительных установках доминируют шаровые, валковые, конусные, роторные, молотковые и другие аппараты [150; 256].

Основной прогресс в области прикладной механики разрушения основан на уменьшении затрат энергии на внешнее и внутреннее трение собственно процесса измельчения. В последние десятилетия в дезинтеграторных технологиях широкое распространение получают агрегаты для механоактивации и направленного изменения свойств перерабатываемого материала: селективное разрушение, механосинтез, управляемая тиксотропия структуры и др. [17; 121; 150]. Рассмотрим основные, на наш взгляд, методы интенсификации процессов разрушения.

**Метод 1.** Воздействие на единичные частицы. Такой подход является наиболее эффективным с энергетических позиций, хотя в чистом виде практически не реализован. Имеет огромный потенциал и будет постоянно развиваться. Важнейшая проблема его проведения — это обеспечение управляемого движения обрабатываемых материалов [150; 161; 244].

**Метод 2.** Рациональное нагружение. В основу этого метода положено влияние различных способов нагружения на интенсивность и эффективность разрушения. Так, для гранита усилие разрушения при сжатии на порядок больше, чем при изгибе. Под эти условия проектируются и создаются измельчители различных типов: конусно-инерционные дробилки, пружинные мельницы, виброизмельчители [150; 208; 244].

**Метод 3.** Минимизация размеров мелющих тел. Это положение хорошо известно специалистам и находит самое широкое применение в технике измельчения. Его физическая суть заключается в создании максимальных напряжений в структуре измельчаемого материала. Этот метод успешно реализуется, например, в бисерных и коллоидных мельницах. В настоящее время это одно из основных направлений повышения эффективности тонкого и особенно сверхтонкого измельчения [25; 39; 48; 87].

**Метод 4.** Замкнутый цикл работы помольных агрегатов. Классическое определение этого метода — не измельчать лишнего. С этой целью работа измельчительных аппаратов организуется так, чтобы измельченный продукт не задерживался в рабочей камере, а удалялся из него, освобождая место для более крупного. За его внешней простотой кроется необходимость создавать специальные аппараты (сепараторы, классификаторы, фильтры), которые тем или иным способом выделяют из отведенной из базового аппарата части материала нужную фракцию, а остальную возвращают в процесс. Такой подход широко применяется, например, в цементной промышленности и дает ощутимый результат, повышая энергоэффективность на 20...30 % и более [37; 150]. Метод позволяет эффективно управлять качеством готового продукта.

**Метод 5.** Увеличение числа циклов воздействия. Приложения этого метода следует рассматривать по нескольким направлениям. Во-первых, это чисто кинематическое форсирование процесса, во-вторых, создание условий, при которых каждая частица материала большее число раз испытывает внешнее силовое воздействие. Примерами этому могут служить конусно-инерционные дробилки, бисерные и вибрационные мельницы [25; 48; 150].

**Метод 6.** Высокоскоростное нагружение или удар. При таком подходе в разрушаемом материале создаются более высокие напряжения, приводящие к разрушению. За счет изменения параметров интенсивности приложения нагрузки можно управлять характеристиками получаемого продукта. Этот метод является одним из основных для механической активации твердых тел [35; 208].

**Метод 7.** Адаптивность работы. Суть метода заключается в приспособленности рабочего оборудования к свойствам перерабатываемого материала. На изменение этих свойств влияют влажность, крупность, прочность, наличие посторонних включений, структура материалов и т. д. Одним из вариантов реализации адаптивности может быть применение упруго-деформируемых рабочих органов и выполнение рабочего оборудования с дополнительными степенями движения исполнительных элементов [208; 265].

**Метод 8.** Самоизмельчение. Идеология метода очень проста и заключается в том, что частицы материала разрушают друг

друга под влиянием внешних сил, создаваемых ударом, сдвигом, центробежными полями и т. д. [150]. Спектр приложений метода очень широк и определяется требованиями технологий и условиями эксплуатации. Его ограничения видятся в больших диссипативных затратах энергии и реологической нестабильности процесса.

**Метод 9.** Селективность. Разрушение материала производится с учетом его физико-механических свойств, дефектности структуры, спайности её минеральных образований и др. Проектирование таких измельчителей сопряжено с большими трудностями и требует серьезных научно-технологических разработок. Метод селективной дезинтеграции наиболее развит в рудоподготовке [150], но сейчас его применение чрезвычайно актуально для производства стройматериалов [208; 244].

**Метод 10.** Вариативность. Применение подхода определяется изменчивостью как свойств перерабатываемых материалов, так и конструктивным исполнением рабочего оборудования, которые должны учитывать эти изменения. Попытки решить задачи измельчения в одну стадию, т. е. в одном аппарате, практически обречены либо связаны с большими проблемами. Серьезных научных исследований в данном направлении не проводилось, они только начинают формироваться [161; 211].

**Метод 11.** Физико-химическая обработка. Здесь используются методы физико-химической механики, в частности, эффект Ребиндера, высокочастотная вибрация, ПАВ. Позволяет повысить эффективность дезинтеграции, но без интенсивного внешнего воздействия особых преимуществ не имеет [77; 121].

**Метод 12.** Управляемые колебания. Есть много приложений этого метода, например, работа конусно-инерционных дробилок и вибромельниц. Большие перспективы в этом случае связаны с резонансом, при реализации которого можно целенаправленно концентрировать ввод энергии в зонах разрушения. Из новых технологических машин такой подход используется в пружинных мельницах [208]. Технологическая вибротехника относится к наукоемкой области машиностроения и обладает большим потенциалом развития [94; 244].

**Метод 13.** Наложение инерционных сил. Преобладающим в этом случае является разрушение в поле сил инерции, например,

в планетарных или роliko-маятниковых мельницах. При правильной его реализации достигается высокий технологический результат (планетарная мельница). Метод успешно развивается [48].

**Метод 14.** Разупрочнение материала. При определенных механических воздействиях в дополнении с другими внешними условиями в материале происходят изменения, приводящие к снижению его прочности и, следовательно, к более быстрому разрушению. Наибольшее применение этого метода связано с измельчением металлических материалов [124].

**Метод 15.** Изменение внешних условий. Это целый спектр самых разнообразных вариантов: охлаждение, в том числе посредством азота, нагрев, обработка в жидкой среде, вакуум, запаривание и др. Многообразие реализуемых в них механизмов разрушения требует их отдельного рассмотрения. Эффективность реализации на практике внешних условий для разных технологий даёт различные результаты [25].

Перечисленные варианты интенсификации процессов измельчения являются далеко не полными, но даже простого их перечисления достаточно, чтобы оценить сложность выбора конкретного способа переработки того или иного материала с максимальной энергетической, технологической и экономической эффективностью. В этой связи показателен опыт сравнения различных типов измельчителей. Попытка их объективной оценки была предпринята в 1993 году в Одессе на одном из научных форумов, но реальных результатов она не принесла [95]. Причина этого заключается в отсутствии как сформировавшейся базы сравнения различных аппаратов, так и наличия единого независимого центра, проводящего оценку действующего оборудования.

Сложность рассматриваемых вопросов усугубляется ещё и тем, что в процессе работы даже самого простого измельчительного агрегата одновременно присутствует не один, а сразу несколько видов воздействий и количественно учесть их влияние на итоговый результат пока не представляется возможным. Это не только сложнейшая, но и очень важная для развития промышленности задача [150]. Поэтому создание технологических аппаратов для переработки конкретных видов сырья и материалов требует учета не только их физико-механических свойств,

но и закономерностей поведения характерного для тех или иных факторов внешнего воздействия.

Низкая энергоэффективность существующих процессов измельчения, выражающаяся, например, в том, что КПД большинства измельчителей ниже 1 %, обусловлена отсутствием эффективных способов ввода внешней энергии в разрушаемую среду [150]. При этом 10...20 % энергии расходуется на избыточную деформацию, 80...90 % — на внешнее трение между зернами материала и рабочими органами, около 2 % — на разные излучения (звуковые и др.).

Попытаемся определить новые направления в развитии помольной техники, связанные с формированием основ технологического направления, означающего переход к новому физическому принципу организации процессов, что приведет к росту эффективности производства.

Техника измельчения, отличающаяся необычным конструктивным многообразием, базируется в основном на двух механизмах воздействия на отдельную частицу: 1) частица или агломераты частиц подвергаются разрушению между двумя поверхностями (раздавливание), чаще всего при наличии сдвига; 2) частица разрушается при соударении с твердой поверхностью (свободный удар).

Известно, что механические свойства твердых пород при разных видах нагружения находятся в соотношении [112]:  $\sigma_{сж} > \tau_{сдв} > \sigma_{изг} > \sigma_p$ , где  $\sigma_{сж}$ ,  $\tau_{сдв}$ ,  $\sigma_{изг}$ ,  $\sigma_p$  — временное сопротивление образцов на сжатие, сдвиг, изгиб и растяжение соответственно.

Освоение новых способов измельчения в настоящее время идет на основе нагружения путем сдвига и изгиба. Важную роль при этом играет интенсивность и периодичность приложения нагрузок, а также взаимодействие рабочих органов и разрушаемых частиц.

Каждому способу измельчения соответствует определенная конструкция измельчительной машины, которая по преимуществу имперически реализована и внедрена в производство. Конструктивное исполнение измельчительной (помольной) техники чрезвычайно многообразно [25; 48; 112; 208; 268], что не позволяет в данной работе дать этому виду оборудования предметный

анализ. В качестве важного замечания к сказанному следует отметить, что очень часто измельчительные машины — кроме простого измельчения выполняют и другие функции — производят сушку, перемешивание, транспортирование, классификацию материалов и др. Именно совокупный учёт всех этих факторов и побуждает нас разрабатывать принципиально новый вид оборудования для дезинтеграторной переработки материалов.

Резервы повышения эффективности процесса измельчения и снижения износа подробно изложены в работах [150; 184; 194]. Главным из них является снижение доли внешнего трения. Достигнуть этого можно, используя метод свободного дробления, согласно которому основные потери энергии связаны со взаимодействием частиц в слоях обрабатываемого материала, для снижения этих затрат необходимо внешнее усилие направлять на отдельные частицы. Очевидно, что добиваться этого можно за счет шлейфового движения потоков зерен материала через зоны дезинтеграции [74; 208].

Главной отличительной особенностью известных измельчителей является жесткое выполнение рабочих органов. Это означает их невосприимчивость ко внешнему силовому воздействию. Амплитудно-частотные характеристики рабочих поверхностей не соответствуют природе обрабатываемой среды, оптимально этим условиям удовлетворяют рабочие органы, выполненные на основе упругих элементов или многошарнирных звеньев [184].

Основным рабочим свойством упругих элементов является способность изменять свои размеры под действием нагрузки и восстанавливать первоначальную форму после снятия нагрузки. Параметром любого упругого элемента является перемещение, которое характеризуется изменением положения некоторой подвижной точки упругого элемента при его деформации относительно начала отсчета. Обычно для отсчета выбирают точки, совершающие максимальные перемещения. При этом энергия, затраченная на деформирование, аккумулируется в теле упругого элемента и переходит в колебания различного рода, в том числе и высокочастотные. Подвижность рабочей поверхности измельчителя обеспечивает минимальные относительные перемещения частиц измельчаемого материала вдоль поверхности, а значит, и минимальный износ. В силу сказанного упругие

элементы могут совершать сложные пространственные колебания и передавать энергию в обрабатываемую среду. Колебания или перемещения могут быть линейными, угловыми или комбинированными. Способность упругих элементов совершать движения с заданными характеристиками (амплитудой, частотой колебаний, ускорением, законом движения и т. д.) в то время, как их поверхности могут взаимодействовать между собой и с другими элементами конструкции (корпусом, стойками, мелющими телами и т. д.), открывает их новые технологические возможности по комплексной переработке сырья и материалов [208].

Достоинство упругих элементов заключается в том, что, находясь в среде перерабатываемого материала, они не просто высвобождают энергию, а эффективно передают ее этой среде, причем селективно и избирательно. Возникающее при этом энергосиловое поле переводит дисперсный материал в фазу тиксотропного разжижения, изменяя общую реологическую обстановку в аппарате. За счет этого снижаются сопротивления перемещению обрабатываемого продукта, улучшаются условия его попадания в зоны разрушения.

Наличие дополнительной степени свободы, обусловленной принудительной деформацией упругого элемента, создает предпосылку для конструирования механизмов с новыми условиями воздействия на обрабатываемую среду, а также характером движения загрузки. Последнее обстоятельство предполагает такую организацию рабочих циклов, при которой до минимума сокращаются затраты на циркуляцию материала и на потери от трения в рабочей камере. При этом центробежные силы могут как интенсифицировать процесс обработки, «работая» в направлении движения материального потока, так и действовать против, ограждая доступ крупных частиц, т. е. выполняя функции классификатора.

В настоящее время концепции рациональной дезинтеграции [184; 208] предполагают воздействие на каждое зерно в узких шлейфовых зонах частиц с монодисперсным зерновым составом при минимуме пути трения. Помимо этого предполагается наложение пульсирующих воздействий, частота которых соответствует частоте собственных колебаний разрушаемых тел.

Важнейшей характеристикой дезинтеграторов является износ их рабочих поверхностей, который определяется природой измельчаемого материала и особенностями рабочего процесса.

Повышение износостойкости рабочих элементов современных дезинтеграторных машин достигается в основном за счет увеличения твердости контактных поверхностей и использования коррозионно-стойких материалов для работы в агрессивных средах [194].

Использование эффекта самофутеровки рабочих поверхностей компенсирует только незначительную часть проблемы износа, но приводит к повышению затрат на разрушение вследствие дополнительной доли трения разрушаемых частиц между собой.

В значительной мере износ определяется реологической обстановкой в аппарате. Это особенно важно в многотоннажных технологиях, например, при переработке высоковлажных вязких продуктов, когда сушка экономически нецелесообразна [58]. Налипание материала на рабочие поверхности приводит к скачкообразному повышению износа и энергопотребления. Эффективного оборудования для работы в таких условиях пока нет [268].

Основные резервы снижения износа при измельчении твердых тел могут быть реализованы не за счет изменения (улучшения) свойств контактных поверхностей, а путем организации рациональных циклов измельчения. Такие подходы достаточно подробно изложены в работах [161; 194].

Основное направление повышения износостойкости рабочих органов дробильно-размольного оборудования определяется условием [194]  $u = kE$ , где  $u$  — износ измельчительной гарнитуры;  $k$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от степени эффективности рабочего процесса;  $E$  — энергозатраты на процесс измельчения Вт · ч / т.

Это объясняется тем, что, например, при работе шаровой мельницы каждый тысячный удар шара является рабочим, остальные — холостые [55], а износ мелющих тел и футеровки в холостом режиме работы и с загрузкой материалов средней прочности по шкале М. М. Протодяконова практически равнозначен.

## 1.7 Технологические задачи в области изменения материалов и пути их решения

Несмотря на то, что существующие процессы измельчения являются не только одними из наиболее распространенных в технике и самыми энергоемкими и дорогостоящими во всех промышленных переделах [150], их развитие и совершенствование осуществляются крайне медленно и недопустимо с позиции экономических угроз и технологических вызовов [211]. Складывающаяся ситуация требует как серьезного анализа в области практической реализации процессов измельчения, так и прогнозирования их трансформирования с учетом ожидающего нас очередного цивилизационного прорыва [260; 261]. Многообразие дезинтеграторных машин и технологий не позволяет дать их всестороннюю оценку, поэтому наши авторские обобщения коснутся преимущественно задач измельчения в промышленности строительных материалов.

В целях оценки возможностей перевооружения отделений измельчения материалов для нужд стройиндустрии разделим их на основные группы по физико-механическим и технологическим признакам и дадим оценку на примере Республики Беларусь [218]. К сказанному только следует добавить, что для Российской Федерации номенклатура измельчаемых материалов более пестрая, а объемы переработки несоизмеримы, но принципиально оборудование и технологии ничем не отличаются между собой.

**Группа 1:** это прочные скальные породы. К ним относится гранитный щебень ОАО «Гранит» г. Микашевичи, объем его переработки составляет около 18 млн тонн в год, доломит ОАО «Доломит» п. Руба, Витебский р-н, объемы переработки — до 5 млн т / год, а также переработка валунных материалов предприятий дорожной отрасли — до 3,0...3,5 млн т / год.

**Группа 2:** измельчение, причем, как правило, с сушкой влажных, рыхлых, малопрочных пород, к которым относится мел, мергель, глина, уголь, трепел — это примерно 16...18 млн тонн, преимущественно карбонатного сырья для производства цемента по сухому способу.

**Группа 3:** высокопрочные и обожженные материалы — цементный клинкер, комовая известь, а также сырьевые материалы — кварцевый песок и др. Объемы их переработки можно оценить в 16 млн т / год.

**Группа 4:** большое число других продуктов, однако объемы их переработки сравнительно невелики и на общую картину энергопотребления значимого влияния не оказывают. К ним можно отнести различного рода добавки, лакокрасочные материалы, порошки, пасты, шликеры и т. д. В эту группу целесообразно также включить и аппараты для приготовления наноструктурных композиций, которые получают развитие во всем мире.

**Группа 5:** отходы всех видов, прежде всего твердые бытовые отходы (ТБО), древесина, автомобильные шины, фекальные илы и т. д. Потенциал использования этих материалов по исходной переработке сырьевой массы мы можем оценить в 4...5 млн т / год.

**Группа 6:** строительные смеси на основе вяжущих веществ, преимущественно бетонные смеси, а также массоподготовки в силикатной и керамической отрасли. Современные технологии их приготовления предусматривают механоактивацию исходных компонентов в целях экономии вяжущего или повышения показателей качества готовых изделий. Объемы переработки реальны — до 8,0...8,5 млн м<sup>3</sup> в год.

Учитывая, что процессы измельчения в структуре производства строительных материалов сопряжены с другими (смешивание, сушка, транспорт, обогащение, классификация и др.), их приемлемо называть дезинтеграторными, как это принято в рудоподготовке [150]. Технология их проведения во многом определяет как условия, так и энергоэффективность работы оборудования [37; 218].

Представляет определенный интерес анализ конструкций технологического оборудования для переработки этих материалов. В первой группе основу парка машин составляют щековые, конусные и в некоторой части агрегаты ударного действия. Энергоемкость процесса измельчения при этом сравнительно низкая, а конструкции машин, отличающихся большими габаритными размерами и массой, достаточно отработаны и весьма консервативны в своем развитии, что не предполагает их существенной модернизации. Кроме того, рынок этого оборудования заполнен, а резерв модернизации минимален. Здесь, прежде всего, для осуществления ресурсосбережения возможно решение ряда технологических задач, например, уменьшения переизмельчения продукта. Известно, что в ОАО «Гранит» скопилось не менее 16 млн тонн гранитного отсева, его можно использовать во многих производствах, организовав соответствующую переработку.

Принципиально по иному обстоит ситуация с переработкой материалов второй и третьей групп. Особое внимание здесь следует обратить на переработку сырьевых материалов, так как это не только чрезвычайно массовый передел, очень энергоемкий, но и значительно расширяющий свое применение в связи со строительством новых цементных заводов, использующих сухой способ производства.

Здесь широко применяются шаровые мельницы, аэрофолы, валково-тарельчатые агрегаты и молотковые измельчители. Это наиболее расточительные машины с большим потенциалом энергосбережения, который реально можно использовать. Здесь возможно получение большой экономии энергоресурсов с помощью новых подходов, например, от использования холодной сушки в стадии первичной обработки сырья при сухом способе производства цемента. В этом случае сырье карьерной влажности подвергается интенсивному измельчению (дроблению) с одновременной продувкой атмосферным воздухом, концентрируемым посредством конфузора и подаваемым в зону измельчения со скоростью 15...50 м/с [200].

Оборудование, входящее в четвертую группу, многочисленно и разнообразно по конструктивному исполнению, но в общем составе дезинтеграторных технологий его доля сравнительно мала.

Совершенно иная картина с переработкой материалов, входящих в пятую группу. Переработка отходов входит в перечень национальных проблем, особенно с экологических позиций, но для их эффективной переработки нужного оборудования просто нет, а значит, его нужно создать.

Включение в состав перерабатываемых материалов строительных смесей (группа 6) потенциально необходимо в целях реализации ресурсосбережения, которое можно обеспечить механоактивацией, т. е. домолом, вяжущего и части мелкого заполнителя. Технологически это давно доказано, но пока нет надежного оборудования для такой обработки. Вопросы механоактивации чрезвычайно актуальны и требуют отдельного рассмотрения [182; 193].

Новых решений в части снижения затрат на помол при производстве строительных материалов может быть множество, но для их практической реализации требуется проведение большой поисковой, организационной и исследовательской работы.

Перевооружение отделений дезинтеграции строительных материалов касается создания энергоэффективных агрегатов для крупнотоннажного производства. Если конкретизировать задачу, то можно выделить две группы машин, которые определяют уровень этой техники. Это, прежде всего, шаровые мельницы, отличающиеся очень высокой энергоемкостью и большими эксплуатационными издержками. Например, расход электроэнергии на тонкий помол цемента составляет порядка  $30...45 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{т}$ , а другие затраты на проведение процесса (износ мелющей гарнитуры, ремонты и др.) эквивалентны ему по стоимости. Во вторую важнейшую группу машин входят дробилки ударного действия, которые начинают доминировать в стадиях подготовки сырья, особенно при сухом способе производства цемента.

Общая картина процессов измельчения в отрасли достаточно подробно изложена в работе [218], однако она не предусматривает их увязку с реальным уровнем промышленного производства, общенаучным потенциалом их развития и механизмами его реализации. На этом основании остановимся на рассмотрении некоторых важных, на наш взгляд, направлений приложения процессов измельчения.

1. Крупнотоннажные производства. Сюда следует отнести дробление горных пород в дробилках различного типа, переработку влажных сырьевых материалов, в том числе с совмещением измельчения с сушкой, тонкого помола прочных материалов в валковых агрегатах, а также измельчение целого ряда материалов другими способами, например, в дробилках ударного действия или аэрофлах.

В составе перечисленных переделов важнейшим является помол в шаровых и валковых установках, так как эти машины не только наиболее применяемые и энергозатратные из всех существующих, но и самые «устойчивые» в своей технологической нише. Их техническая модернизация во многом исчерпала экономически значимый потенциал, а замену их машинами другого принципа действия на ближайшие 15...20 лет даже гипотетически вряд ли следует ожидать.

2. Технологии и оборудование для массоподготовки. Речь следует вести о процессах производства силикатных и керамических материалов, получения сухих строительных смесей, приготовления различных составов, в том числе на органической основе, и многих других.

Этому технологическому сегменту в равной степени присущи как большая энергоёмкость и разветвленность набора целей оборудования, так и огромный потенциал совершенствования по всем направлениям, прежде всего в улучшении качества массоподготовки, энергосбережении и снижении капитальных затрат при освоении выпуска нового оборудования. Сегодня здесь прогресс сдерживается освоенностью рынка традиционными производителями и отсутствием его «возмутителей», т. е. появлением новых конкурентов.

3. Оборудование и технологии для приготовления строительных смесей. Главным тезисом этого направления является процесс механоактивации вяжущих и заполнителей, что особенно актуально для приготовления бетонных смесей. На данный момент накоплен значительный потенциал в решении этой задачи [167; 208], что позволяет ставить вопрос о коренной модернизации бетоносмесительных заводов и установок путем встраивания в состав оборудования механоактиваторов дезинтеграторного типа и корректировки технологического процесса, особенно в части раздельной обработки исходных компонентов.

4. Оборудование для переработки небольших по объёму, но количественно многообразных материалов. В части этой группы машин и оборудования выполнено множество наработок, но их широкое использование сдерживается низким качеством и отсутствием крупного производителя, способного наладить все его изготовление в едином центре и организовать хорошее сервисное обслуживание, а также нежеланием предприятий—потребителей заниматься внедрением новой техники.

5. Переработка отходов. В наших странах это направление находится в зародышевом состоянии, его развитие следует начинать директивно, разрозненные мероприятия проблему не решат, поэтому здесь требуется создание крупного центра, например, «Росотходь», в котором на первом месте должны быть технологии и объекты использования отходов, а только потом — оборудование [185].

6. Создание специальных машин и новых технологий. В последнее время возникает острая потребность в разработке оборудования, способного решать принципиально новые технологические задачи. Так, уже сегодня находят практическое приме-

нение нанокomпозиции и наноматериалы, получаемые с использованием дезинтеграторных технологий. Многие технологии нуждаются в механизмах максимальной активизации химических процессов, возрастают требования к совмещению процессов помола с тепловыми, химическими переделами и т. д.

Генеральными задачами развития дезинтеграторных технологий является максимальное энергосбережение, поиск принципиально новых механизмов и способов измельчения, создание многофункциональных помольных систем, всемирное снижение стоимости помола при одновременном обеспечении предельно возможного качества переработки. Нельзя забывать и о решении новых задач, например, производства компонентов для 3D-принтеров, которые войдут в ближайшее время и в строительную отрасль. Круг новых направлений и технологических задач, решаемых с помощью дезинтеграторных стадий переработки, будет только расширяться [187].

Обобщающая оценка дезинтеграторных технологий позволяет со всей определенностью утверждать, что эта сфера промышленного производства напрочь исчезла из интересов не только отечественных управленцев, но и бизнесменов. Объяснение этому следует из полного отлучения специалистов и научных коллективов, занимающихся проблемами измельчения сырья и материалов, от практического их решения. Речь стоит вести и о захвате рынка измельчительных машин зарубежными производителями, но самое странное для нас заключается в разрушении собственной машиностроительной базы и отсутствии вразумительного понимания её возрождения.

Вне всяких сомнений, системное развитие дезинтеграторных методов переработки материалов следует отнести к так называемым «передовым производственным технологиям» и рассматривать как часть стратегии защиты национальных интересов [210]. Нельзя ставить себя в зависимость от зарубежных поставок оборудования, которое своими силами не производится и когда мы лишены возможности управлять эффективностью своего промышленного комплекса, а также занять достойное место в будущей новой нише в мировой экономике — технологическом машиностроении [211].

## **2 АДАПТИВНЫЕ МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ СЫРЬЯ И МАТЕРИАЛОВ И ИХ РАЗВИТИЕ**

### **2.1 Адаптивные методы в природе и технике и вопросы их практической реализации**

Адаптация в технике и природе носит один и тот же смысл и означает приспособление к условиям окружающей среды. Причем в природе адаптация принимает ряд специфических особенностей, часто не проявляющихся в технике. Например, адаптация к условиям добывания пищи, к поведению внутри популяции или сообщества, к специализации внутри этого сообщества, к особенностям территории и т. п. И даже этим немногим условиям адаптации можно косвенно противопоставить адаптацию в технике. Например, приспособление двигателя внутреннего сгорания к различным видам топлива, зависимость движения отдельного звена с учетом взаимных связей внутри кинематической пары, специализация к территориальным условиям работы — горные машины, болотные, подземные, снегоходы и т. п.

Близким по понятию к адаптации является аккомодация — в природе приспособление положения хрусталика глаза к определенному положению, обеспечивающему наибольшую резкость объекту наблюдения, или приспособление тканей к медленно нарастающему по силе внешнему раздражителю. В технике аккомодация может проявляться достаточно широко, например, изменением жесткости опоры в зависимости от величины или скорости нарастания внешнего воздействия (амортизаторы), изменение степени поглощения или отражения лучистой энергии в зависимости от мощности теплового потока и т. д.

Видимый свет является, как и многие другие явления, одной из разновидностей электромагнитного излучения. Любое излучение носит волновой характер. Механические волны могут генерироваться от различных источников: ветра, дождя, землетрясения и других явлений. В технике генерация волн осуществляется целенаправленно путем возбуждения колебаний в электромагнитных контурах — излучатели, или в механических систе-

мах — вибраторы. Колебания в машинах и механизмах могут носить случайный характер и быть вызваны внешними воздействиями, например, неровностями пути. В первом случае технической задачей адаптации может служить совпадение собственной частоты колебаний с внешними — резонанс, обеспечивающий максимальное преобразование (поглощение) возбуждающих колебаний. Во втором случае технической задачей адаптации служит максимальное гашение колебаний — амортизация.

В природе адаптация проявляется во множестве форм. Многие адаптационные проявления накапливаются в течение многих поколений и закрепляются на генетическом уровне. Механизмы их реализации многообразны. Такой вид адаптации в технике проявляется путем постепенного накопления конструктивных изменений, обеспечивающих наилучшую работоспособность в данных условиях окружающей среды, а также путем регенерации утраченных механизмов или органов у машин. Это делается, например, посредством своевременного обслуживания или ремонтов.

Временные адаптационные изменения в живых организмах могут возникать под воздействием стрессовых ситуаций в форме выработки защитных реакций, повышающих сопротивляемость к воздействию окружающей среды. В современной технике почти всегда предусматриваются механизмы защиты от сверхвысоких нагрузок, вызывающие срабатывание систем защиты или приводящие к выключению устройства. Встречаются в технике и адаптивные внешние оболочки (гуммированный корпус у подводных лодок), и защитные элементы (подрессоренные лопасти бетоносмесителей или валки дробилок), предохранительные клапаны в гидросистемах и т. д.

Адаптация в потенциальном силовом поле проявляется у живых организмов в виде диатропизма — стремления к изменению положения вдоль или перпендикулярно силовым линиям или световому потоку. Так, лист растения поворачивается вслед за солнечным диском в течение светового дня, ориентируясь перпендикулярно световому потоку. Человек в течение эволюции выработал способность прямохождения, т. е. вдоль силовых линий поля сил тяжести. Ориентация в поле сил тяжести широко используется в различных механизмах, балансирах, противовесах и т. п. Адаптация к силовым линиям электромагнитного поля применяется в электродвигателях, устройствах для намаг-

ничивания, для электростатического осаждения, напыления, создания ворсовых покрытий и многих других. Адаптация к линейному силовому полю упругости проявляется во всех механизмах и машинах, использующих цилиндрические, конические, плоские, спиральные и другие виды пружин.

Часто в природе выживание и развитие сопряжено с адаптацией к поверхности. В простейшем случае это может выражаться в простом прилипании, т. е. адгезии — важнейшее свойство занимать нужное положение в пространстве. В технике адаптация к конфигурации поверхности может выражаться в виде сложных шарниров опорных плит, многозвенных захватов или биопротезов, вакуумных присосок. В целом механизмов адаптации чрезвычайно много, особенно в природе, что может служить методологической базой для развития технических систем.

Сезонность в технике проявляется в смене топлива, смазывающих и рабочих масел, автомобильных покрышек, способов охлаждения (водяное, воздушное) или в сезонной консервации техники.

Высшей формой адаптации является саморегуляция — автоматическое поддержание определенного состояния биологической или механической системы. В природе и в технике наблюдается самосборка, проявляющаяся в порядочном объединении групп клеток или механизмов, приводящая к образованию новых важных структур [111].

Подводя итог, можно выделить следующие основные направления адаптации в технологических машинах [152; 208]:

- выбор траектории движения, например, по пути наименьшего сопротивления;
- выбор положения в пространстве;
- выбор или подстройка под скорость движения;
- резонансная подстройка частоты колебаний или демпфирование частоты внешнего возбудителя колебаний;
- 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.

Чем большим диапазоном саморегуляции будет обладать рабочий орган или механизм, тем большей работоспособностью он будет обладать при меньших затратах энергии. Заслуживает внимания природный опыт адаптации [111], который может найти широкое применение в технологических процессах и аппаратах производства строительных материалов. Наши взгляды, базирующиеся на законах окружающей природы, касаются исполнения рабочих органов технологических машин с повышенными деформационными возможностями или дополнительными степенями свободы движения [208].

Это вполне конкретная закономерность, она прослеживается в работах многих авторов. Вне сомнения, что общий уровень развития техники позволит на принципе природных аналогий создавать новые высокоэффективные технологические системы [152; 213].

## **2.2 Методологическая база создания новых видов технологических аппаратов адаптивного действия**

При написании данного раздела следует чётко представлять себе уровень поставленной задачи и понимать, что подготовить универсальную методическую базу по созданию принципиально новых видов технологических машин априори невозможно, так как человечество уже давно использовало бы её в своих практических целях. Речь можно вести об отдельных достаточно обоснованных с научной точки зрения подходах, которые могут дать только весьма приближенное направление в решении интересующих нас проблем.

В качестве некоторых направлений разработки методической базы создания новых видов технологического оборудования приведём краткие сведения о технологической вибротехнике, адаптивных механизмах переработки дисперсных сред, некоторых новых представлениях о прикладной физико-химической механике, вариативных подходах в организации и проведении технологических процессов, а также обоснуем идеологию использования аномальных эффектов в реализации дезинтеграторных и других технологий и представим концептуальные положения выбора направления развития технологических машин.

*Методы технологической вибротехники.* Концепция и основные направления реализации технологической вибротехники основаны на вибрационных или динамических воздействиях при переработке сырья и материалов в промышленном производстве. Она охватывает дробление и помол, уплотнение, обжиг, сушку, гранулирование, смешивание и другие процессы, являющиеся самыми объёмными и затратными в структуре современной промышленности. Уникальность существующих методов вибротехники обусловлена широтой кинематических возможностей, повышенной энергонапряжённостью, простотой приводного механизма, малой металлоёмкостью и, что особенно важно, созданием особых условий проведения рабочих процессов. К их числу следует отнести: эффект тиксотропного «разжижения» структуры дисперсного материала, переориентацию зёрен твёрдых частиц в процессе их переработки, снижение трения между ними, концентрацию энергии и выброс её в виде кратковременного импульса, управление потоками движения дисперсных материалов и ряд других.

Следствием этих эффектов и закономерностей является чрезвычайно высокая технологическая эффективность применения методов вибротехники в промышленном производстве. Например, существующая технология приготовления бетонных смесей и работа с ними практически полностью производятся с применением вибрационных машин, наиболее эффективными агрегатами для дробления особо прочных пород являются конусные инерционные дробилки, а для устройства свайных фундаментов широко используются вибропогружатели.

Важным конъюнктурным фактором, определяющим самое широкое использование вибрационных машин в технологических процессах переработки веществ, является высокий уровень современной вибрационной механики.

Особого внимания заслуживают перспективы распространения методов технологической вибротехники на процессы переработки дисперсных материалов, которые ранее осуществлялись традиционными методами, причём для многих их применений необходимо создавать принципиально новое оборудование. По нашему мнению, даже такие уникальные агрегаты, как трубная шаровая мельница или вращающаяся печь, могут быть заменены вибрационными машинами, кардинально отличающимися от известных.

Главной задачей создания вибрационных машин при этом является обеспечение их оптимального управления с учётом всех особенностей технологического процесса. Сегодня это один из основополагающих трендов в формировании технической базы современных производств, осуществляющих комплексную переработку сырья и материалов. Основные направления развития данного направления в авторских представлениях изложены в работах [182; 192; 213].

*Адаптивные методы переработки материалов.* Смысловое значение адаптации в технике и природе совпадает по смыслу и означает приспособление к условиям происходящих при этом процессов [111]. Естественно, что правильное использование этого важнейшего функционального механизма открывает новые технологические возможности при проведении целого ряда взаимодействий в преобразовании дисперсных сред. Рассмотрим некоторые адаптивные подходы в реализации механических процессов технологической переработки различных материалов [182; 208; 213].

Главной отличительной особенностью большинства известных технологических машин является жёсткое в традиционном понимании выполнение рабочих органов. Это означает их слабую восприимчивость ко внешнему силовому воздействию. Амплитудно-частотные характеристики рабочих поверхностей их не соответствуют природе обрабатываемой среды и оптимальным условиям подвода энергии к этой среде. В наилучшей степени этим условиям удовлетворяют рабочие органы, выполненные на основе упругих элементов [192; 209] или имеющих зоны различных параметров воздействия на обрабатываемые продукты. В качестве типичных конструкций оборудования адаптивного действия можно считать пружинную мельницу [192], цепной агрегат с деформируемой рабочей камерой [195] или универсальный измельчитель с иглофрезерными рабочими органами [148].

Значительным эффектом обладают конструкции, адаптивность которых реализуется за счёт дополнительных степеней движения, в частности, многошарнирности. Характерный пример — молотковая дробилка, которая при попадании недробимых включений пропускает их через себя, а на разрушаемый материал действует избирательно.

Наряду с перечисленными методами адаптивные механизмы переработки могут быть реализованы путём изменения силовых воздействий, управления параметрами рабочей среды, наличием различных излучений, в том числе электромагнитных, ультразвуковых, радиационных, введением химических или физических реагентов и целого ряда других факторов.

*Прикладная физико-химическая механика.* В современных технологиях переработки дисперсных сред использование методов физико-химической механики является доминирующим научным и прикладным направлением. Создание на их основе особых условий изменения свойств перерабатываемых материалов позволяет существенно интенсифицировать технологические процессы и проектировать оборудование, основанное на новых механизмах воздействия на исходные продукты.

Базой для реализации физико-химической механики является эффект П. А. Ребиндера, который заключается в облегчении процессов деформации и разрушения твёрдых тел в результате понижения поверхностной энергии на границе этих тел с внешней средой путём адсорбции ничтожно малых количеств ПАВ, которые, мигрируя в микротрещины, развивающиеся в деформируемых объектах и многократно уменьшающие поверхностную энергию, обеспечивают лучшие условия для диспергирования. Этот эффект значительно усиливается одновременным наложением дополнительных механических воздействий, в частности, вибрационной обработки дисперсных сред [94; 119].

В самом широком понимании физико-химическая механика — область науки, изучающая физическую химию процессов деформирования, разрушения и образования материалов и дисперсных структур. Её основное прикладное назначение — создание материалов с заданными свойствами и оптимальных для целей их применения структурой [119]. Для рассматриваемых в данной монографии задач следует выделить вопросы повышения эффективности как отдельных процессов переработки материалов (измельчение, смешивание, уплотнение и др.), так и создание эффективных материалов, в частности, цементных и силикатных бетонов.

*Вариативные подходы в организации и проведение технологических процессов.* Под вариативными подходами следует по-

нимать функциональное соответствие между непрерывно изменяющимися в процессах переработки свойствами материалов и условиями воздействия на них рабочих органов технологических машин, условиями и режимами их обработки. По своей сути это так называемые аддитивные технологии, если брать базовые переделы, или промышленные установки, которые характеризуются «разнопринципностью» приложения внешних воздействий или энергетических полей на обрабатываемые с их помощью материальные среды. Активизировать вариативные подходы можно на основе известных направлений, в том числе описанных ранее [211].

В химических производствах вариативные технологии уже достаточно широко используются, а вот в циклах механической и тепловой обработки гетерогенных материалов это направление практически отсутствует с точки зрения фундаментальной науки. Вариативные методы проведения технологических процессов наиболее эффективны в производствах с широким фронтом различных по своему составу и формам переделов, например, при производстве цемента, силикатов, керамических и других материалов.

*Аномальные эффекты технических процессов.* Одним из наиболее реальных путей прорыва в технической области может быть поиск и использование в реальных процессах аномальных эффектов, их сопровождающих. Под аномальными эффектами будем понимать не только не известные, но и не используемые в существующих процессах физические и химические эффекты, реологические и структурные изменения в композициях дисперсий, особенности организации и проведения обработки материалов и т. д.

Физико-механические свойства перерабатываемых материалов оказывают решающее значение при выборе того или иного способа воздействия на них. Из всего многообразия свойств материалов выделим следующие: прочность, упругость, пластичность, хрупкость, твёрдость, ударная вязкость, абразивность. Причём для каждого конкретного материала необходимо выбирать наиболее характерное свойство или группу свойств.

Дадим обобщённую феноменологическую характеристику аномальных эффектов, которые сопровождают механические

процессы переработки веществ либо являются условиями, определяющими её протекание. В соответствии с этой оценкой все виды воздействий внешних полей на обрабатываемые материалы можно свести в следующие группы [211]:

- изменение энергетического состояния: энергии упругого деформирования, количества теплоты, магнитного потока и т. д.;
- изменение состояния дефектной структуры: уплотнение, разрушение, упрочнение, разуплотнение и др.;
- изменение фазового состояния: фазовые превращения, полиморфные переходы, плавление, испарение, адсорбция и смачивание и др.;
- изменение химического состояния: химическое разложение, диссоциация, гидролиз, электролиз, термолиз, окисление и др.;
- изменение реологического состояния системы: влажности, параметров внешнего воздействия, использование ПАВ и др.;
- изменение параметров трения и износа: внутреннее и внешнее трение в перерабатываемой среде, изменение температурного поля и др.

Внешние воздействующие поля-факторы обуславливают изменение свойств материала в динамике. Однако исходными причинами изменения свойств являются изменения первоначального строения, состояния или состава. Величина, направленность и интенсивность конечного изменения свойств среды зависят от того, к изменению каких внутренних факторов приводит то или другое внешнее воздействие.

Можно выделить следующие процессы, протекающие в результате приложения внешних физических или вещественных полей к обрабатываемым средам:

- изменение сил связей между отдельными частицами горной породы: упрочнение или разупрочнение;
- изменение агрегатного состояния вещественной фазы: переход от кристаллического к аморфному строению и наоборот;
- изменение агрегатного состояния вещественной фазы: плавление, кристаллизация, кипение;
- изменение состояния среды и отдельных ее элементов;
- химические изменения из-за протекающих химических реакций: окисление, восстановление, растворение, диссоциация, гидратация и т. д.

Следует различать непосредственное воздействие внешних полей на среду и последствие — остаточные эффекты изменений в ней после снятия внешнего поля. При этом либо полученный воздействием результат не сохраняется, т. е. снижается величина изменений по сравнению с прямым действием, происходит полный возврат в исходное состояние, либо проявляется прямо противоположный результат. Такое различие обусловлено характером прилагаемого поля, его интенсивностью, длительностью воздействия и особенностями среды.

Зафиксированный после снятия поля результат может быть либо стабильным и неизменным, либо продолжаться во времени, чаще всего в сторону восстановления исходного состояния. Каждое физическое поле или вещественная среда имеют свои определенные области воздействия.

Аномальные эффекты — это, прежде всего, способы управления совокупным процессом проведения различных технологий, решающие следующие основные задачи: изменение структуры вещества, управление реологической ситуацией, оптимизация движения обрабатываемой среды, требуемое температурное воздействие, создание нужного вещественного поля, снижение диссипативных потерь, совмещение различных стадий обработки в одном агрегате и т. д.

Представленные выше некоторые направления, позволяющие активизировать методическую базу создания нового технологического оборудования, могут быть использованы при выполнении поисковых и прогнозных работ, а также на всех стадиях проектирования машин, агрегатов и технологических комплексов. Эти подходы реально отвечают исходным условиям создания новых видов машин и оборудования, которые будут служить основой интенсификации рабочих процессов в аппаратах адаптивного действия.

### **2.3 Концептуальные положения выбора направлений развития технологических машин**

Объективная оценка технологической переработки материалов в промышленных масштабах необходима для анализа их объемов, структуры, резервов и источников сырья и материалов, уровня тех-

нологий, эффективности оборудования, производственных издержек, конкурентоспособности, перспектив развития и др.

Изложенный выше анализ состояния ряда промышленных технологий производства многих видов сырья и материалов убедительно показывает, что они не только очень затратны, но и крайне несовершенны. Естественно, что при этом возникает двойной риторический вопрос: «Чем обусловлено такое состояние и что делать?».

Основное внимание в ответе требует правильное понимание состояния проблемы. Его исходную основу составляет материаловедение, которое определяет алгоритм действий и включает в себя последовательность следующего приоритета: «сырье — технологии — базовое оборудование — технологический комплекс — производственная структура — готовый продукт». За этой простой с виду цепочкой функциональных операций кроется сложнейший механизм, требующий учета всех явлений и закономерностей.

Проблема усугубляется необычайно широким многообразием участвующих в переработке веществ, отличающихся своими свойствами, условиями обработки, степенью влияния на качество готового продукта [211; 217]. Характер обработки материалов определяет технологию проведения процессов и конструктивное исполнение оборудования. В итоге имеем сложнейшую систему, целостное описание которой аналитическими методами на современном этапе, к сожалению, невозможно.

Следствием перечисленных факторов является несовершенство большинства технологий, что выражается, прежде всего, в высокой энергоемкости. В сложившейся ситуации разобраться особенно сложно, так как отсутствует четкая иерархия между оборудованием и технологией, хотя по определению для большинства переделов конструкции и принцип действия машин и аппаратов должны определяться условиями технологий.

Правильный выбор направлений создания эффективных технологических машин может быть основан на базовых положениях разработанной нами энерготехнологической концепции устойчивого развития [211; 216; 217; 245]. Сущность этого подхода обусловлена необходимостью объективной оценки мирового рынка производства технологических машин для комплекс-

ной переработки сырья и материалов к ускоренной организации проектирования именно такого оборудования, которого у потенциальных потребителей не только нет на данный момент, но и не будет по уровню эффективности к началу его реального выпуска.

Весь парадокс сложившейся ситуации в области производства технологических машин заключается по многим их видам, особенно по дезинтеграторному оборудованию и тепловым агрегатам, именно в том, что это самое несовершенное по своему техническому уровню оборудование из того, что создано человечеством. Причин такого положения множество, они достаточно подробно рассмотрены в работах [211; 216; 217; 245], но первоочередной из них можно считать несоответствие реального вектора технологического развития его цивилизационным интересам. Следствие этого можно видеть в том, что «большая» наука обошла стороной эту сферу общественного производства.

Интенсивно прогрессирующие энергетическая, экологическая и экономическая угрозы жизнедеятельности людей в ближайшем будущем принудят нас искать реальные направления их снижения, что во многом будет зависеть от состояния технической базы переработки сырья и материалов. И если сегодня уровень материаловедения совершил значительный скачок в своём развитии, то базовый уровень оборудования за ним явно не успевает. Кроме того, монопольный эгоизм основных производителей средств производства явно не способствует прогрессу в этой области.

Наши собственные оценки показывают, что не учтенный ни в каких плановых или прогнозных показателях развития экономики только энергоресурсов потенциал за счет совершенствования оборудования и технологий, связанных с переработкой сырья и материалов, т. е. первичных переделов в промышленности составляет по крайней мере 20...30 % [211; 217]. Это реальный сектор действий для маневра в выборе конкретных направлений инновационного прорыва на основе мобилизационного развития новых направлений создания эффективных технологических машин.

Рассматриваемые в монографии аппараты адаптивного действия являются не только принципиально новыми видами оборудования, но по многим показателям соответствуют мировому

уровню и имеют определенный потенциал. Это дает нам определенную надежду на то, что некоторая часть из них найдет применение в технологических комплексах будущего.

## **2.4 Основы формирования технической базы проектирования технологических аппаратов адаптивного действия**

Структура большинства современных технологических комплексов такова, что осуществляемые в них процессы различны по своей природе, применяемому оборудованию и условиям проведения. Это вынуждает разработчиков оборудования искать дополнительные подходы к обоснованию поиска таких технических решений, которые бы обеспечивали существенное повышение эффективности их работы. Поставленные задачи невозможны без формирования специальной информационной базы и особенно актуальны для создания новых конструкций аппаратов адаптивного действия.

Основываясь на описанной методической базе, предлагаем разработанные авторами варианты новых конструкций агрегатов адаптивного действия для комплексной переработки материалов механическими способами. Эти конструкции не систематизированы с точки зрения функциональных признаков воздействия на обрабатываемые смеси, но выстроены по технологическому циклу осуществления целого ряда производств. Варианты выполнения некоторых видов технологических аппаратов адаптивного действия приведены на рисунке 2.1. Дадим краткую оценку каждой из представленных конструкций [117; 139; 148; 164; 182; 192; 195; 209; 213; 251].

**Схема 1.** 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.

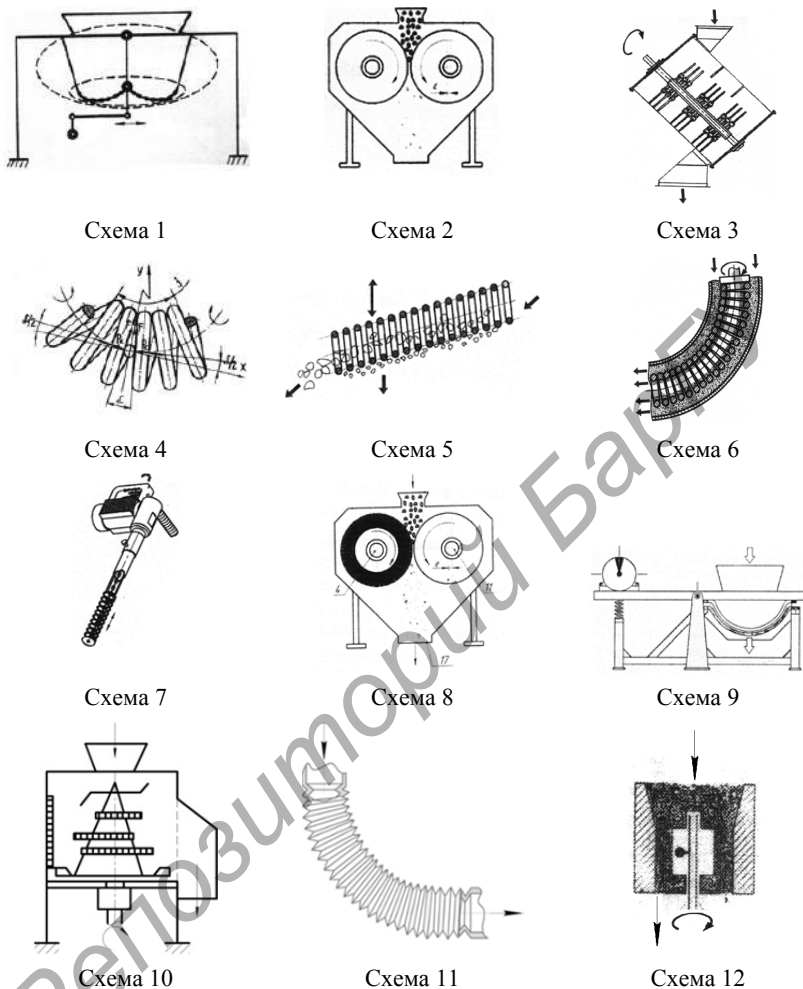


Рисунок 2.1 — Схема выполнения некоторых видов технологических аппаратов адаптивного действия

Основное назначение такой конструкции — использование в качестве агрегата для первичных стадий измельчения, сортировки и влагоудаления при переработке влажности материалов в крупнотоннажных производствах. Основная эффективность

такого агрегата обеспечивается способностью перерабатывать влажное сырье и заключается в снижении энергоемкости, улучшении условий эксплуатации и повышении качества обработанного материала.

**Схема 2.** 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 3.** Дробилка молотковая с управляемым движением обрабатываемого материала. Основной отличительной особенностью дробилки (кроме наклонного корпуса) следует считать расстановку ударных элементов по секционно 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. Это позволяет уравнивать интенсивность измельчения в рабочих зонах каждой секции. Итогом такого решения является повышение степени измельчения, улучшение селективности процесса разрушения частиц материала и снижение энергоёмкости работы дробильной установки.

**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. Пружинные мельницы отличаются чрезвычайно большим конструктивным многообразием.

**Схема 5.** 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. Агрегат способен работать на материале влажностью 3...8 % с эффективностью 85...96 %.

**Схема 6.** 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 7.** 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 8.** Иглофрезерный валковый измельчитель. 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 изменёнными и улучшенными свойствами, например, активировать композиции вяжущих веществ и осуществлять селективное измельчение по-

лезных ископаемых. Иголфрезерные агрегаты отличаются большим конструктивным разнообразием и основываются на использовании металлических щёток, которые в данном случае выполняют принципиально новые технологические функции.

**Схема 9.** Рессорно-стержневой 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 10.** 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 11.** 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 12.** Волоконная мельница. Основой такого оборудования являются наборы тончайших металлических волокон, образующих кольцевую зону измельчения, которая имеет возмож-

ность кинематического деформирования для взаимного перемещения волокон друг относительно 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.

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.

Руководствуясь методами аналогии феноменологического анализа в качестве базовых аппаратов адаптивного действия, для последующих исследований нами выбраны следующие: цепной агрегат, вибровалковый измельчитель, пружинные установки различного назначения, иглофрезерные измельчители, а также вибрационные грохоты и уплотнители. Дополнительно в материалах монографии нашли отражение и другие виды оборудования: дробилки ударного действия с управляемым движением обрабатываемого материала, измельчители с многолезвийными рабочими органами, рессорно-стержневые измельчители и пружинные питатели-дозаторы.

### **3 ЦЕПНЫЕ АГРЕГАТЫ ДЛЯ ПЕРВИЧНЫХ СТАДИЙ ПЕРЕРАБОТКИ СЫРЬЕВЫХ И НЕОДНОРОДНЫХ ПО СОСТАВУ И СВОЙСТВАМ МАТЕРИАЛОВ**

#### **3.1 Разработка конструкций цепных агрегатов и их анализ**

Первичная переработка влажных сырьевых материалов, таких как мел, глина, мергель, известняк и других схожих по свойствам материалов и обладающих повышенной природной влажностью, является важным этапом в технологическом процессе производства строительных материалов [211]. Технологические свойства рассматриваемых сырьевых материалов достаточно сложно учитывать в процессах, связанных с рыхлением, измельчением, сортировкой и удалением посторонних включений. Главные факторы, определяющие условия первичной переработки: размерная неопределенность, анизотропность, изменчивость реологического состояния среды, высокая адгезия и ряд других.

Структура большинства современных технологических комплексов такова, что осуществляемые в них процессы различны по многообразию применяемого оборудования и условиям проведения [211].

В настоящее время для переработки влажных сырьевых материалов применяется большое количество различных по конструкции агрегатов: глинорыхлители, глиноизмельчители, дырчатые вальцы, бегуны, роторные и молотковые дробилки, стругачи и другие измельчители [32; 138; 214].

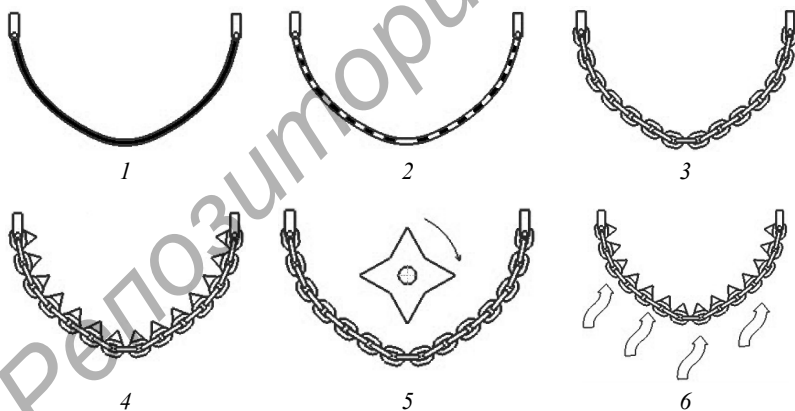
При анализе их работы, конструкций и опыта эксплуатации агрегатов можно выделить следующие недостатки: при влажности 16...18 % затруднена переработка влажного сырьевого материала, в конечном итоге снижается производительность; при попадании твердых недробимых включений происходит заклинивание и ускоренный износ рабочих органов, высокая энергоемкость процесса и относительно большие эксплуатационные затраты [214; 248].

С учетом объемов переработки влажных сырьевых материалов в масштабах Республики Беларусь (25...27 млн тонн в год [218])

используемое на соответствующих производствах оборудование для первичной переработки требует принципиально новых научно аргументированных разработок в области проектирования технологических агрегатов для этих целей [214].

Одним из возможных решений для переработки влажных сырьевых материалов является применение агрегатов с гибкими рабочими органами, которые одновременно могут выполнять функцию рабочей камеры и позволяют выполнить различные виды технологических операций или их совокупность (рисунок 3.1).

При работе с влажными налипающими материалами в первую очередь требуется устранить наслоения и забивания рабочих органов исходной сырьевой массой. Возможным вариантом является выполнение рабочей камеры в виде подвижного цепного полотна, состоящего из отрезков тяговой цепи, варианты которых представлены на рисунке 3.2.



1 — перемешивание; 2 — просеивание; 3 — просеивание и камнеудаление; 4 — измельчение и просеивание; 5 — дробление и просеивание; 6 — измельчение, влагоудаление, просеивание

Рисунок 3.1 — Возможные схемы исполнения технологических операций в аппаратах с гибкими рабочими органами



Рисунок 3.2 — Варианты тяговых цепей

Такое техническое решение исключает налипание материала и поломку рабочего оборудования за счет высокой степени подвижности элементов цепи, а также позволяет удалять из рабочей зоны крупные недробимые включения.

На этапе создания агрегатов с цепными рабочими органами важной задачей является правильный выбор кинематической схемы, что требует проведения анализа вариантов движения рабочих органов, которых в значительной степени будут определять технологические возможности создаваемого оборудования. Для целостного восприятия вариантов движения цепных элементов воспользуемся методами анализа, структуры и кинематических связей в механизмах, приводя их к условиям работы технологических агрегатов, составим в матричной форме возможные варианты движения цепных рабочих органов (рисунок 3.3).

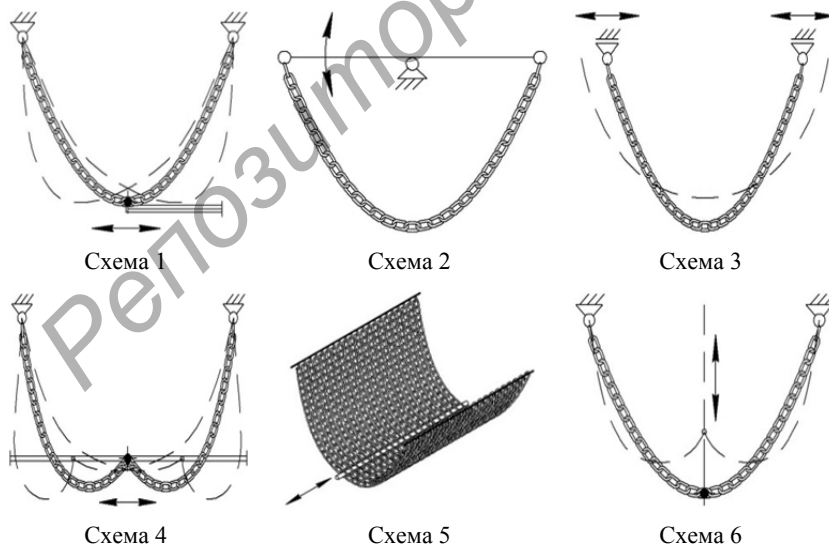


Рисунок 3.3 — Варианты движения цепных рабочих органов [214]

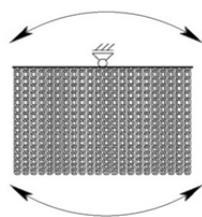


Схема 7

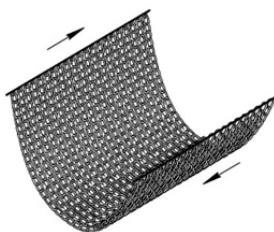


Схема 8

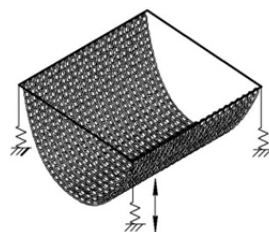


Схема 9

Окончание рисунка 3.3

**Схема 1** (см. рисунок 3.3). Привод цепного полотна через штангу в его нижней части с помощью кривошипно-шатунного механизма. Такое решение отличается простотой реализации и обеспечивает значительные перемещения рабочих элементов, что очень важно для переработки влажных сырьевых материалов. Верхний подвес цепного полотна позволяет проводить рабочий процесс в режиме маятника и создавать в обрабатываемой среде значительные динамические воздействия.

**Схема 2** (см. рисунок 3.3). Качательные движения бортов цепного полотна относительно центральной оси его подвеса. Это исполнение не позволяет создать значительное «вторжение» рабочих элементов в обрабатываемую среду, однако обеспечивает нужный характер движения для таких процессов, как грохочение и гранулирование.

**Схема 3** (см. рисунок 3.3). Точки подвеса цепного полотна совершают синхронные плоские перемещения друг относительно друга. В целом такой характер движения по своим «технологическим» характеристикам близок к схеме 2, поэтому ее можно использовать по аналогичному назначению.

**Схема 4** (см. рисунок 3.3). Отличается от схемы 1 тем, что перемещение штанги в центральной части цепного полотна осуществляется в направляющих. Этим обеспечивается образование двухкамерной рабочей зоны и, как следствие, повышение интенсивности обработки материала, правда, за счет усложнения конструкции. Данная схема может быть использована для переработки материалов повышенной влажности и с меньшими нагрузками на приводной механизм.

**Схема 5** (см. рисунок 3.3). Продольные периодические колебания цепного полотна с приводом на ее нижнюю часть. При гори-

зонтальной установке рабочего оборудования особых преимуществ не имеет, однако наклон цепного полотна превращает всю систему в своеобразный качающийся питатель, что в ряде случаев может оказаться положительным, например, при работе с нерудными материалами.

**Схема 6** (см. рисунок 3.3). Периодические перемещения в вертикальном направлении центральной части цепного полотна. По своей эффективности примерно соответствует схемам 2, 3, но подъем цепного полотна с загруженным на него материалом может энергетически быть достаточно затратным, что ограничивает область применения подобного технического решения.

**Схема 7** (см. рисунок 3.3). Периодические повороты концов цепного полотна относительно его подвеса на оси перпендикулярно образующей нижних точек провисания отрезков цепей. Такое решение вряд ли найдет практическое применение, так как интенсивность процесса низкая, в центральной части рабочей камеры обширная застойная зона, отсутствует управляемый характер движения материала.

**Схема 8** (см. рисунок 3.3). Периодически взаимные перемещения бортов подвеса цепного полотна параллельно друг другу. Характеризуется аналогично схеме 7 и практической значимости не имеет.

**Схема 9** (см. рисунок 3.3). Всей конструкции сообщаются вибрационные колебания. Использование агрегата подобным образом возможно только на зернистых средах, например, при грохочении материалов, а также в каких-то специальных условиях, например, при загрузке его мелющими телами.

Анализ рассматриваемых схем движения цепных рабочих органов позволяет сделать обобщающий вывод: для реального практического использования в наибольшей степени подходят схемы 1, 2, 4, которые отличаются простотой, обеспечивают достаточно интенсивное воздействие на обрабатываемый материал и позволяют с минимальными конструктивными изменениями провести их технологическое опробование [195].

В целях проведения технологического опробования был изготовлен цепной агрегат с вариантом движения рабочих органов, представленным на схеме 1 (см. рисунок 3.3), а также рассмотрены варианты выполнения агрегатов (рисунок 3.4), представленные в работах [127; 214]. Предшественником данной разработки является устройство для измельчения сыпучих материалов [249].

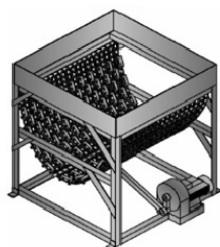


Схема 1

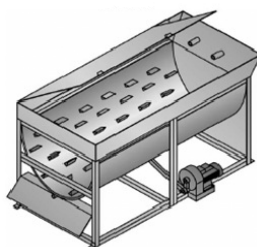


Схема 2

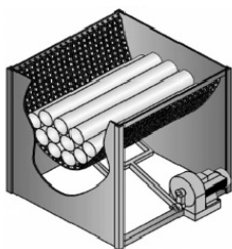


Схема 3

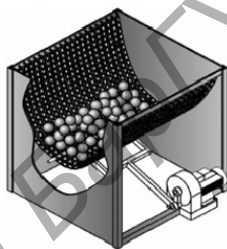


Схема 4

Рисунок 3.4 — Варианты выполнения цепных агрегатов [214]

В основу разрабатываемой конструкции положен принцип совмещения в одном агрегате нескольких технологических операций (измельчение, рыхление, сортировка и удаление посторонних включений), реализации адаптивных методов силового воздействия на обрабатываемые материалы.

Конструкция выполнена из набора цепных элементов, соединенных между собой и образующих рабочую камеру, нижняя часть которой осуществляет возвратно-поступательные перемещения за счет кривошипно-шатунного механизма. Основное назначение такой конструкции — использование в качестве агрегата для первичных стадий измельчения мела, мергеля, глины, трепела и других материалов в крупнотоннажных производствах. Основная эффективность цепного измельчителя обеспечивается способностью перерабатывать влажное сырье и заключается в снижении энергоемкости, улучшении условий эксплуатации и повышении качества обработанного материала.

*Измельчитель влажных материалов* (см. рисунок 3.4, схема 1). Для эффективной переработки широкой гаммы таких влажных сырьевых материалов, как мел, мергель, глина, трепел, торф, глинозем и многие другие, предлагается принципиально новый агрегат для их измельчения в составе основного массоподготовительного оборудования. Материал карьерной влажности подвергается интенсивному разрушению путем ударов, среза, истирания, мелких сколов и просыпается или продавливается через цепную завесу в виде мелкоизмельченного продукта. Крупные недробимые включения отсеиваются на цепной завесе и удаляются. Агрегат может работать на материалах с влажностью до 30 % и с любой исходной крупностью, соизмеримой с размерами приемного отверстия, при этом наличие материала в рабочей камере только способствует улучшению условий его разрушения и принудительного продавливания через элементы цепного полотна [214; 248].

*Гранулятор* (см. рисунок 3.4, схема 2). Для гранулирования материалов представлен агрегат с рабочим органом в виде гибкого полотна. В процессе гранулирования сырье интенсивно смешивается со связующими компонентами за счет постепенного их продвижения по гибкому полотну, совершающему постоянные перемещения, в сторону выгрузочного устройства. Гранулятор наилучшим образом работает при равномерной подаче сырья и связующего компонента, например, через специальные патрубки, так как большая масса сырья в рабочей камере затруднит процесс гранулирования ввиду того, что весь объем сырья не смешается со связующим компонентом за время прохождения в рабочей камере. В целях интенсификации процесса гранулирования на гибком полотне равномерно по всей поверхности закрепляют лопасти [59; 214].

*Устройство для селективного измельчения* (см. рисунок 3.4, схема 3) применяется для измельчения минерального сырья и может быть использовано для селективного дробления различных материалов малой и средней прочности, например известняка, калийной руды, цеолита, туфа, мрамора перед осуществлением их последующего обогащения, сушки или приготовления суспензий и смесевых композиций. Рабочий процесс осуществляется следующим образом. Материал, попадая в зону действия рабочего оборудования, имеющего большое число зон

активного воздействия и по меньшей мере один мелющий элемент, интенсивно измельчается за счет многочисленных ударов, истирания сколов и срезов, и когда размеры частиц достигают определенного размера, позволяющего им проходить между звеньями цепей, просыпаются между ними в виде готового для последующего использования продукта [214; 247].

*Механоактиватор для сырьевых смесей* (см. рисунок 3.4, схема 4). Для механоактивации твердых материалов можно использовать агрегат с цепным оборудованием, в котором в качестве измельчающих элементов применяется множество металлических шаров. Это, по сути, есть шаровая мельница с приводом от кинематических деформируемых стенок помольной камеры с достаточно интенсивным процессом измельчения. При работе механоактиватора происходит не только избирательное измельчение, но и образование новой поверхности на подавляющем большинстве частиц исходной сырьевой массы. Его технологическая область применения — механоактивация компонентов бетонной смеси по отдельной технологии производства [214].

В целях установления картины процессов, происходящих в измельчителе влажных материалов, была выполнена кинограмма (рисунок 3.5).

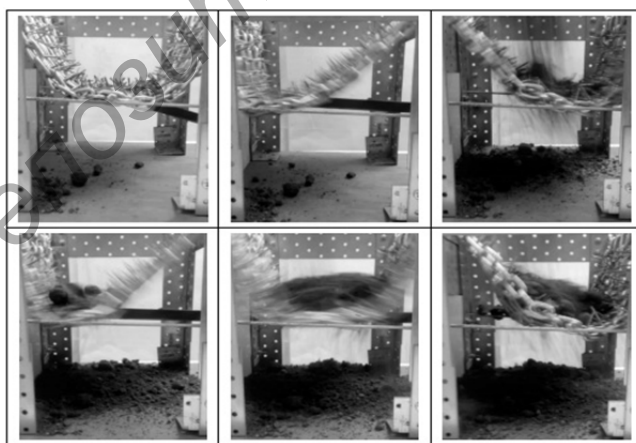


Рисунок 3.5 — Кинограмма процесса измельчения материала на опытном образце [214]



Окончание рисунка 3.5

Загруженный материал, находящийся на цепном полотне, приобретает пульсирующий характер движения, так как стремится к изменению своего положения попеременно в ту или другую сторону относительно равновесного состояния, как от силовых воздействий, так и за счет действующих на него инерционных сил.

Перемещение цепного полотна в крайнее левое положение придает скорость загруженному материалу, после чего цепное полотно меняет направление своего движения в крайнее правое положение. Движущийся в левую сторону материал сталкивается с цепным полотном, стремящимся в правое положение, тем самым происходят многократные удары, приводящие к измельчению кусков материала. Измельченные куски отделяются от основной массы загруженного материала и при их размерах меньше зазоров между звеньями цепи просыпаются через цепное полотно в виде готового для последующего использования продукта.

Проведем анализ движения рабочего органа цепного агрегата (рисунок 3.6).

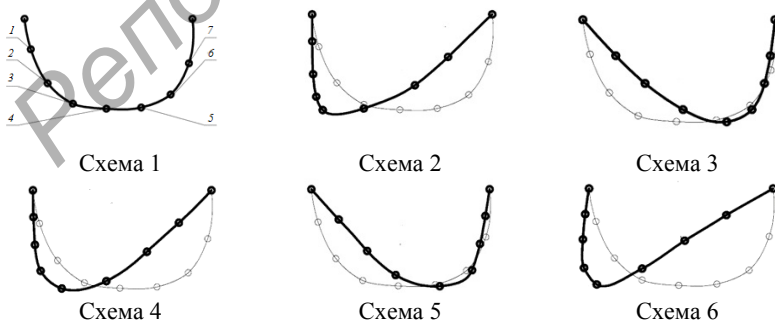
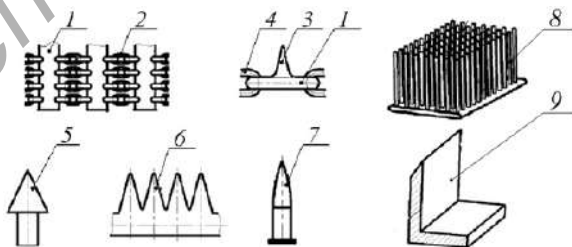


Рисунок 3.6 — Кинематическая схема движения рабочего органа цепного агрегата

Проанализировав кинематическую схему (см. рисунок 3.6), установили, что максимальное перемещение осуществляет точка 4 (штанга цепного полотна) и передает колебание другим участкам цепного полотна, но ее перемещение осуществляется только в горизонтальном направлении, и часть цепного полотна возле точки 4 не выполняет ударного воздействия на материал, что является неэффективным для разрушения перерабатываемого материала. В случае работы агрегата под «пригрузом» прохождение материала через цепное полотно будет обеспечиваться истирающим движением точки 4. Движения точек 2, 3, 5, 6 совершают максимальное перемещение в различных направлениях, что говорит о наибольшей степени разрушения материала в области данных точек, а также целесообразности расположения дополнительных интенсификаторов измельчения на цепном полотне в области точек 2, 3, 5, 6. Точки 1 и 7 выполняют наименьшее перемещение из всех точек провисающего цепного полотна, а участки цепного полотна возле данных точек имеют наименьшую зону контакта с загруженным материалом.

Для интенсификации рабочего процесса камера может оснащаться зубьями 5, гребенками 6, стержнями 7, металлическими щётками 8 и ножами 9, а также может быть размещен фрезерный рабочий орган [127; 214]. Применение подобных элементов способствует созданию раскалывающих, срезающих, истирающих и ударных напряжений в структуре исходного продукта.

Вариант одного из заявленных технических решений (рисунок 3.7) включает в себя цепной элемент 2, состоящий из звеньев 4, закрепленных на параллельных между собой планках 1, имеющих режущие ножи 3.



1 — планка; 2 — цепной элемент; 3 — нож; 4 — звено; 5 — зуб;  
6 — гребенка; 7 — стержень; 8 — металлическая щетка; 9 — нож

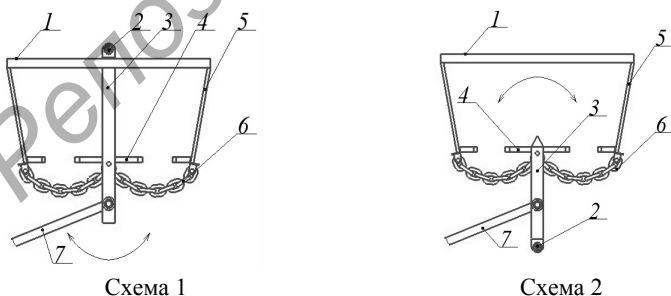
Рисунок 3.7 — Варианты интенсификаторов цепного полотна [116]

Каждый из интенсификаторов является необходимым технологическим инструментом для создания соответствующего вида обработки исходного материала, обеспечивая в итоге оптимальные условия переработки целевого продукта и максимальную эффективность технологического процесса.

Проведенные испытания, кинематический и структурный анализ конструкции цепных агрегатов показали [214], что они обладают целым рядом недостатков, к числу которых можно отнести: недостаточный уровень силового воздействия на обрабатываемые материалы из-за невозможности установки крупных зубьев и других интенсификаторов процесса, необходимых для разрушения крупного кускового материала; ограниченные размеры по ширине рабочей камеры, повышенные рабочие нагрузки на элементы конструкции, в частности, на кривошипно-шатунный механизм, а также наличие зон низкой интенсивности процесса в районе боковых стенок [173].

С учетом перечисленных недостатков была обоснована и реализована конструкция цепного агрегата с волновой рабочей камерой. Предлагаемая конструкция разработана на основе анализа большого числа технических решений цепных измельчителей, в необходимой степени учитывает весь цикл выполненных ранее поисковых исследований и отражает потенциальные возможности по переработке различных материалов [18; 59; 68; 127; 183; 195; 215; 247—249].

На рисунке 3.8 показаны варианты схем цепного агрегата с волновой рабочей камерой.



1 — рама; 2 — ось подвеса; 3 — маятниковый рычаг; 4 — толкатель;  
5 — гибкая стенка; 6 — цепное полотно; 7 — шатун

Рисунок 3.8 — Варианты схем цепного агрегата с волновой рабочей камерой [117]

Маятниковый рычаг 3, необходимый для создания волнового эффекта, можно закрепить с верхним и нижним подвесом (см. рисунок 3.8). При этом независимо от типа подвеса маятниковых рычагов, рабочий процесс цепных агрегатов осуществляется путем качающегося движения толкателя, который эти движения от кривошипно-шатунного механизма попеременно передает каждой из цепных волн, создающих сложные пространственные перемещения рабочих поверхностей и обеспечивающих определенный механизм воздействия на куски перерабатываемого материала.

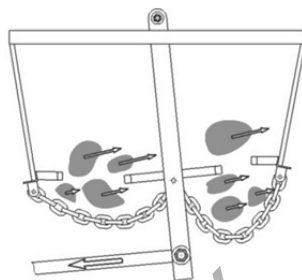


Рисунок 3.9 — Рабочий процесс цепного агрегата с волновой рабочей камерой

Рисунок, поясняющий рабочий процесс цепного агрегата с волновой рабочей камерой и верхним подвесом маятниковых рычагов представлен на рисунке 3.9.

В процессе работы агрегата материалу сообщается движение, которое направлено в идеальном случае в ту же сторону, что и движение рабочего оборудования. В крайних положениях происходит резкое изменение направления движения толкателя 4 (см. рисунок 3.8), и материал, которому ранее был сообщен импульс, соударяется с движущимися на встречу рабочими органами. Часть материала просеивается, оставшаяся часть продолжает движение в ту же сторону, что и рабочее оборудование, в дальнейшем цикл повторяется.

**Схема 1** (см. рисунок 3.8). Представлен вариант цепного агрегата с верхним подвесом маятниковых рычагов, который обладает отличительным преимуществом, заключающимся в простоте конструкции и удобстве обслуживания и ремонта рабочего оборудования. К недостаткам данной конструкции можно отнести то, что некоторый объем камеры занимают маятниковые рычаги, которые неэффективно взаимодействуют с перерабатываемым материалом, а с кинематической точки зрения толкатель совершает колебательные движения по дуге окружности, направленной вверх, стремясь перенести материал от центра к створке гибкой стенки, при этом просто отбивая его вверх.

**Схема 2** (см. рисунок 3.8). Представлен цепной агрегат с нижним подвесом маятниковых рычагов. К преимуществам данного варианта подвеса маятникового рычага можно отнести то, что он смонтирован снизу и не занимает объем в рабочей камере, не участвует в процессе переработки, а толкатель движется по дуге окружности, направленной вниз, при этом стремится перенести материал в сторону цепных завес, что благоприятно влияет на процесс переработки. Недостатком данной конструкции является некоторая сложность обслуживания и ремонта, неблагоприятные условия работы подвижных частей привода из-за попадания в зоны трения перерабатываемого материала.

Выбор того или иного варианта подвеса маятниковых рычагов будет зависеть от условий работы цепного агрегата, физико-механических свойств перерабатываемого материала, характера его загрузки (транспортёр, экскаватор и бункер), эффективности рабочего процесса и других условий.

На основании проведенного анализа существующих машин для переработки влажных сырьевых материалов можно констатировать, что конструкция цепного агрегата с волновой рабочей камерой имеет неоспоримую новизну и характеризуется большими функциональными возможностями.

### **3.2 Экспериментальные исследования процесса переработки материала**

Рабочий процесс цепного агрегата с верхним подвесом маятникового рычага исследован на экспериментальной лабораторной установке (рисунок 3.10, таблица 3.1) [141], где выявлена его высокая технологическая эффективность при переработке влажного мела и карьерной глины.



Рисунок 3.10 — Общий вид экспериментального цепного агрегата [141]

Установлены основные особенности рабочего процесса, заключающиеся в создании сложного объемного нагружения перерабатываемого материала, инерционного

Т а б л и ц а 3.1 — Техническая характеристика экспериментальной установки цепного агрегата

Наименование параметра	Значение
Размеры рабочей камеры в плане, мм	420 × 350
Максимальные размеры просеивающих отверстий цепного полотна, мм	20 × 25
Величина эксцентриситета приводного звена, мм	50 / 90 / 120
Мощность приводного электродвигателя, кВт	1,2
Частота вращения выходного вала, мин <sup>-1</sup>	60...620
Габаритные размеры агрегата, мм:	
длина	700
ширина	480
высота	600
Масса агрегата, кг	55

удаления целевой фракции через зазоры между звеньями цепи, образовании большого фронта рабочей поверхности, возможности работать под завалом и наличии хорошо разрыхляемой структуры, что позволяет в ряде технологий совмещать процесс измельчения и удаления влаги путем продувки рабочей камеры холодным или горячим газовым агентом.

Результаты исследований, проведенных на экспериментальной лабораторной установке, представлены на рисунке 3.11.

В качестве перерабатываемого материала была использована глина влажностью 18 %; варьируемые параметры: частота и амплитуда колебаний толкателя.

Из графических зависимостей видно (см. рисунок 3.11), что с ростом частоты и амплитуды колебаний толкателя производительность возрастает до определенного предела. Наибольшее значение производительности находится в пределах частоты колебаний толкателя от 4,0 до 7,5 с<sup>-1</sup>, дальнейшее увеличение частоты не приводит к увеличению производительности процесса, что в определенной степени является следствием зависания материала в рабочей камере.

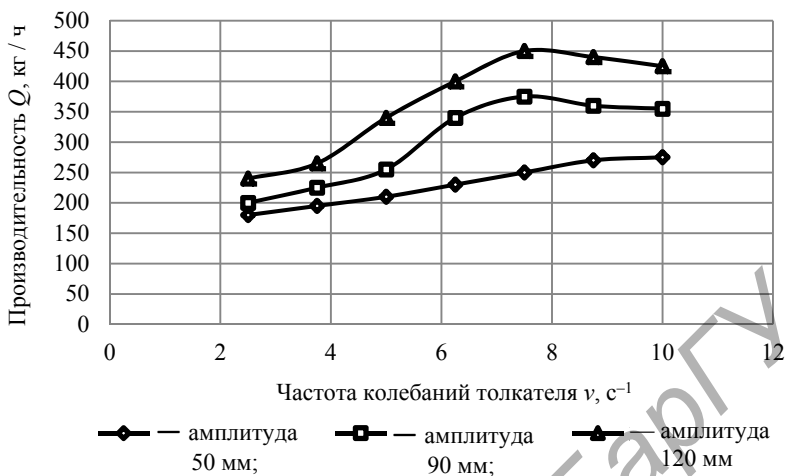


Рисунок 3.11 — Зависимость производительности от частоты колебаний толкателя [117]

Также был проведен эксперимент по определению потребляемой мощности в зависимости от влажности и вида перерабатываемого материала (рисунок 3.12).

Частота колебаний толкателя —  $6 \text{ с}^{-1}$ , амплитуда колебаний — 120 мм.

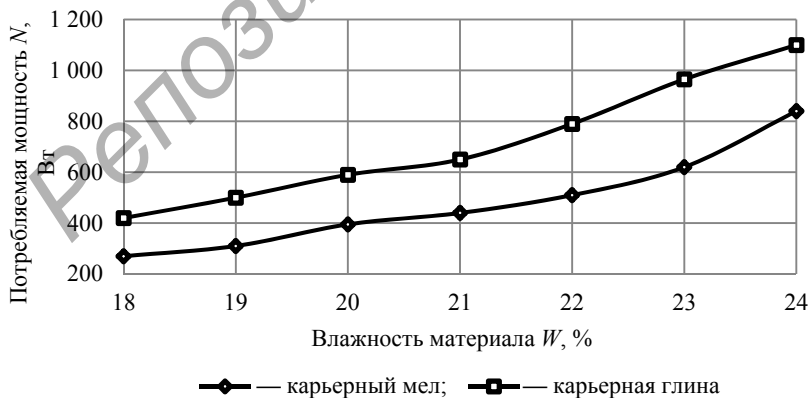


Рисунок 3.12 — Зависимость потребляемой мощности от влажности перерабатываемого материала

Как видно из представленных зависимостей (см. рисунок 3.12) с увеличением влажности перерабатываемого материала значительно возрастает потребляемая мощность.

Для проведения полномасштабных испытаний и изучения процессов переработки влажных сырьевых материалов в производственных условиях разработан и изготовлен опытно-промышленный образец. Его общий вид приведен на рисунке 3.13, рабочее оборудование — на рисунке 3.14, а техническая характеристика приведена в таблице 3.2.



Рисунок 3.13 — Опытно-промышленный образец [117]

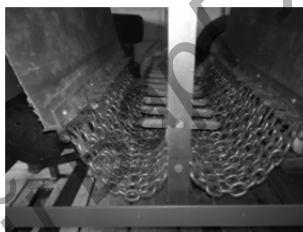


Рисунок 3.14 — Рабочее оборудование цепного агрегата

Т а б л и ц а 3.2 — Техническая характеристика опытно-промышленного образца цепного агрегата [183]

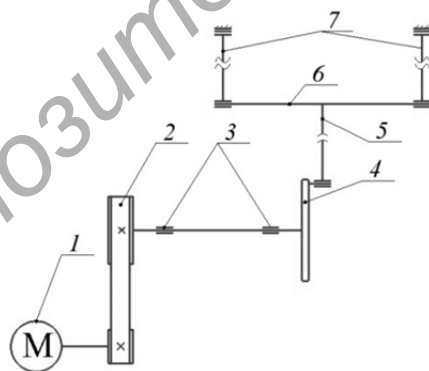
Наименование параметра	Значение
Размеры приемного отверстия в плане, мм	700 × 600
Максимальные размеры кусков исходного материала, мм	250
Размеры частиц измельченного материала, мм, менее	30
Мощность приводного электродвигателя, кВт	3,0
Частота вращения вала электродвигателя, мин <sup>-1</sup>	950
Частота двойных ходов шатунного механизма, мин <sup>-1</sup>	50...475
Рабочий ход приводной штанги, мм	90 / 130 / 170 / 210
Габаритные размеры, мм:	
длина	1 120
ширина	890
высота	1 250
Масса агрегата, кг	240

Конструкция выполнена с верхним подвесом маятниковых рычагов. В ней предусмотрено изменение частоты и амплитуды колебаний, а характер выполнения рабочего оборудования позволяет использовать его для измельчения, дробления, сортировки, камнеудаления и других процессов.

### 3.3 Выбор и определение основных параметров цепного агрегата с волновой рабочей камерой

Проектирование цепных агрегатов необходимо производить с выбором их основных параметров, к которым в первую очередь следует отнести геометрические, кинематические, энергосиловые и технологические. Определение конкретных значений этих параметров будем производить, руководствуясь ранее выполненными экспериментальными исследованиями, а также исходя из конструктивных соображений.

Кинематическая схема опытно-промышленного образца цепного агрегата с волновой рабочей камерой представлена на рисунке 3.15.



1 — электродвигатель; 2 — ременная передача; 3 — подшипниковые опоры; 4 — диск (с эксцентриситетом); 5 — шатун; 6 — толкатель; 7 — маятниковые рычаги

Рисунок 3.15 — Кинематическая схема цепного агрегата с волной рабочей камерой

Геометрические параметры рабочей камеры будут определять размеры механизма воздействия (соотношение длины шатуна  $L_{ш}$  и маятниковых рычагов  $L_{м}$ ), типоразмер цепей, их длину  $L_{ц}$  и ряд других геометрических параметров, которые в конечном итоге определяют габаритные размеры агрегата.

К кинематическим параметрам цепного агрегата относится частота и амплитуда колебаний толкателя  $b$  (см. рисунок 3.15), данные параметры будут определять силовые воздействия на материал.

Для расчета энергосиловых параметров цепного агрегата зададим исходные параметры: мощность электродвигателя  $N_1 = 3,0$  кВт; максимальная частота вращения вала электродвигателя  $n_1 = 950$  мин<sup>-1</sup>; передаточное отношение ременной передачи  $u = 2$ ; эксцентриситет:  $e = 0,045; 0,065; 0,085; 0,105$  м.

Рассчитаем мощность  $N_d$  и крутящий момент  $T_d$ , который создается на диске 4 (см. рисунок 3.15) [79]:  $N_d = N_1 \eta_{рем} \eta_{п}^2$ , где  $N_1$  — мощность электродвигателя, кВт;  $\eta_{рем}$  — КПД ременной передачи;  $\eta_{п}$  — КПД подшипникового узла.

$$T_d = \frac{3 \cdot 10^4 N_d}{\pi n_d}, \text{ где } n_d = n_1 / u \text{ — частота вращения диска, мин}^{-1}.$$

Для определения усилия  $F_{ш}$ , создаваемого вдоль оси шатуна, необходимо найти величину (рисунок 3.16) окружного усилия  $F_t$  по формуле [91]  $F_t = F'_t = \frac{T_d}{e}$ , где  $e$  — эксцентриситет, м.

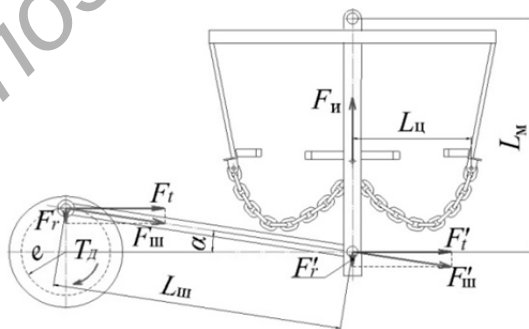


Рисунок 3.16 — Среднее положение механизма цепного агрегата с волновой рабочей камерой

Тогда усилие, создаваемое вдоль оси шатуна, определим по формуле (см. рисунок 3.16) [91]  $F_{ш} = F_{ш}' = \frac{F_t}{\cos \alpha}$ .

Радиальное усилие  $F_r'$  направлено вдоль оси маятникового рычага и не оказывает воздействие на материал, а создает нагрузку на подшипники его подвеса и определяется по следующей формуле (см. рисунок 3.16) [91]:  $F_r = F_r' = F_t \operatorname{tg} \alpha$ .

На основании вышеприведенных формул установим зависимость усилия  $F_{ш}$  от кинематических параметров агрегата (рисунок 3.17).

Анализируя график, представленный на рисунке 3.17, можно сделать вывод, что при увеличении частоты вращения диска  $n_d$  и эксцентриситета  $e$  усилие  $F_{ш}$ , создаваемое вдоль шатуна, значительно уменьшается при оборотах диска свыше  $95 \text{ мин}^{-1}$ , однако при больших частотах увеличивается сила инерции  $F_{и}$ , обусловленная движением рабочих органов обладающих относительно большой массой.

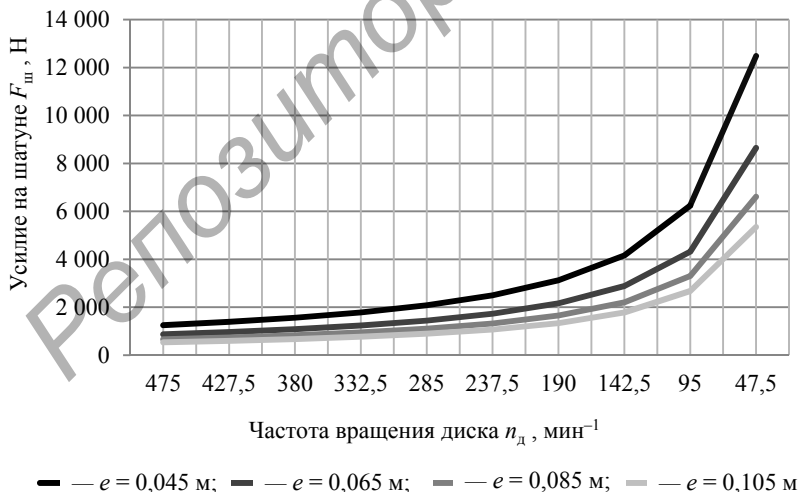


Рисунок 3.17 — Зависимость усилия  $F_{ш}$  от частоты вращения диска  $n_d$  и эксцентриситета  $e$

Значение силы инерции  $F_{и}$  изменяется по синусоидальному закону:  $F_{и} = -mA\omega^2 \sin(\omega t)$ , где  $m$  — масса рабочих органов, кг;  $A$  — амплитуда колебаний, равная эксцентриситету  $e$ , м;  $\omega = 2\pi\nu$  — циклическая частота, рад / с;  $t$  — время, с.

В крайних положениях, где скорость толкателя равна нулю, ускорение в этот момент времени достигает максимума и направлено по касательной дуге окружности к положению равновесия, т. е. сила инерции  $F_{и}$  противодействует усилию  $F_{ш}$ . В среднем положении, где скорость толкателя максимальна, ускорение направлено к центру радиуса дуги и инерционная сила  $F_{и}$  не оказывает никакого влияния. В промежуточных положениях сила инерции  $F_{и}$  направлена в ту же сторону, что и усилие на шатуне  $F_{ш}$ , соответственно, оказывает положительный эффект на разрушение перерабатываемого материала.

Графическая зависимость максимального значения силы инерции  $F_{и}$  от частоты колебаний толкателя  $\nu$  и эксцентриситета  $e$  представлена на рисунке 3.18.

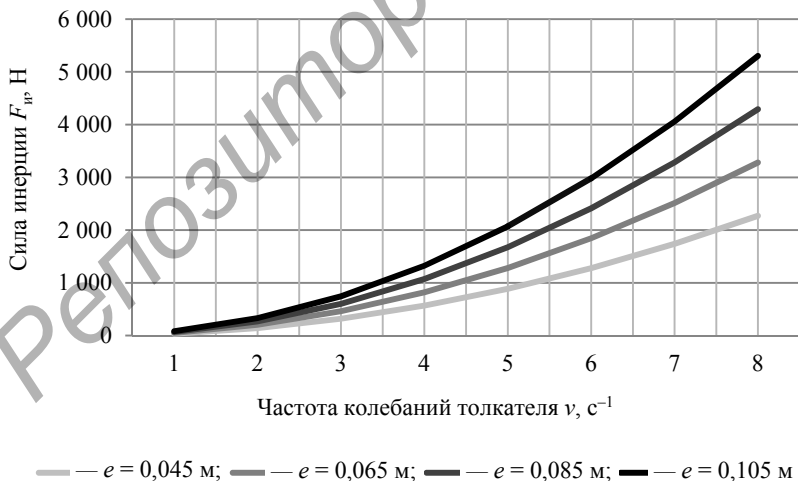


Рисунок 3.18 — Зависимость максимального значения силы инерции  $F_{и}$  от частоты колебаний толкателя  $\nu$  и эксцентриситета  $e$

Таким образом, увеличивая частоту колебаний толкателя  $\nu$  и эксцентриситет  $e$  до определенного предела, происходит снижение усилия, создаваемого на шатуне  $F_{ш}$ , однако при этом увеличиваются инерционные силы  $F_{и}$ , возникающие в результате интенсивных перемещений рабочих органов и материала. Согласно исследованиям (см. рисунок 3.17), это является основным фактором повышения эффективности процесса.

Совокупность геометрических, кинематических и энергосиловых параметров будет влиять на важнейший технологический параметр агрегата — производительность.

### 3.4 Методика определения производительности цепного агрегата

Методика определения производительности агрегата рассматривается как определение производительности просеивающей установки.

На производительность процесса влияют следующие основные факторы: физико-механические свойства и крупность исходного материала; влажность материала; размер и форма отверстий цепных завес; кинематические характеристики процесса (частота и амплитуда колебаний толкателя); плотность просеиваемого материала; равномерность распределения материала; степень разрыхленности материала.

Производительность цепного агрегата может быть определена по следующей формуле:  $Q = 3600F\nu\rho\mu k_1 k_2 k_3 k_4$ , где  $F$  — полезная площадь просеивающей поверхности (отверстий),  $m^2$ ;  $\nu$  — средняя скорость прохождения материала через отверстие цепного полотна,  $m/s$ ;  $\rho$  — плотность просеиваемого материала,  $kg/m^3$ ;  $\mu$  — коэффициент, учитывающий степень разрыхленности материала (для прочных материалов  $\mu = 0,2 \dots 0,3$ ; для влажных  $\mu = 0,4 \dots 0,6$ ) [115];  $k_1$  — коэффициент, учитывающий физико-механические свойства и крупность исходного материала;  $k_2$  — коэффициент, учитывающий влажность материала;  $k_3$  — коэффициент, учитывающий изменение полезной площади просеивающей поверхности;  $k_4$  — коэффициент равномерности распределения материала на просеивающей поверхности.

Коэффициенты  $k_1, k_2, k_3, k_4$  определяются опытным путем.

В выбранной методике определения производительности в первую очередь производится работой цепного агрегата как просеивающей установки. В частности, введение в расчет производительности скорости прохождения материала через цепное полотно обусловлено особенностью рабочего процесса, заключающегося в том, что поверхность цепного полотна с отверстиями (просветами) между звеньями цепей совершает интенсивные перемещения, сообщая обрабатываемой среде значительные ускорения в обратном относительно ее встречному движению направлению. Данная особенность конструкции рабочего оборудования агрегата повышает эффективность процесса.

### **3.5 Оценка области практического использования цепных агрегатов и основные направления развития**

Анализ проведенных исследований позволяет считать, что цепные агрегаты имеют следующие основные особенности:

- развитую поверхность с равномерно размещенными на ней рабочими элементами;
- повышенную степень свободы как отдельных рабочих элементов, так и рабочего оборудования в целом;
- создание наиболее эффективных механизмов динамического воздействия на обрабатываемые материалы;
- использование сил инерции и кинематики движения рабочих элементов для управляемого изменения реологических условий в рабочей камере;
- обеспечение своевременного удаления обработанного до нужной степени продукта из рабочей камеры;
- возможность переработки кусков материала критической влажности без ограничения по крупности материала;
- наличие в конструкции демфирующих элементов, выполняющих функции предохранительных устройств;
- возможность изготовления конструкции на простом станочном парке с максимальным использованием унифицированных узлов и элементов, в частности, цепей для рабочего оборудования;
- возможность замены нескольких технологических агрегатов и быть установленными в любом месте производственного про-

цесса, в том числе в карьере или на соответствующей высотной отметке заводского строения.

Перечисленные особенности цепных агрегатов позволяют обосновать выбор области их эффективного использования.

Высокая адаптационная способность цепного рабочего оборудования в первую очередь предопределяет целесообразность их использования для работы с влажными и налипающими материалами: глина, мергель, трепел, мел, мергель и т. д.

Рассмотрим возможность использования цепных агрегатов для стадий первичной переработки сырьевых карьерных материалов в технологиях производства строительных материалов.

Выполненные исследования цепных агрегатов позволяют предположить, что они способны перерабатывать рыхлые меловые породы и глиняную массу карьерной влажности [141].

В силу ряда особенностей карьерной глины и мела в частности наличия достаточно большого количества каменных включений, высокой адгезионной способности, её переработку в одном агрегате целесообразно начинать не в карьере, а в заводских условиях путем совмещения операций рыхления, камневыделения и грубого помола.

Кроме упрощения технологии мело- и глиноподготовки, что может быть выражено в уменьшении количества применяемого оборудования и снижении энергопотребления, основной эффект предполагается получить на стадии сушки, например, в барабанных сушилках за счет получения более однородного по зерновому составу продукта и придания ему большей рассыпчатости и подвижности. Этому в немалой степени будет способствовать тот факт, что цепные элементы имеют хорошую перетирающую способность, приводящую к образованию некоторой части пылевидной фракции в виде подушки на поверхностных слоях крупных кусков глины.

Значительные перспективы цепные агрегаты имеют для переработки твердых бытовых и промышленных отходов.

Проведя оценку возможной области использования цепных агрегатов, следует отметить, что кроме перечисленных приложений этот вид оборудования может найти применение в горнорудной промышленности, производстве удобрений, в сельском хозяйстве, в пищевой промышленности, в строительстве и дру-

гих сферах народного хозяйства. С учетом специфики конструкции рабочего процесса цепные агрегаты следует рассматривать как высокопроизводительные машины, предназначенные для проведения первичных стадий технологической переработки сырьевых материалов.

Цепные агрегаты могут быть использованы как в составе действующих технологических линий, так и для создания на их основе принципиально новых. В первом случае речь можно вести о простой замене одного вида оборудования на другое, во втором — о проектировании производственного комплекса с улучшенными технологическими показателями и эффективностью работы. Для успешного достижения этих целей требуется в первую очередь довести до технического и технологического совершенства конструкции собственно цепных агрегатов, что связано с решением целого ряда достаточно сложных задач:

1) совершенствование механизмов взаимодействия элементов рабочего оборудования с перерабатываемой средой. Здесь необходимо изучить основные закономерности поведения обрабатываемого материала в рабочей камере с учетом геометрического выполнения рабочего оборудования, характера и кинематических параметров, их движения и физико-механических свойств перерабатываемых материалов. Решение этой задачи требует задействования методов математического и физического моделирования и проведения экспериментов на реальном сырье с учетом всех возможных изменений его характеристик;

2) создание новых надежных, технологически эффективных и энергетически малозатратных конструкций. Задача такого плана может быть решена только на основе использования достижений в области механики машин, систем автоматизированного проектирования, применения износостойких и качественных материалов, максимальной унификации узлов и агрегатов, обеспечения модульного принципа выполнения конструкции, высокой ремонтпригодности и функциональной универсальности;

3) оптимизация технологического процесса работы цепных агрегатов, разработка методических рекомендаций по организации приемов и методов их обслуживания и ремонтов. Отработка параметров и режимов технологического процесса особенно важна для определения области рационального использования

цепных агрегатов и вхождения в конкретную среду производителей аналогичного оборудования. Также важно обеспечить для технического персонала не только комфортные условия обслуживания и ремонтов разрабатываемого оборудования, но и исключить всякого рода аварийные ситуации и сбои в работе;

4) оснащение цепных агрегатов дополнительными устройствами, системами контроля, управления и защиты. Современные технологические машины уже немыслимы без систем контроля их основных параметров и режимов работы, защиты от перегрузок и нарушения производственного процесса, предупреждения о состоянии рабочего процесса, управления качеством получаемого продукта, например, за счет изменения режимов работы. Это также должно способствовать синхронизации работы цепных агрегатов со смежным оборудованием: конвейерами, питателями, погрузчиками, экскаваторами, сушилками;

5) в качестве отдельной самостоятельной задачи необходимо выделить правильное расположение цепных агрегатов в уже существующие технологические комплексы. Это связано не только с их пространственной привязкой к другому оборудованию, но и функциональному вхождению в цепочку действующих машин без нарушения общего производственного цикла. Для этого цепные агрегаты заранее необходимо проектировать под условия модульной компоновки и хорошего доступа к его основным узлам и рабочему оборудованию;

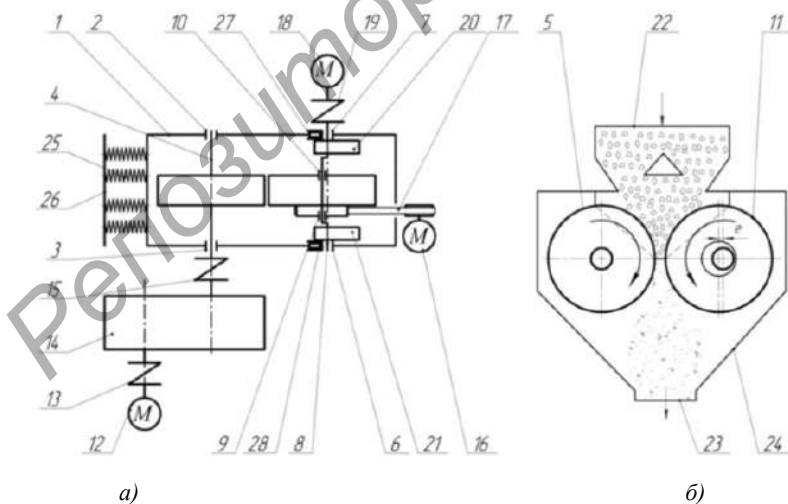
6) при создании принципиально новых технологических комплексов с использованием цепных агрегатов их проектирование необходимо вести по методу максимальной эффективности, используя передовые достижения науки в этой области: прикладную физико-химическую механику, технологическую вибротехнику, функционально-стоимостный анализ, теорию размерностей и подобия и др.

## 4 ВИБРОВАЛКОВЫЙ АГРЕГАТ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И МЕХАНОАКТИВАЦИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ ПРОДУКТОВ

### 4.1 Анализ конструкции и рабочий процесс вибровалкового измельчителя

*Особенности рабочего процесса.* На основании проведенного анализа классификаций, развития и совершенствования валковых мельниц разработана новая конструкция валковой мельницы с дополнительным вибрационным воздействием на измельчаемый материал. Сфера возможного применения вибрационной техники и технологии определяется теми возможностями вибраций, которые известны сегодня [5; 15].

Вибровалковый измельчитель (рисунок 4.1) [109] состоит из рамы 1, на которой в соответствующих опорах 2, 3 посредством цапф 4 смонтирован ведущий валок 5, а в опорах 6, 7 установлен эксцентриковый вал 8, опирающийся на опоры 9, 10 эксцентрикового валка 11.



а — вид сверху; б — вид сбоку

Рисунок 4.1 — Схема вибровалкового измельчителя

Привод ведущего вала 5 осуществляется от электродвигателя 12 через муфту 13, редуктор 14 и муфту 15, а ведомого вала — от электродвигателя 16 через ременную передачу 17. Вибрационное воздействие подается на эксцентриковый вал 8 с помощью электродвигателя 18 через муфту 19. На эксцентриковом валу 8 установлены противовесы 20 и 21 для уравновешивания системы. Для загрузки и выгрузки материала предусмотрены устройства, выполненные в виде люков 22, 23 в бункере 24. Эксцентриковый вал 8 устанавливается в опорах 6, 7, имеет эксцентриситет  $e$  относительно центральной оси эксцентрикового вала 11 [160; 229; 236].

Рабочий процесс вибровалкового измельчителя осуществляется следующим образом. Одновременно включаются электродвигатели 12, 16, 18 и приводят во вращение соответствующие элементы конструкции, причем ведущий валок 5 и эксцентриковый вал 11 вращаются навстречу друг другу. При этом эксцентриковый вал 8 через опоры 9, 10 сообщает подвижному валку 11 круговые колебания с амплитудой  $2e$ . Через загрузочный люк 22 в межвалковое пространство непрерывным потоком подается подлежащий обработке исходный материал и подвергается интенсивному разрушению путём воздействия на него сжимающего, сдвигового и вибрационного (ударного) усилия.

В процессе работы измельчителя ведущий валок 5 за счёт сил трения, возникающих в зоне контакта частиц материала с валком, и их захвата внешней поверхностью ведущего вала 5 и реактивного момента, создаваемого силами трения эксцентрикового вала 11, приводит к его вращению в противоположном направлении, что способствует захвату материала и его принудительному перемещению через межвалковое пространство. С помощью электродвигателя 16 и ременной передачи 17 можно регулировать частоту вращения эксцентрикового вала 11, меняя тем самым интенсивность сдвигового воздействия на материал. При попадании недробимого материала в межвалковое пространство ведущий валок 5 имеет возможность горизонтального смещения с помощью предохранительного устройства в виде системы пружин 25, упирающихся в плиту 26 рамы 1. Обработанный таким образом материал удаляется из рабочей зоны агрегата через выгрузной люк 23. Для изменения величины

межвалкового пространства предусмотрены регулировочные устройства 27 и 28.

Вибрационные воздействия, реализуемые в вибровалковом измельчителе, обладают рядом достоинств по сравнению с постоянными — используемыми в пресс-валковых агрегатах. Во-первых, это эффект облегчения преодоления сил трения. Этот эффект понимается как особое свойство вибраций уничтожать (хотя бы частично) силы трения, а также более равномерное распределение материала по длине валка. Во-вторых, это эффект выигрыша в силе, т. е. возможность преодоления сопротивления с меньшими усилиями при разрушении (деформации) исходного продукта [159; 235].

*Кинематический анализ рабочего процесса.* Анализ условий разрушения материалов показывает, что для достижения минимальных энергозатрат необходимо обеспечить рациональное сочетание раздавливающих, сдвиговых и вибрационных (ударных) воздействий на измельчаемый материал [134; 178; 231].

Такое сочетание может быть достигнуто при различных конструктивных и технологических вариантах схем:

1) при равных радиусах валков  $R_{\text{ВВ}} = R_{\text{ЭВ}} = R$  и различной частоте их вращения  $n_{\text{ВВ}} \neq n_{\text{ЭВ}}$ . При этом скорость ведущего валка  $v_{\text{ВВ}} = \omega_{\text{ВВ}} R_{\text{ВВ}} = 2\pi n_{\text{ВВ}} R_{\text{ВВ}} = \pi n_{\text{ВВ}} D$ , м / с; эксцентрикового валка  $v_{\text{ЭВ}} = \omega_{\text{ЭВ}} R_{\text{ЭВ}} = 2\pi n_{\text{ЭВ}} R_{\text{ЭВ}} = \pi n_{\text{ЭВ}} D$ , м / с;

2) при равной частоте вращения валков  $n_{\text{ВВ}} = n_{\text{ЭВ}} = n$  и различных радиусах валков  $R_{\text{ВВ}} \neq R_{\text{ЭВ}}$ . При этом скорости ведущего и эксцентрикового валков  $v_{\text{ВВ}} = 2\pi n_{\text{ВВ}} R_{\text{ВВ}} = \pi n_{\text{ВВ}} D$ , м / с;  $v_{\text{ЭВ}} = 2\pi n_{\text{ЭВ}} R_{\text{ЭВ}} = \pi n_{\text{ЭВ}} D$ , м / с, соответственно;

3) при равных радиусах валков  $R_{\text{ВВ}} = R_{\text{ЭВ}} = R$  и равной частоте их вращения  $n_{\text{ВВ}} = n_{\text{ЭВ}} = n$ , но при использовании эксцентрично установленных валков ( $e_{\text{ВВ}} = e_{\text{ЭВ}}$ ) и синхронизации их вращения.

Предлагаемый нами вариант (рисунок 4.2) с эксцентрично установленным валком ( $e_{\text{ВВ}} = 0$ ,  $e_{\text{ЭВ}} = e$ ).

При равных радиусах валков  $R_{\text{ВВ}} = R_{\text{ЭВ}} = R$  и различной частоте их вращения  $n_{\text{ВВ}} \neq n_{\text{ЭВ}}$ . При этом материал приобретает дополнительное вибрационное (ударное) воздействие.

При применении эксцентрично установленного валка осуществляется более надежный захват материала за счет изменения угла захвата, так же это позволяет создать раздавливающее-сдвиговое деформирование.



Моделировать соединение валка с осью  $O_2O_2$  электродвигателя  $M$  можно посредством коленчатого вала. Функцию кривошипа выполняет цилиндрический эксцентрик, жестко соединенный с осью  $O_2O_2$ . Его собственная ось симметрии  $CC$  сдвинута относительно оси ротора  $O_2O_2$  на расстояние  $e$ , называемое эксцентриситетом. Поскольку сечение валка, нормальное к оси  $O_2z$ , не изменяется вдоль этой оси, то пространственный объект будем описывать одним его сечением. Такое сечение валка и эксцентрика показано на рисунке 4.3, б.

Контакт валка и эксцентрика осуществляется через подшипники  $K$ , которые рассматриваются как внутренняя связь в системе. Внешней связью служат подшипники  $O_2$ , установленные на раме (корпусе) измельчителя. Механическая система «вал-эксцентрик—валонок» имеет две степени свободы. Для определения ее положения в абсолютной системе координат необходимо задавать две обобщенные координаты. Положение оси вала с эксцентриком будем определять углом  $\varphi_1$ , а валка относительно оси  $CC$  —  $\varphi_2$ . Описанная механическая система теоретически допускает три варианта движения: 1) круговое поступательное ( $\varphi_2 = 0$ ) движение, определяемое вращением эксцентрика; 2) составное поступательно-вращательное, при котором  $\varphi_2 \neq 0$ ; 3) вращательное движение вокруг оси  $O_2O_2$  ( $\varphi_2 = \varphi_1$ ).

Предложенный вариант с эксцентрично установленным одним валком, равным значением радиусов валков и различной частотой их вращения можно назвать сложной технической системой. Проведенный теоретический анализ движения валка, установленного на эксцентриковом валу, описывает кинематические параметры рабочего процесса, позволяет установить закономерности функционирования вибровалкового измельчителя. Полученные уравнения координаты точки валка позволят в дальнейшем исследовать скоростные параметры валков и материала, проходящего через межвалковое пространство.

*Анализ изменения угла захвата.* Для анализа угла захвата наиболее подходящей является методика расчета пресс-валковых агрегатов [37; 115], которые мы используем как основу для предварительного расчета разрабатываемой конструкции (рисунок 4.4).

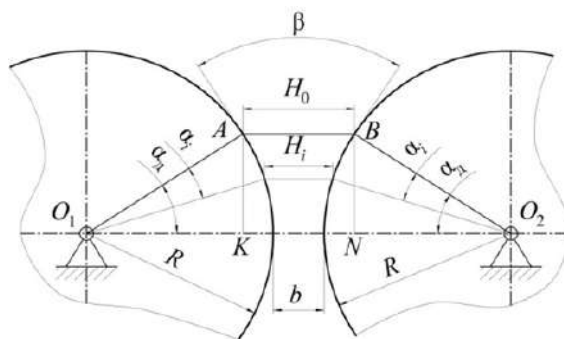


Рисунок 4.4 — Схема определения угловых параметров в валковом агрегате

Начало деформации материала ограничено углом захвата  $\alpha_d$  (углом деформации). Угол захвата в валковых агрегатах — это угол  $\beta$  между двумя касательными к поверхностям в точках соприкосновения с дробимым материалом. Кусок материала будет захватываться, если  $\beta \leq 2\varphi$  или  $\alpha_d \leq \varphi$ .

Для обеспечения нормального измельчения угол захвата не должен превышать двойного угла трения. По коэффициенту трения для реальных случаев  $f = 0,3 \dots 0,45$ , угол трения  $\varphi = 16^\circ 40' \dots 24^\circ 20'$ . Для практически гладких валков  $\alpha_d = 16^\circ \dots 24^\circ$ , чтобы исключить выдавливание дробимых кусков из валковой зоны.

Ввиду эксцентрично установленного одного из валков разрушение будет происходить при переменном значении радиуса эксцентричного валка и меняющемся значении межвалкового пространства [153—155; 160].

Изменение радиуса не только улучшает условия захвата материала в зоне подачи, реализует раздавливающе-сдвиговое деформирование частиц, но и разрушает «застойные зоны» подаваемого материала [36; 115].

Рассмотрим аналитические зависимости, определяющие основные угловые параметры валка, вращающегося вокруг своей оси, и эксцентрично установленного валка.

Для валковых агрегатов (см. рисунок 4.4) с постоянным значением межвалкового пространства  $b$  при одинаковом значении радиуса валков  $R_1 = R_2 = R$  при  $e_1 = 0$ ,  $e_2 = 0$  [115; 158] величина

толщины слоя в начале деформации определяется следующим образом:  $H_0 = 2R + b - 2R \cos \alpha_d = 2R(1 - \cos \alpha_d) + b$ .

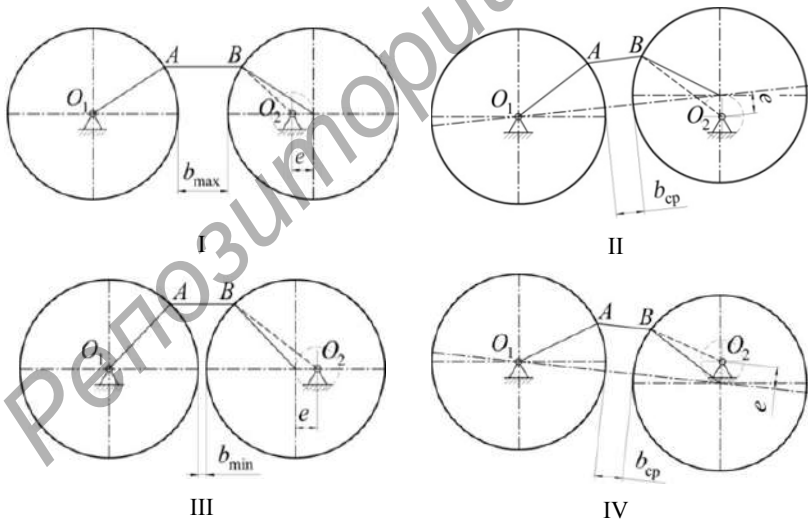
Отсюда после преобразований угол деформации:

$$\alpha_d = \arccos \left( 1 - \frac{H_0 - b}{2R} \right) = \arccos \left[ 1 - \frac{b(k_{\text{упл}} - 1)}{2R} \right],$$

где  $k_{\text{упл}}$  — коэффициент уплотнения материала,  $k_{\text{упл}} = H_0 / b$ .

Определение значения толщины слоя при продвижении к нейтральному углу  $\alpha_n$ :  $H_i = 2R + b - 2R \cos(\alpha_d - \alpha_i) = 2R[1 - \cos(\alpha_d - \alpha_i)] + b$ .

Для схемы, где один из валков установлен эксцентрично, необходимо провести кинематический анализ движения валка (рисунок 4.5).



I — при максимальном зазоре; II — при среднем зазоре;  
III — при минимальном зазоре; IV — при среднем зазоре

Рисунок 4.5 — Характерные положения валков в процессе движения

Определяющим параметром при эксцентрично установленном валке будет угол захвата  $\alpha_{д\text{ ср}}$  при среднем значении межвалкового пространства  $b_{\text{ср}} = b_{\text{min}} + e$ , так как наибольший промежуток времени за один цикл (оборот) зазор находится в этом положении.

Угол деформации можно определить из условия максимального куска, захватываемого валками:  $d_{\text{max}} = \frac{[D(1-k_3) + b]}{k_3}$ , где

$k_3$  — коэффициент захвата (для гладких валков  $k_3 = 0,954$ , для рифлёных  $k_3 = 0,92$ ) [115].

Рассмотрим положение II (см. рисунок 4.5) на рисунке 4.6. Положение IV рассчитывается аналогичным образом.

Для данного положения с учетом условия захвата получаем угол захвата:

$$\alpha_{д\text{ ср}} = \arccos \left( \frac{R + \frac{b_{\text{ср}}}{2}}{R + \frac{d_{\text{max}}}{2}} \right) = \arccos \left( \frac{2R + b_{\text{ср}}}{2R + d_{\text{max}}} \right)$$

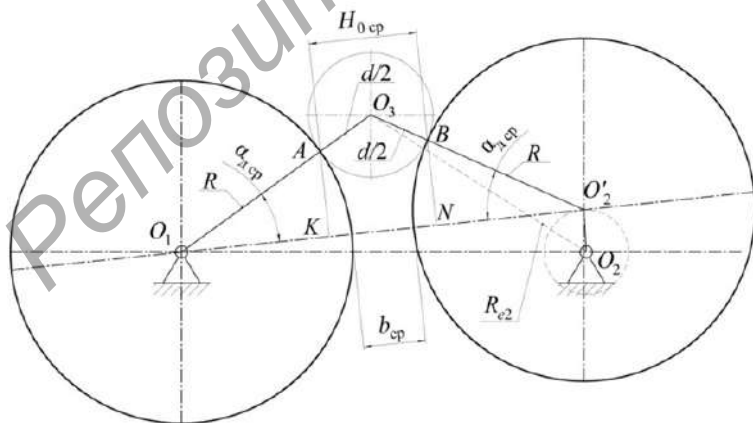


Рисунок 4.6 — Схема определения углов захвата в положении II

Для эксцентрично расположенного валка крайними будут положения максимального  $b_{\max}$  и минимального  $b_{\min}$  значений зазора, что соответствует схемам I и III (см. рисунок 4.5).

Проделав соответствующие преобразования, получаем:  
 – для максимального зазора  $b_{\max}$  (см. рисунок 4.5, I)

$$\alpha_{\text{д1min}} = \arccos\left(\frac{2R + b_{\text{cp}} + e}{2R + d_{\text{max}}}\right); \quad \alpha_{\text{д2min}} = \arctg\left(\frac{R \sin \alpha_{\text{д1min}}}{R \cos \alpha_{\text{д1min}} - e}\right);$$

– для минимального зазора  $b_{\min}$  (см. рисунок 4.5, III)

$$\alpha_{\text{д1max}} = \arccos\left(\frac{2R + b_{\text{cp}} - e}{2R + d_{\text{max}}}\right); \quad \alpha_{\text{д2max}} = \arctg\left(\frac{R \sin \alpha_{\text{д1max}}}{R \cos \alpha_{\text{д1max}} + e}\right).$$

Использование эксцентрично установленного валка позволяет получить возможность приложения к измельчаемым материалам помимо раздавливающего еще и сдвиговое деформирование, а постоянное вибрационное воздействие позволяет равномерно распределить материал по длине валка, тем самым увеличив проходимость материала через межвалковое пространство, производительность агрегата и, как следствие, обеспечит более равномерный износ рабочих поверхностей валков.

Проведенный теоретический расчет показывает изменение угла захвата материала от минимального значения до максимального в вибровалковом измельчителе. В свою очередь, величина угла захвата зависит от диаметра валков и величины эксцентриситета, максимального диаметра кусков материала, выбранного значения межвалкового пространства в среднем положении, которые определяют степень измельчения материала [154].

На рисунке 4.7 представлены графики изменения угла захвата на ведущем и эксцентриковом валках в зависимости от угла поворота эксцентрикового вала при различной величине эксцентриситета эксцентрикового вала ( $R = 120$  мм;  $d_{\text{max}} = 15,8$  мм;  $b_{\text{cp}} = 4$  мм).

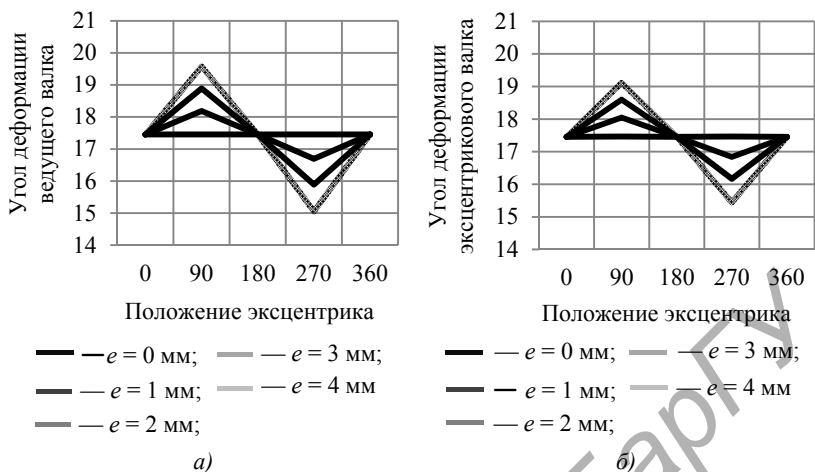


Рисунок 4.7 — График изменения угла захвата на ведущем (а) и эксцентриковом (б) валах при повороте эксцентрикового вала

На рисунке 4.8 представлены графики изменения угла захвата на ведущем и эксцентриковом валах в зависимости от угла поворота эксцентрикового вала при различной величине радиуса валков ( $e = 4$  мм;  $d_{\max} = 15,8$  мм;  $b_{\text{ср}} = 4$  мм).

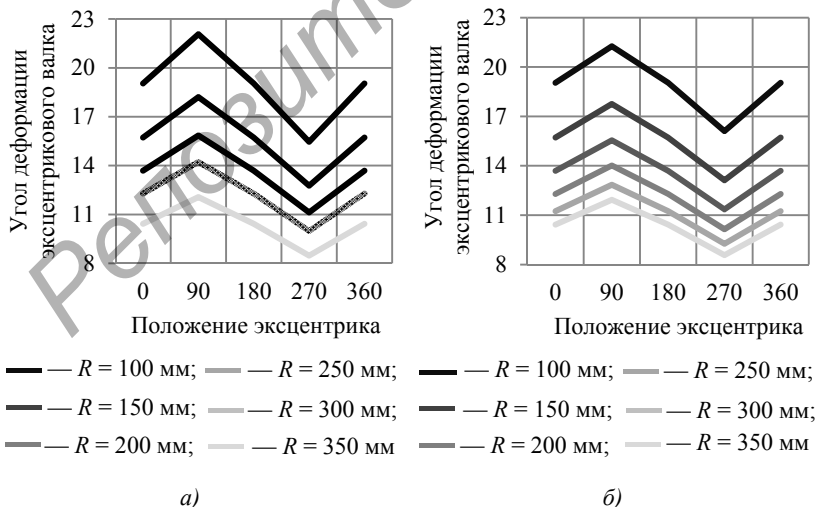


Рисунок 4.8 — График изменения угла захвата на ведущем (а) и эксцентриковом (б) валах при повороте эксцентрикового вала

Исследованный характер изменения углов захвата (деформации) свидетельствует о наличии сдвиговых деформаций при разрушении материала, что интенсифицирует процесс их измельчения. С увеличением величины эксцентриситета, особенно на валках небольшого диаметра, наблюдается изменение угла захвата. При увеличении радиуса валков влияние сдвиговых деформаций уменьшается.

#### 4.2 Методика расчета силовых характеристик

Процесс разделения исходного куска материала на отдельные части происходит, когда внешние механические силы превышают внутренние силы молекулярного взаимодействия. При этом процесс измельчения происходит с образованием новых поверхностей [61].

Согласно имеющимся в литературе данным [7; 66; 73; 88; 239; 257; 270], реальная прочность измельчаемых материалов на несколько порядков ниже теоретической прочности. Поверхностные слои материала являются потенциально возможными местами зарождения трещин.

Одной из важнейших характеристик, определяющих эффективность работы вибровалкового измельчителя, является сила воздействия валков на измельчаемый материал. Сила измельчения напрямую влияет на энергозатраты процесса измельчения и зависит от многих параметров.

Для того чтобы разрушить тело, его необходимо деформировать на такую величину, при которой в материале возникнет разрушающее напряжение. В вибровалковом измельчителе в материале возникают раздавливающе-сдвиговые и вибрационные (ударные) деформации.

На рисунке 4.9 схематично показан простой вариант валков, горизонтальные оси вращения которых  $O_1$ ,  $O_2$  совмещены с их геометрическими осями симметрии. Материал, подлежащий переработке, находится в бункере, расположенном над валками 1, 2. Валки вращаются в противоположные стороны с угловыми скоростями  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ . Измельчаемый материал под действием сил тяжести и сил сцепления с валками перемещается в пространство между валками, которое сужается к минимальному расстоянию  $b$ .

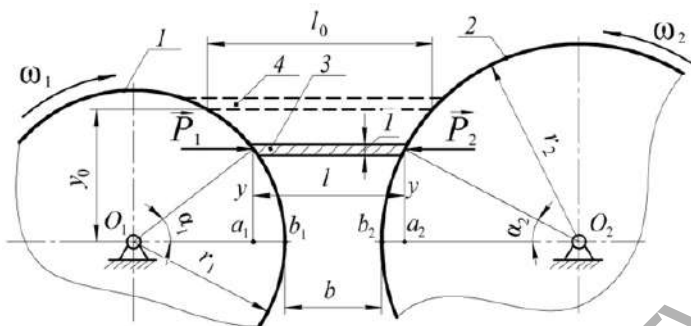


Рисунок 4.9 — Модель для анализа осесимметричных валков с материалом

*Определение сил взаимодействия материала с валками в симметричных агрегатах.* Для изучения сил взаимодействия выделим двумя горизонтальными плоскостями в пространстве между валками слой материала единичной толщины (см. рисунок 4.9) на расстоянии  $y$  от осевой линии  $O_1O_2$ . Поперечный размер слоя обозначим  $H_i$ . Будем учитывать, что величина  $H_i$  является функцией координаты  $y$ :  $H_i = H_i(y)$ . Продольный размер слоя  $B'$  примерно равен длине валков. Разделим слой в продольном направлении на  $B$  частей.

Одну из них размера  $H_i \times 1 \times 1$  будем дальше условно рассматривать как сжатый упругий элементарный слой 3, деформации которого подчиняются закону Гука.

Введем ряд предпосылок:

- элементарный слой представляет собой пространство, наполненное измельчаемым материалом;
- содержимый в слое материал нестабилен — материал может перемещаться вдоль своей оси;
- материал может работать только на сжатие.

На слой материала со стороны валков действуют силы, осевые составляющие которых обозначим через  $P_1$ ,  $P_2$ . Из условия равновесия элементарного слоя  $\sum X_i = 0$  устанавливаем:  $P_1 = P_2 = P(y) = P$ . Будем считать, что сила тяжести содержащегося над слоем материала и его силы сцепления с валками не влияют на величину силы продольного сжатия  $P$ , а только про-

двигают слой материала вниз. Часть пространства между валками, в рамках которой элементарный слой подвергается деформации и разрушению, будем называть активной. Активная зона (см. рисунок 4.9) сверху ограничена слоем 4 длиной  $H_0$  (показано пунктиром), снизу — отрезком  $b$  осевой линии  $O_1O_2$ .

Найдем длину  $H_i$  элементарного слоя в его произвольном положении 3 (см. рисунок 4.6):  $H_i = H_i(y) = a_1a_2 = b_1b_2 + a_1b_1 + a_2b_2 =$   
 $= b + R_1 + R_2 - \left( \sqrt{R_1^2 - y^2} + \sqrt{R_2^2 - y^2} \right).$

Далее для упрощения везде будем считать, что  $R_1 = R_2 = R$ . Тогда получим:

$$H_i = b + 2 \left( R - \sqrt{R^2 - y^2} \right). \quad (4.1)$$

Деформация стержня (сжатия) рассчитывается следующим образом:

$$\Delta H = H_0 - \left[ b + 2 \left( R - \sqrt{R^2 - y^2} \right) \right]. \quad (4.2)$$

Согласно закону Гука  $\Delta H = p H_0 / c$  откуда  $p = c \Delta H / H_0$ ; с учетом выражений (4.1), (4.2) определим:

$$p = c \left\{ \left[ \frac{H_0}{\left( a - 2\sqrt{R^2 - y^2} \right)} \right] - 1 \right\}, \quad (4.3)$$

где  $a = 2R + b = O_1O_2$ ; величины  $p$  и  $c$  измеряются в единицах силы, что приходится на единицу длины валка (Н / м).

По выражению (4.3) определяется интенсивность нагрузки (давления) на материал со стороны валка 2 (см. рисунок 4.9). Такое же по величине реактивное воздействие испытывает и валок. Приближенный график нагрузки представлен на рисунке 4.10.

Допустим, что при  $y=0$  интенсивность нагрузки  $p$  достигает разрушительного значения  $P_p$ . Тогда выражение (4.3) позволяет найти соответствующую величину жесткости  $c$ . В действительности при  $y=0$  по формуле  $P_p = c[(H_0/b) - 1]$ , откуда  $c = P_p / [(H_0/b) - 1]$ .

Находим равнодействующую  $P$  распределенной нагрузки  $p$  в пределах активной зоны:  $P = \int_0^{y_0} Bpdy$  или

$$P = cB \int_0^{y_0} \left\{ \left[ \frac{H_0}{(a - 2\sqrt{R^2 - y^2})} \right] - 1 \right\} dy.$$

*Определение сил взаимодействия в вибровалковом измельчителе.* Рассмотрим конструкцию, в которой правый валок 2 выполняет сложное движение. Его ось симметрии  $CC$  шарнирно закреплена на перекладине эксцентрикового вала, который представляет прямоугольную рамку, вращающуюся вокруг неподвижной оси  $O_2O_2$  (рисунок 4.11).

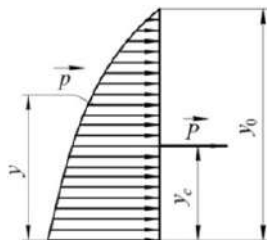


Рисунок 4.10 — Приближенный график давления на материал

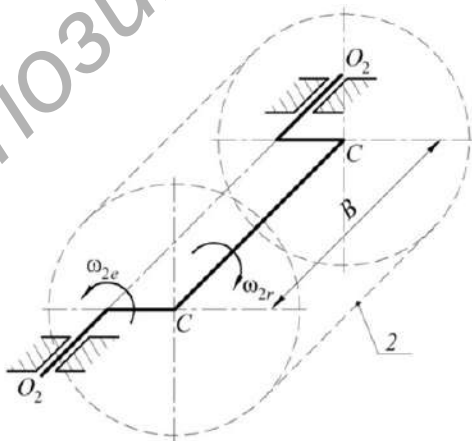


Рисунок 4.11 — Схема эксцентрикового вала

Величину сдвига оси валка (его эксцентриситет) обозначаем  $e$  (см. рисунок 4.11), этот размер многократно увеличен. Свободно закрепленный на перекладине  $CC$  валок имеет две степени свободы. Поэтому его абсолютный угол поворота  $\varphi_2$  определяется суммой двух углов:  $\varphi_2 = \varphi_{2e} + \varphi_{2r}$ , где  $\varphi_{2e}$  — угол поворота валка вместе с эксцентриковым валом в переносном движении вокруг оси  $O_2O_2$ ;  $\varphi_{2r}$  — его поворот в относительном движении вокруг подвижной оси  $CC$ .

Соответствующие угловые скорости эксцентрика обозначим  $\omega_{2e}$ ,  $\omega_{2r}$ . При отсутствии дополнительного привода к валку 2 величина  $\omega_{2r}$  неопределенная.

Остановимся далее на варианте, при котором  $\omega_{2r} = -\omega_{2e}$ ; эксцентрик в этом случае выполняет поступательно-криволинейное движение. Каждая его точка описывает окружность радиусом  $e$ . Весь валок совершает гармонические колебания (вибрации) вдоль осей координат с амплитудой  $e$ . Измельчаемый материал будем, как и прежде, моделировать совокупностью горизонтальных элементарных слоев. Поэтому далее нас будут интересовать только горизонтальные вибрации эксцентрика, способные сжимать слои. Если исходное положение эксцентрика во введенной системе координат принять согласно рисунку 4.12, то его уравнение движения вдоль оси  $O_2x$  определяется по формуле

$$x = e \sin \varphi_e, \quad (4.4)$$

где  $\varphi_e = \omega t$ ,  $\omega = \omega_{2e}$ .

Упрощенная модель поступательных колебаний (4.4) эксцентрика показана на рисунке 4.13.

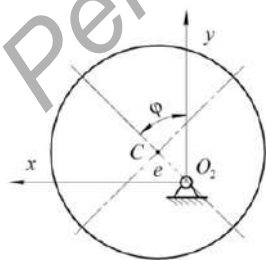


Рисунок 4.12 — Исходное положение эксцентрикового валка

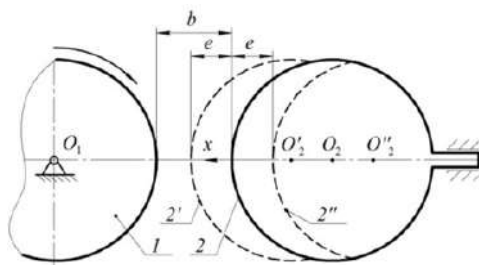


Рисунок 4.13 — Упрощенная модель поступательного движения эксцентрика

В процессе колебаний валок из положения 2 перемещается на расстояние  $e$  в крайнее левое положение 2', крайнее правое 2''. Перемещение эксцентрика из положения 2'' в 2', в ходе которого материал сжимается и разрушается, представляет собой его рабочий ход. Обратное перемещение валка из положения 2' в 2'' назовем холостым ходом. Заметим, что во время холостого хода силовое напряжение слоев уменьшается. В верхней части активного пространства оно может изменяться до нулевого значения с потерей контакта между валком и материалом. Восстанавливаться контакт будет при рабочем ходе с эффектом удара, который требует дополнительного исследования.

Силовое взаимодействие валка с материалом будем описывать двумя системами сил: силами упругости, возникающими в результате сокращения модельных слоев согласно закону Гука, и силами, вызванными вибрацией валка (силами инерции). Причин сокращений слоев две: прохождение материала в активном пространстве между валками и перемещение эксцентрикового валка влево из положения 2 в 2' (см. рисунок 4.13) на расстояние  $e$ . Силовые взаимодействия для первого варианта описаны выражениями (4.5), (4.6) и (4.7). При этом в вибровалковом измельчителе с эксцентриковым правым валком активным пространством следует считать поверхность валка в положении 2 (см. рисунок 4.13).

$$P = cB \left\{ H_0 \left[ a' \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{k}{b}} \tau'_1 \right) - \operatorname{arctg} \tau'_1 - (a' - 1) \frac{\pi}{2} \right] - y_0 \right\}, \quad (4.5)$$

$$\text{где } k = 4R + b, \quad a' = \frac{a}{\sqrt{kb}}, \quad \tau'_1 = \frac{(R + \sqrt{R^2 - y_0^2})}{y_0}.$$

Статический момент  $S$  нагрузки  $p$  относительно оси валка  $O_2$ , подставив пределы  $(0, y_0)$ , определяем по формуле

$$S = c \left\{ \frac{H_0}{2} \left\{ x_0 + \frac{a}{2} [\ln(a - 2x_0)] \right\} - \frac{y_0^2}{2} - \frac{c}{2} \left\{ H_0 \left[ R + \frac{a}{2} (\ln b) \right] \right\} \right\}. \quad (4.6)$$

Координату  $y_c$  определяем по формуле

$$y_c = \frac{S}{P}. \quad (4.7)$$

При вычислении сил упругости, соответствующих деформации  $\Delta H = e$ , приближенно считаем процесс нагружения слоя статичным. Тогда в соответствии с законом Гука для каждого слоя длиной  $H_i$  получим:  $p'H_i/c = e$ , где  $p'$  — элементарная сила взаимодействия вала с материалом.

Равнодействующую силу  $p'$ , приложенную к материалу, определим по формуле  $P' = ceB \int_0^{y_0} dy / H_i$ .

В этом выражении ширина активного пространства  $H_i$  определяется выражением (4.1). В результате получаем:

$$P' = ceB \left[ a' \arctg \left( \sqrt{\frac{k}{b}} \right) \tau_1' - \arctg \tau_1' - (a' - 1) \pi / 2 \right].$$

В данном выражении сохранены все обозначения, принятые выше в выражении (4.5). Реакцию материала, также равную  $P'$ , можно представить с помощью рисунка 4.10. По аналогии с выводом выражения (4.6) находим статический момент нагрузки  $p'$  относительно центра  $O_2$ . Окончательно получим:

$$S' = ceB \left\{ \frac{\left\{ x_0 + a \left[ \ln(a - 2x_0) \right] / 2 \right\}}{2} - \frac{\left[ R + a(\ln b) / 2 \right]}{2} \right\}.$$

Положение линии действия реакции  $P'$  находим по выражению, аналогичному (4.7).

*Определение сил инерции.* Согласно [48; 259] силы инерции возникают во время движения материальных объектов с ускорением. В нашей задаче материальным объектом является измельчаемый материал, моделируемый совокупностью элементарных слоев. Длину слоя в его произвольном положении на рисунке 4.14 обозначим  $H_i$ .

Считаем, что массы слоев  $m_H$  не зависят от их уровня в активном пространстве, заданном координатой  $y$ , и находятся как для недеформированного слоя в его верхнем положении  $y = y_0$ :  $m_H = m_0 = \gamma_0 H_0$ , где  $\gamma_0$  — насыпная плотность материала.

Допускаем, что при горизонтальном силовом воздействии эксцентриком масса слоя перемещается поступательно, как и сам валок. В таком случае его массу можно моделировать одним или несколькими материальными точками, а их силы инерции высчитывать по формуле вида  $f_i = ma$ , где  $m$  — масса материальной точки;  $a$  — его ускорение.

Определим по выражению (4.4) максимальную силу инерции, которая имеет место при максимальном ускорении материала и эксцентрика:  $a = \ddot{x} = -e\omega^2 \sin \omega t$ , где при  $\omega t = \pi / 2$  получаем  $|a| = |a_{\max}| = e\omega^2$ .

Следовательно, максимальное ускорение  $a_{\max}$  для эксцентрика — в положении 2'. Массу слоя для этого положения будем представлять двумя материальными точками с массами  $m_e = (m_H / H_i)e$  и  $m_{H'} = (m_H / H_i)H'$ , где  $m_e$  и  $m_{H'}$  — массы участков слоя материала длиной  $e$  и  $H'$  соответственно; при этом  $e + H' = H_i$ .

Первая материальная точка соприкасается с валком и в его положении 2' достигает значения  $a_{\max}$ . Массу участка  $H'$  считаем равномерно распределенной по его длине, тогда его центр масс находится посередине отрезка  $H'$ . Также допускаем, что ускорение материала в пределах этого отрезка гаснет по линейному закону от  $a_{\max}$  к нулю (см. рисунок 4.14). Тогда центру масс участка  $H'$  — второй материальной точки — будет соответствовать ускорение  $a_{\max} / 2$ .

Таким образом, расчетная (максимальная) сила инерции, действующая на элементарный слой, определяется выражением  $f_i = m_e a_{\max} + m_{H'} a_{\max} / 2$ .

Подставляем значения слагаемых и получаем:  $f_i = (1 + e / H_i) f_{ci}$ , где  $f_{ci} = m_H a_{\max} / 2 = \text{const}$ .

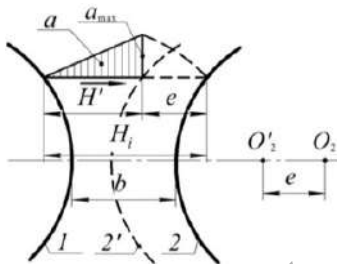


Рисунок 4.14 — График ускорения в положении 2'

Равнодействующую  $F_i$  элементарных сил инерции для всего активного пространства определим по формуле  $F_i = \int_0^{y_0} B f_i dy$  или

$$F_i = f_{ci} B \int_0^{y_0} \left[ 1 + \frac{e}{\left( a - 2\sqrt{R^2 - y^2} \right)} \right] dy. \quad (4.8)$$

Для определения статического момента сил инерции относительно центра  $O_2$  используется формула

$$S_i = f_{ci} B \int_0^{y_0} \left[ y + \frac{ey}{\left( a - 2\sqrt{R^2 - y^2} \right)} \right] dy. \quad (4.9)$$

Повторив в выражениях (4.8), (4.9) методику интегрирования, получим:

$$F_i = f_{ci} B \left\{ e \left[ a' \arctg \left( \sqrt{\frac{k}{b}} \tau_1' \right) - \arctg \tau_1' - (a' - 1) \pi / 2 \right] + y_0 \right\}, \quad (4.10)$$

$$S_i = f_{ci} B \left\{ e \left\{ x_0 + a \left[ \ln(a - 2x_0) \right] / 2 \right\} / 2 + y_0^2 / 2 \right\} - f_{ci} B \left\{ e \left[ R + a(\ln b) / 2 \right] / 2 \right\}. \quad (4.11)$$

В выражениях (4.10), (4.11) сохранены обозначения, введенные ранее. Положение линии действия силы  $F_i$  находим, как и выше, по формуле  $y_c = S_i / F_i$ .

Как видим, расчетные значения трех силовых факторов имеют место в одной фазе движения эксцентрика, поэтому их воздействия на материал и эксцентрик суммируются. При этом расчетная схема виброролкового измельчителя (см. рисунок 4.13) дополняется силами  $P'$  и  $F_i$ .

Представлено силовое взаимодействие в механической системе для случая, когда  $\omega_{2r} = -\omega_{2e}$ , другие соотношения между угловыми скоростями в приближенной теории на результат не влияют.

Разработанная методика силового анализа в вибровалковом измельчителе практически может использоваться с различной эффективностью в зависимости от механических и структурных характеристик измельчаемого материала, а также от геометрических  $e$ ,  $b$ ,  $R$ , кинематических параметров  $\omega$  и других факторов. Для уточнения приближенной методики нужно, прежде всего, отказаться от использования здесь закона Гука и перейти к нелинейной зависимости между силами и деформациями. При вычислении сил инерции сделать попытку более точного представления массы модельного элемента и закона затухания ускорений, а силу  $P'$  находить с учетом динамичности нагружения.

Согласно проведенному теоретическому исследованию, график зависимости изменения контактного напряжения при продвижении материала через рабочее пространство представлен на рисунке 4.15.

Наращение усилия зависит от выбора конструктивных и технологических параметров вибровалкового измельчителя, в частности, величины эксцентриситета и частоты вращения эксцентрикового вала.

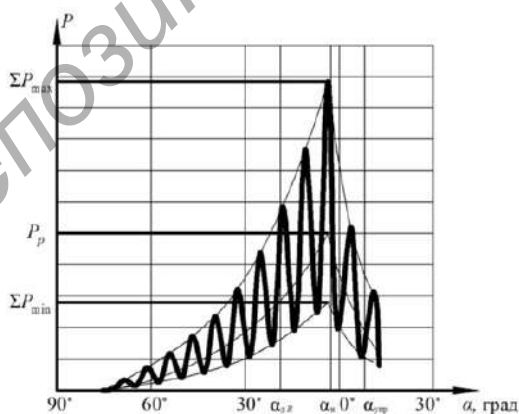
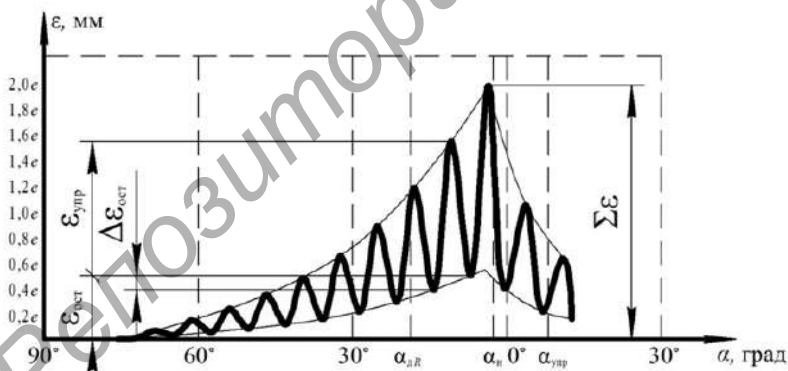


Рисунок 4.15 — Изменение суммарного усилия на материал

График, отображающий изменение остаточных деформаций измельчаемого материала за время контакта с эксцентриковым валком, представлен на рисунке 4.16).

Согласно проведенному теоретическому анализу, можно сказать, что с каждым силовым импульсом эксцентрикового вала происходит значительное увеличение суммарного усилия (см. рисунок 4.15), а также прирост остаточной деформации (см. рисунок 4.16). Полная деформация от вибрационного воздействия состоит из упругой и остаточной составляющих деформаций. Прирост остаточной составляющей деформации приводит к увеличению коэффициента уплотнения и служит показателем эффективности процесса деформирования.

Таким образом, совмещение вибрационного и вращательного движения вала вибровалкового измельчителя позволяет увеличить усилие, приходящееся на измельчаемый материал, что интенсифицирует его движение и способствует увеличению производительности измельчителя и степени измельчения материала [61].



$\Sigma \epsilon$  — полная деформация, мм;  $\epsilon_{упр}$  — упругая деформация, мм;  $\epsilon_{ост}$  — остаточная деформация, мм;  $\Delta \epsilon_{ост}$  — прирост остаточных деформаций материала после каждого силового импульса эксцентрикового вала, мм

Рисунок 4.16 — Изменение деформации материала за время контакта эксцентрикового вала с деформируемым материалом

### 4.3 Методика расчета мощности привода

Одной из важнейших характеристик как вибровалкового измельчителя, так и любых машин является энергия, затрачиваемая на процесс дезинтеграции материалов. Замер потребляемой мощности проводится параллельно при проведении всех опытов при исследовании технологических параметров процесса измельчения.

Анализ литературы [21; 150; 222] показывает, что многие исследователи отмечают при дезинтеграции материалов протекание ряда процессов с потреблением значительной мощности. Физико-механические свойства материалов оказывают существенное влияние на расход энергии.

Расход энергии идет не только на дезинтеграцию материала в виде образования новых поверхностей, но и на пластические и упругие деформации материала, образование дефектов, внешнее трение и т. д. Учет всех этих факторов в теоретических расчетах делает задачу чрезвычайно сложной из-за большого числа неизвестных параметров.

В связи с этим более приемлемыми являются простые зависимости на основании основных статей расходов в вибровалковом измельчителе.

Мощность привода вибровалкового измельчителя, затрачиваемую на дезинтеграцию материалов, можно определить согласно выражению [135; 232; 234]

$$N_{\text{вви}} = \frac{N_{\text{изм1}} + N_{\text{изм2}} + N_{\text{виб}} + N_{\text{тр}}}{\eta},$$

где  $N_{\text{изм1}}$  — мощность, затрачиваемая на создание раздавливающе-сдвиговых деформаций материалов ведущим валком, Вт;

$N_{\text{изм2}}$  — мощность, затрачиваемая на создание раздавливающе-сдвиговых деформаций эксцентриковым валком, Вт;

$N_{\text{виб}}$  — мощность, затрачиваемая на привод эксцентрикового вала с противовесами, Вт;

$N_{\text{тр}}$  — мощность, необходимая на преодоление сил трения в подшипниковых узлах валков, Вт.

Мощность  $N_{\text{изм1}}$ , затрачиваемая на создание раздавливающе-сдвигового воздействия на ведущем валке, зависит от крутящего момен-

та  $M_{кр1}$ , который определяется по формуле  $M_{кр1} = P_p (Bl_H) \cos \alpha_H R$ , где  $l_H$  — часть дуги в зоне нейтрального угла, м.

Длина дуги определяется по формуле  $l_H = R \alpha_H$ , где  $\alpha_H$  — нейтральный угол, рад.

Тогда значение крутящего момента  $M_{кр1}$  можно представить в виде  $M_{кр1} = P_p BR^2 \alpha_H \cos \alpha_H$ .

Следовательно, мощность на ведущем валке  $N_{изм1} = M_{кр1} \omega_{вв}$ .

Аналогичным образом рассчитывается мощность на эксцентриковом валке  $N_{изм2}$ :  $N_{изм2} = M_{кр2} \omega_{эв}$ .

Значение крутящего момента  $M_{кр2} = P_p BR_{e2}^2 \alpha_H \cos \alpha_H$ , где  $R_{e2}$  — значения радиуса эксцентрикового валка при максимальном усилии в положении, соответствующем минимальному зазору  $b_{\min}$  ( $R_{e2} = R + e$ ), м.

Мощность, затрачиваемая на привод эксцентрикового вала с противовесами,  $N_{виб}$ :  $N_{виб} = N_{кол} + N_{раз} + N_{тр. эв}$ , где  $N_{кол}$  — мощность, необходимая для сообщения измельчаемому материалу вибраций, Вт;  $N_{раз}$  — мощность, необходимая для разгона эксцентрикового валка с противовесами, Вт;  $N_{тр. эв}$  — мощность, необходимая на преодоление сил трения в опорах, Вт.

Мощность на сообщения измельчаемому материалу вибраций определяется по формуле [85]  $N_{кол} = \frac{e^2 \omega_{эк}^2 \rho_0 \mu}{2} k_{зап} k_{деф}$ ,

где  $\mu$  — коэффициент, учитывающий степень разрыхленности материала (для прочных материалов  $\mu = 0,2 \dots 0,3$ ; для влажных  $\mu = 0,4 \dots 0,6$ );  $k_{деф}$  — коэффициент, учитывающий дефекты кристаллической решетки измельчаемого материала,  $k_{деф} = 0,1 \dots 0,3$  [22; 40; 222].

Мощность, необходимую для разгона эксцентрикового валка с противовесами, рассчитывают по формуле  $N_{раз} = \frac{J \omega_{эк}^2}{75t} = \frac{m e \omega_{эк}^2}{75t}$ , где  $J$  — момент инерции, м<sup>4</sup>;  $t$  — время разгона эксцентрикового валка с противовесами,  $t = 2$  с [85].

Мощность, необходимую на преодоление трения в цапфах, рассчитывают по формуле  $N_{тр. эв} = f_{п. эв} P_{виб} r_{п} \omega_{эк}$ , где  $f_{п. эв}$  — при-

веденный коэффициент трения подшипников,  $f_{п.эв} = 0,001$ ;  $r_{п}$  — радиус цапфы вала, м.

Мощность  $N_{тр}$ , необходимая на преодоление сил трения в подшипниковых узлах валков, зависит от момента трения  $M_{тр}$  в опорах валков:  $M_{тр1} = P_{рез1} f_{п} r_{п1}$  и  $M_{тр2} = P_{рез2} f_{п} r_{п2}$ , где  $P_{рез1}$  и  $P_{рез2}$  — результирующая сила от максимального усилия  $P_P$  и силы тяжести валков  $G_{вв}$  и  $G_{эв}$ , Н;  $f_{п}$  — приведенный коэффициент трения подшипников,  $f_{п} = 0,001$ ;  $r_{п1}$  и  $r_{п2}$  — радиусы цапф валов, м.

Результирующая сила  $P_{рез}$  определяется по формуле  $\vec{P}_{рез1} = \vec{P}_P + \vec{G}_{вв}$  и  $\vec{P}_{рез2} = \vec{P}_P + \vec{G}_{эв}$ .

Тогда мощность  $N_{тр}$ , необходимая на преодоление сил трения в подшипниковых узлах валков, рассчитывается по формуле  $N_{тр} = N_{тр1} + N_{тр2} = f_{п} r_{п1} \omega_{вв} (\vec{P}_P + \vec{G}_{вв}) + f_{п} r_{п2} \omega_{эв} (\vec{P}_P + \vec{G}_{эв})$ .

В качестве примера рассчитаем потребляемую мощность вибровалкового измельчителя при следующих исходных данных:  $D = 0,24$  м;  $B = 0,05$  м;  $e = 0,002$  м;  $n_{вв} = 2,0$  с<sup>-1</sup>;  $n_{эв} = n_{вв} k_v$ ;  $n_{эк} = 21,17$  с<sup>-1</sup>;  $f_{п.эв} = 0,001$ ;  $f_{п} = 0,001$ ;  $r_{п} = 0,025$  м;  $r_{п1} = 0,02$  м;  $r_{п2} = 0,025$  м;  $\alpha_{д.ср} = 10^\circ = 0,174$  рад;  $\alpha_{н} = 4^\circ = 0,07$  рад;  $k_v = 1$ .

Для расчета рассмотрим материалы с различной структурой и физико-механическими свойствами (таблица 4.1).

Построим график потребляемой мощности от величины коэффициента соотношения частот вращения валков  $k_v$  для различных материалов (рисунок 4.17).

Т а б л и ц а 4.1 — Физико-механические характеристики исследуемых материалов

Материал	Плотность $\rho_0$ , кг / м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии $\sigma_{сж}$ , МПа	Степень разрыхленности $\mu$
Доломит	2 400...2 600	40...50	0,4
Сильвинитовая руда	1 950...2 100	50...80	0,2
Известняк	1 400...1 450	15...20	0,5

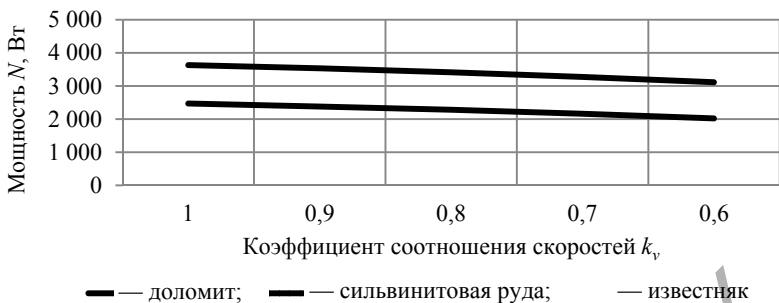


Рисунок 4.17 — Зависимость влияния величины коэффициента  $k_v$  на потребляемую мощность

Анализ зависимости показывает, что создание сдвигового деформирования за счет коэффициента соотношения скоростей вращения уменьшает потребляемую мощность привода.

Одним из определяющих параметров потребляемой мощности привода является частота колебаний и амплитуда (величина эксцентриситета) вибрационного вала. Построим график зависимости мощности от частоты вращения эксцентрикового вала вибровалка для различных материалов (рисунок 4.18).

Аналогично построим график зависимости мощности от величины эксцентриситета  $e$  для различных материалов (рисунок 4.19).

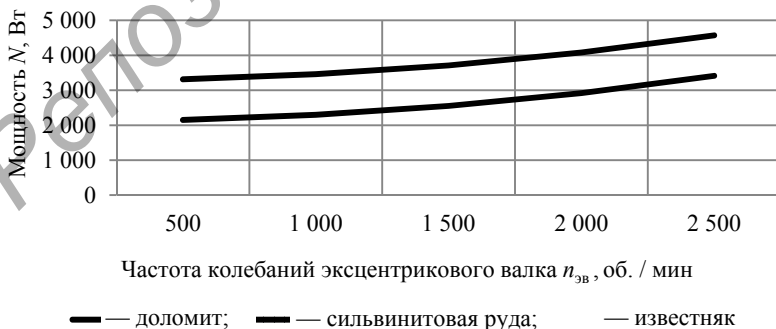


Рисунок 4.18 — Зависимость влияния частоты вращения эксцентрикового вала  $n_{эв}$  на потребляемую мощность

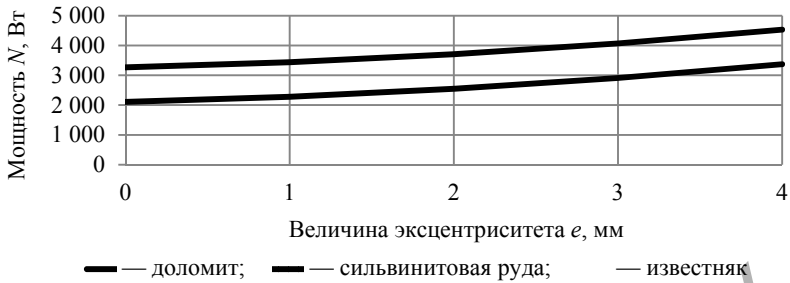


Рисунок 4.19 — Зависимость влияния величины эксцентриситета на потребляемую мощность

Анализ графических зависимостей (см. рисунки 4.17—4.19) показывает, что варьирование параметрами вибровалкового измельчителя позволяет изменять потребляемую мощность привода, так изменение коэффициента соотношения скоростей вращения снижает потребляемую мощность до 20 %, а частота колебаний эксцентрикового вала и величина эксцентриситета увеличивают на 30 %.

Однако совместное влияние всех представленных параметров на потребляемую мощность нуждается в экспериментальном подтверждении и является актуальной задачей.

#### 4.4 Методика расчета производительности

Для создания раздавливающего и сдвигового воздействия определено, что валки должны вращаться с разной частотой. Помимо этого необходимо учесть ряд других факторов.

Согласно [228], производительность вибровалкового измельчителя зависит от следующих показателей (рисунок 4.20):

$$Q = B b_{\text{ср}} v_{\text{вв}} k_v \mu k_{\text{упл}} k_{\text{пр}} \rho_0 k_{\text{внб}} k_e, \quad (4.12)$$

где  $v_{\text{вв}}$  — окружная скорость вращения ведущего вала, м / с;  
 $k_v$  — коэффициент соотношения частот вращения ( $k_v = 0,85 \dots 1,0$ );

- $k_{\text{упл}}$  — коэффициент уплотнения шихты;  
 $k_{\text{пр}}$  — коэффициент проскальзывания шихты (для гладких валков  $k_{\text{пр}} = 0,6 \dots 0,8$ ) [115];  
 $\rho_0$  — насыпная плотность материала, кг / м<sup>3</sup>;  
 $k_{\text{виб}}$  — коэффициент скорости вращения эксцентрикового вала ( $k_{\text{виб}} = 1,0 \dots 1,25$ );  
 $k_e$  — коэффициент величины эксцентриситета ( $k_e = 1,0 \dots 1,15$ ).

Коэффициенты соотношения частот вращения, скорости вращения эксцентрикового вала, величины эксцентриситета определяются в результате поисковых экспериментов [223; 225—227].

Скорость вращения валков

$$v_{\text{вв}} = \pi D n_{\text{вв}}, \quad (4.13)$$

где  $n_{\text{вв}}$  — скорость вращения ведущего валка, об. / мин.

Коэффициент уплотнения шихты определяется так:

$$k_{\text{упл}} = \frac{H_{0 \text{ ср}}}{b_{\text{ср}}} = \frac{2R(1 - \cos \alpha_{\text{д ср}}) + b_{\text{ср}}}{b_{\text{ср}}} = \frac{D(1 - \cos \alpha_{\text{д ср}})}{b_{\text{ср}}} + 1. \quad (4.14)$$

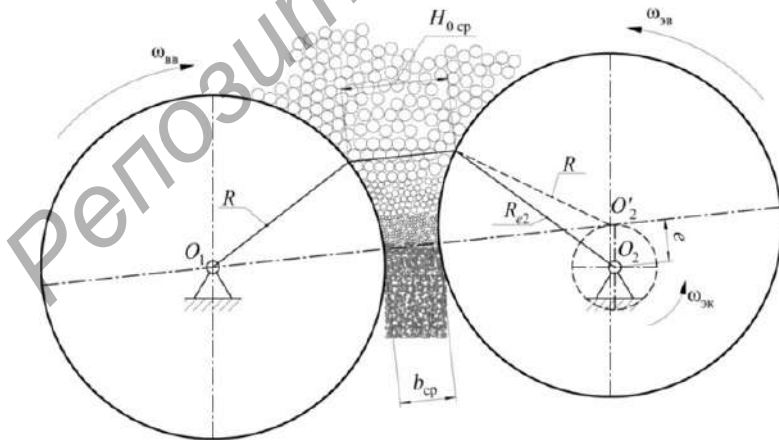


Рисунок 4.20 — Схема определения производительности вибровалкового измельчителя

С учетом приведенных выражений (4.13) и (4.14) выражение (4.12) принимает следующий вид:

$$Q = B b_{\text{cp}} \pi D n_{\text{вв}} k_v \mu k_{\text{пр}} \rho_0 k_{\text{виб}} k_e \left[ \frac{D(1 - \cos \alpha_{\text{д cp}})}{b_{\text{cp}}} + 1 \right]. \quad (4.15)$$

Анализ данного выражения (4.15) показывает, что производительность процесса измельчения вибровалкового измельчителя с эксцентрично установленным валком зависит от конструктивных параметров измельчителя (геометрических размеров валков  $D$  и  $B$ , ширины зазора  $b$  и эксцентриситета  $e$ ); технологических показателей процесса (частоты вращения ведущего валка  $n_{\text{вв}}$ , частоты вращения эксцентрикового вала  $n_{\text{эв}}$ ); физико-механических характеристик материала (степени разрыхленности материала  $\mu$  и его насыпной плотности  $\rho_0$ ).

Качественной оценкой работы измельчителя является приведенная производительность, которая может быть определена по выведенной экспериментально формуле Розина—Раммлера [135]:

$$Q_{50} = Q \lg \left( 10^m \sqrt{\frac{E\%}{50}} \right), \quad (4.16)$$

где  $m$  — поправочный коэффициент, зависящий от свойств материала [135].

Определим производительность вибровалкового измельчителя на основании следующих параметров:  $B = 0,05$  м;  $D = 0,24$  м;  $b_{\text{min}} = 0,002$  м;  $e = 0,002$  м;  $n_{\text{вв}} = 120$  мин<sup>-1</sup>;  $\rho_0 = 1\,400$  кг/м<sup>3</sup>;  $k_{\text{пр}} = 0,7$ ;  $\mu = 0,3$ :

$$Q = 0,05 \cdot 0,004 \cdot 3,14 \cdot 0,24 \cdot 120 \cdot 1 \cdot 0,3 \cdot 0,7 \cdot 1\,400 \times \\ \times 1 \cdot \left[ \frac{0,24(1 - \cos 14)}{0,004} + 1 \right] = 14,9 \text{ кг / мин.}$$

Тогда приведенная производительность вибровалкового измельчителя согласно выражению (4.16)

$$Q_{50} = 14,9 \lg \left( 10^{0,9} \sqrt{\frac{60}{50}} \right) = 16,21 \text{ кг / мин или } Q_{50} = 0,97 \text{ т / ч.}$$

Построим график зависимости производительности  $Q$  от величины коэффициента соотношения частот вращения валков  $k_v$  для различных материалов (рисунок 4.21).

Построим график зависимости производительности от частоты вращения эксцентрикового вала  $n_{эк}$  (рисунок 4.22).

Аналогичным образом, построим график зависимости производительности  $Q$  от величины эксцентриситета  $e$  (рисунок 4.23).

Расчетные зависимости (см. рисунки 4.21—4.23) показывают, что все варьируемые параметры позволяют менять расчетную производительность вибровалкового измельчителя.

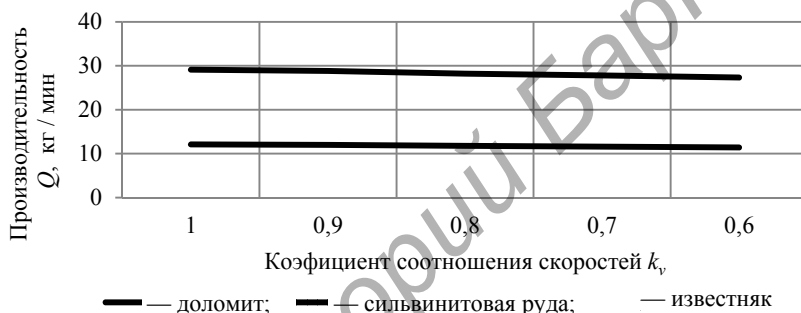


Рисунок 4.21 — Зависимость влияния величины коэффициента соотношения частот вращения валков  $k_v$  на производительность  $Q$

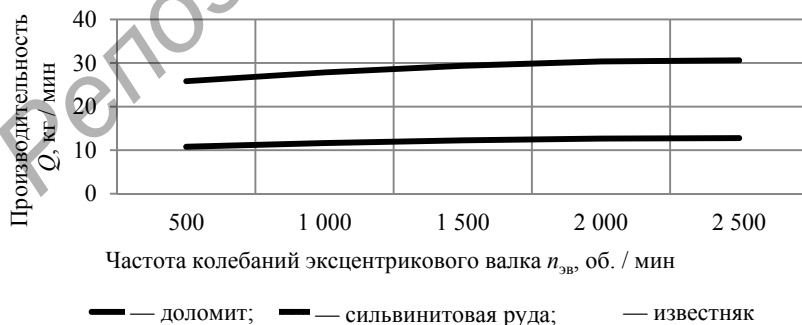


Рисунок 4.22 — Зависимость влияния частоты вращения эксцентрикового вала  $n_{эк}$  на производительность  $Q$



Рисунок 4.23 — Зависимость влияния величины эксцентриситета  $e$  на производительность  $Q$

Изменение коэффициента соотношения скоростей вращения незначительно снижает производительность (до 10 %), частота колебаний эксцентрикового вала и величина эксцентриситета позволяют увеличить производительность до 20 %.

Таким образом, представленные аналитические выражения и графические зависимости показывают целесообразность использования вибровалкового измельчителя с разными скоростями вращения валков, разными частотами вращения эксцентрикового вала и различной величиной эксцентриситета [228].

#### 4.5 Экспериментальные исследования процесса измельчения

Результаты теоретических исследований и поисковых экспериментов по изучению закономерностей процесса измельчения материалов в вибровалковом измельчителе свидетельствуют о целесообразности реализации в нем раздавливающе-сдвигового и вибрационного деформирования [223; 226; 227]. Такой вид воздействия возможно осуществить за счет установки одного из валков на эксцентриковом валу с эксцентриситетом  $e$  и приданием ему определенной угловой скорости. Дополнительное сдвиговое воздействие можно осуществить, придав валкам разную угловую скорость. Данные факторы оказывают влияние на выходные показатели процесса измельчения материалов с различной структурой [224].

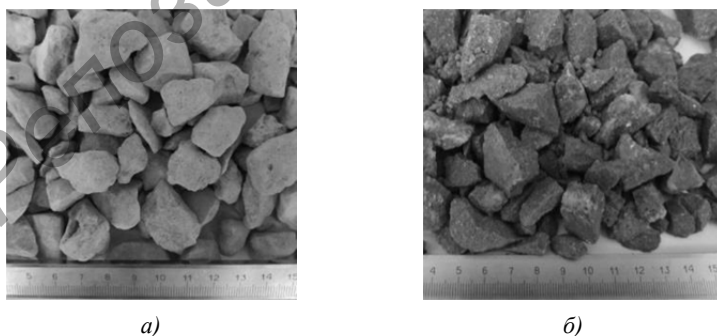
В целях поиска рациональных параметров процесса измельчения материала в вибровалковом измельчителе были проведены экспериментальные исследования влияния раздавливающе-сдвигового и вибрационного деформирования на выходные показатели:  $Q_{\text{пр}}, N, q, E_{\text{изм}} = f(n_{\text{эк}}, k_v, e)$ .

Удельный расход электроэнергии  $q$  (кВт · ч / т) на измельчение минеральных материалов с различной структурой определяется следующим образом:  $q = f(Q_{\text{пр}}, N)$ ;  $q = \frac{N}{Q_{\text{пр}}}$ .

Для проведения многофакторного планирования эксперимента использовался центральный композиционный ортогональный план эксперимента ЦКОП-2<sup>3</sup>. Это позволило при меньшем количестве опытов получить достоверные значения.

В результате проведения предварительных исследований были определены пределы исследуемых показателей:  $n_{\text{эк}} = 900 \dots 2100$  об. / мин;  $k_v = 0,56 \dots 1,04$ ;  $e = (0,8 \dots 3,2) \cdot 10^{-3}$  м.

При изучении характеристик процесса измельчения материалов в вибровалковом измельчителе были использованы материалы, отличающиеся как по составу, плотности и прочности, так и имеющие различную структуру. В качестве исследуемых материалов были приняты горные породы: с изотропной структурой — доломит, с анизотропной — сильвинитовая руда (рисунок 4.24).



*a* — доломит; *b* — сильвинитовая руда

Рисунок 4.24 — Горные породы

Физико-механические характеристики исследуемых материалов представлены в таблице 4.2.

Фракционный состав измельчаемых материалов представлен в таблице 4.3.

После проведенных экспериментов и обработки их результатов на ПЭВМ были получены в кодированном виде следующие уравнения регрессии [206]:

1) доломит:

$$Q_{\text{пр}} = 1,395 + 0,08x_1 + 0,103x_2 + 0,097x_3 - 0,026x_1^2 - 0,041x_2^2; \quad (4.17)$$

$$N = 2\,690 + 141x_1 + 256x_2 + 328x_3 + 81x_1^2 + 255x_2^2 + 75x_3^2 + 131x_1x_3; \quad (4.18)$$

$$E_{\text{изм}} = 62,89 + 1,97x_1 + 0,65x_2 + 2,49x_3 - 0,89x_1^2 - 1,27x_2^2; \quad (4.19)$$

2) сильвинитовая руда:

$$Q_{\text{пр}} = 1,048 + 0,082x_1 + 0,033x_2 + 0,064x_3 - 0,025x_1^2 - 0,057x_2^2; \quad (4.20)$$

$$N = 3\,288 + 89x_1 + 458x_2 + 289x_3 + 136x_1^2 + 404x_2^2 + 46x_3^2 + 114x_1x_3 \quad (4.21)$$

$$E_{\text{изм}} = 65,37 + 2,63x_1 - 2,62x_2 + 1,84x_3 - 1,73x_1^2 - 3,85x_2^2 - 0,91x_3^2 \quad (4.22)$$

Т а б л и ц а 4.2 — Физико-механические характеристики исследуемых материалов

Материал	Плотность $\rho_0$ , кг / м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии $\sigma_{\text{сж}}$ , МПа	Коэффициент анизотропии $k_{\text{ан}}$	Твердость по шкале Мооса
Доломит	2 200...2 600	40...50	1,06	4
Сильвинитовая руда	1 700...2 100	50...80	1,2	2

Т а б л и ц а 4.3 — Фракционный состав материалов

Материал	Весовое содержание фракций (%) при размере зерен (мм)				
	3...5	5...7	7...10	10...15	15...25
Доломит	5	12	23	41	19
Сильвинитовая руда	4	19	22	37	18

Проведя анализ данных уравнений регрессии, было установлено, что на оптимизируемые параметры в вибровалковом измельчителе оказывают влияние все варьируемые факторы. Таким образом необходимо провести оценку влияния каждого фактора на процесс измельчения.

*Оценка влияния геометрических и кинематических параметров на эффективность и энергоёмкость процесса измельчения.* Геометрические и кинематические параметры вибровалкового измельчителя оказывают существенное влияние не только на выходные качественные показатели, но и на энергозатраты процесса. Проведенные экспериментальные исследования по установлению закономерностей раздавливающе-сдвигового и вибрационного деформирования минеральных материалов в вибровалковом измельчителе позволили дать оценку влиянию этих параметров на процесс.

На рисунке 4.25 представлен материал после обработки в вибровалковом измельчителе.

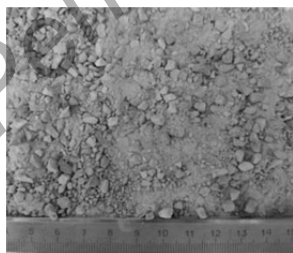
После перевода из кодированной формы в натуральную уравнения (4.17—4.22) примут следующий вид:

1) доломит:

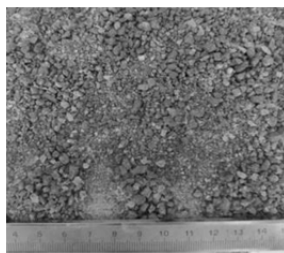
$$Q_{\text{пр}} = 4,72 \cdot 10^{-4} n_{\text{ЭК}} + 2,155 k_v + 0,097 e - 1,04 \cdot 10^{-7} n_{\text{ЭК}}^2 - 1,025 k_v^2 - 0,337;$$

$$N = 6482 - 1,214 n_{\text{ЭК}} - 8920 k_v - 365 e + 0,262 n_{\text{ЭК}} e + 3,24 \cdot 10^{-4} n_{\text{ЭК}}^2 + 6372 k_v^2 + 75 e^2;$$

$$E_{\text{изм}} = 0,01462 n_{\text{ЭК}} - 3,56 \cdot 10^{-6} n_{\text{ЭК}}^2 + 54,05 k_v - 31,75 k_v^2 + 2,49 e + 21,07;$$



а)



б)

а — доломит; б — сильвинитовая руда

Рисунок 4.25 — Состав материала после измельчения в вибровалковом измельчителе

2) сильвинитовая руда:

$$Q_{\text{пр}} = 4,64 \cdot 10^{-4} n_{\text{эк}} - 1 \cdot 10^{-7} n_{\text{эк}}^2 + 2,445k_v - \\ - 1,425k_v^2 + 0,064e - 0,595;$$

$$N = 9167 - 1,91n_{\text{эк}} - 13870k_v - 237e + 0,228n_{\text{эк}}e + \\ + 5,44 \cdot 10^{-4} n_{\text{эк}}^2 + 10100k_v^2 + 46e^2;$$

$$E_{\text{изм}} = 0,02602n_{\text{эк}} + 140,9k_v + 5,48e - 6,92 \cdot 10^{-6} n_{\text{эк}}^2 - \\ - 96,25k_v^2 - 0,91e^2 - 16,53;$$

где  $n_{\text{эк}}$  (об. / мин),  $e$  (мм).

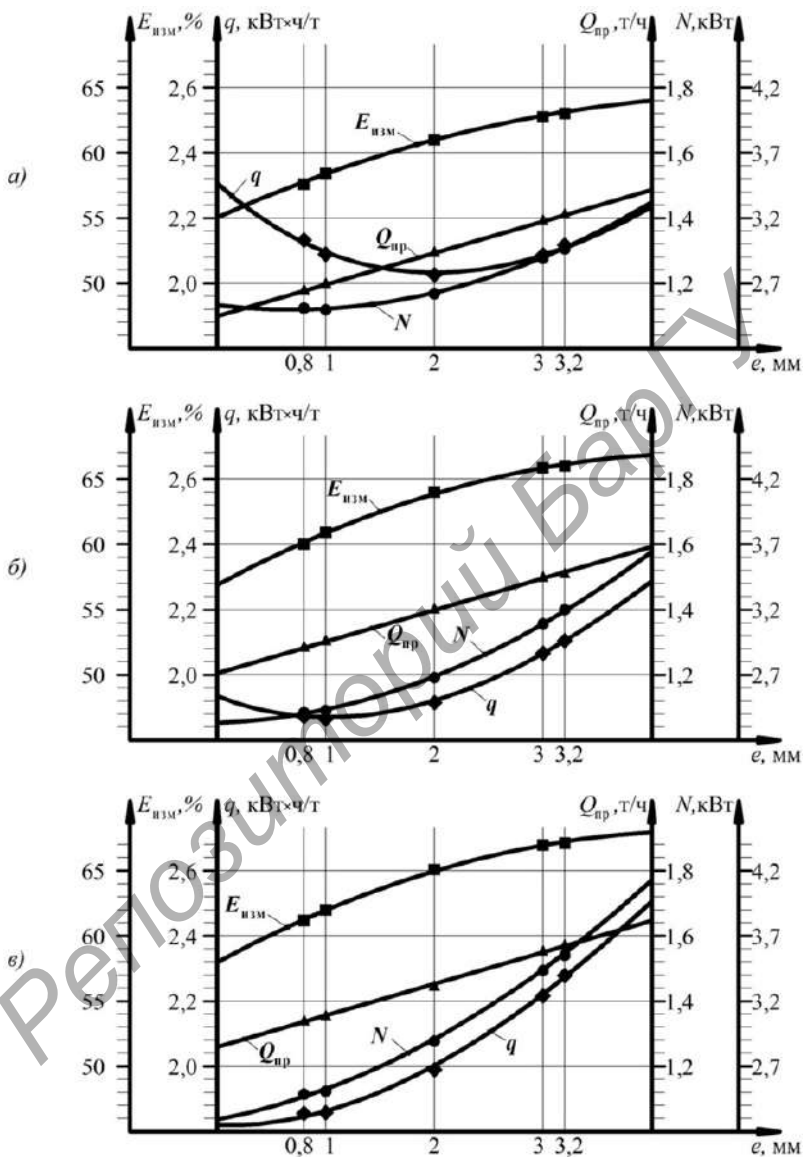
Проведем анализ влияния каждого фактора уравнений регрессии на выходные параметры процесса измельчения материалов в вибровалковом измельчителе.

*Исследование влияния частоты вращения эксцентрикового вала на качественные показатели процесса измельчения.* Ранее проведенные теоретические и поисковые исследования [223; 225; 226] позволили установить, что на величину выходных параметров процесса измельчения материалов с различными физико-механическими характеристиками и структурой существенное влияние оказывает частота вращения эксцентрикового вала, создающая вибрационное воздействие на материал.

Как было сказано [56], вибрационное воздействие может менять реологические свойства дисперсных сред, разрушая или ослабляя связи в них. Помимо этого вибрации различной интенсивности могут перевести дисперсные среды в состояние псевдооживления и виброоживления. При воздействии вибрации легче преодолеваются силы сухого и вязкого трения, снижаются предел пластического деформирования и вязкость [56]. Все это свидетельствует об актуальности исследования влияния вибрационного воздействия на измельчаемый материал.

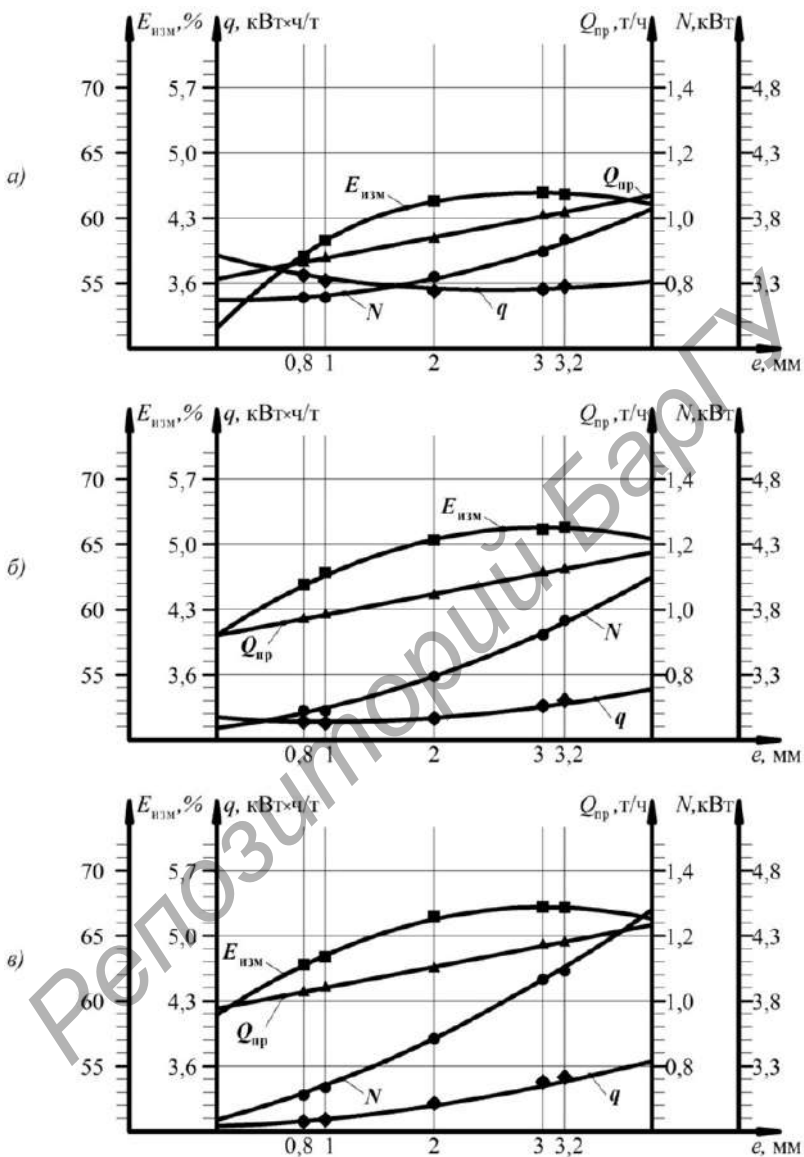
Вибрационное деформирование частиц осуществляется за счет эксцентричного вала, вращающегося с различной частотой вращения  $n_{\text{эк}}$ .

В целях изучения влияния вибрационного воздействия на выходные показатели и определения оптимального их значения проведены исследования и изучены зависимости  $Q_{\text{пр}}$ ,  $N$ ,  $E_{\text{изм}} = f(n_{\text{эк}})$  и  $q = f(Q_{\text{пр}}, N)$  (рисунки 4.26, 4.27), при измельчении минеральных материалов (доломита и сильвинитовой руды).



а —  $n_{эк} = 1000$  об./мин; б —  $n_{эк} = 1500$  об./мин; в —  $n_{эк} = 2000$  об./мин

Рисунок 4.26 — Влияние частоты вращения эксцентрикового вала  $n_{эк}$  на  $E_{взм}$ ,  $q$ ,  $Q_{пр}$ ,  $N$  (материал — доломит,  $b_{ср} = 4 \times 10^{-3}$  м;  $k_v = 0,8$ )



а —  $n_{эк} = 1000$  об./мин; б —  $n_{эк} = 1500$  об./мин; в —  $n_{эк} = 2000$  об./мин

Рисунок 4.27 — Влияние частоты вращения эксцентрикового вала  $n_{эк}$  на  $E_{изм}$ ,  $q$ ,  $Q_{пр}$ ,  $N$  (материал — силвинитовая руда,  $b_{ср} = 4 \times 10^{-3}$  м;  $k_v = 0,8$ )

Как видно из графической зависимости (см. рисунки 4.26, 4.27), варьирование частотой вращения эксцентрикового вала  $n_{\text{эк}}$  меняет качественные и количественные параметры процесса измельчения.

Так, при увеличении  $n_{\text{эк}}$  с нижнего ( $n_{\text{эк}} = 1\,000$  об./мин) уровня варьирования до верхнего ( $n_{\text{эк}} = 2\,000$  об./мин) и значении прочих факторов на нулевом уровне ( $k_v = 0,8$  и  $e = 2$  мм) происходит изменение качественных и количественных параметров процесса [233; 237]:

1) степень измельчения материалов возрастает следующим образом:

- для доломита — с  $E_{\text{изм}} = 60,03$  до  $E_{\text{изм}} = 63,97$  (на 6,5 %);
- для сальвинитовой руды — с  $E_{\text{изм}} = 61,01$  до  $E_{\text{изм}} = 66,27$  (на 8,7 %);

2) приведенная производительность возрастает следующим образом:

- для доломита — с  $Q_{\text{пр}} = 1,293$  т/ч до  $Q_{\text{пр}} = 1,453$  т/ч (на 12,4 %);
- для сальвинитовой руды — с  $Q_{\text{пр}} = 0,941$  т/ч до  $Q_{\text{пр}} = 1,105$  т/ч (на 17,4 %).

Создание вибрационного деформирования приводит к совершению большей работы, на что указывает рост потребляемой мощности привода:

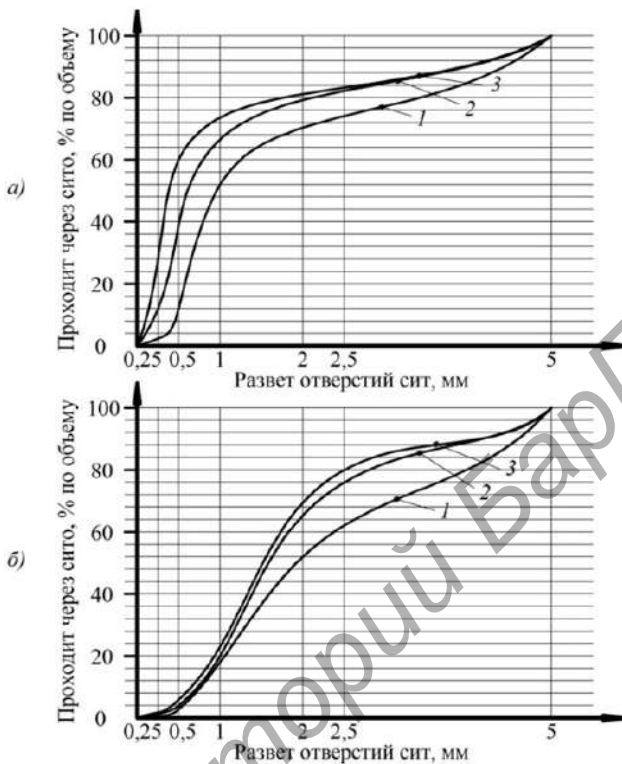
- для доломита — с  $N = 2,628$  кВт до  $N = 2,91$  кВт (на 10,7 %);
- для сальвинитовой руды — с  $N = 3,335$  кВт до  $N = 3,513$  кВт (на 5,3 %).

Это приводит к уменьшению удельного расхода электроэнергии, затрачиваемой на осуществление процесса измельчения исследуемых материалов:

- для доломита — с  $q = 2,033$  кВт · ч / т до  $q = 2,003$  кВт · ч / т (на 1,5 %);
- для сальвинитовой руды — с  $q = 3,544$  кВт · ч / т до  $q = 3,179$  кВт · ч / т (на 10,3 %).

Наиболее значимое влияние скорость вращения эксцентрикового вала  $n_{\text{эк}}$  оказывает на сальвинитовую руду.

Также не менее значимой характеристикой измельчения материала является величина тонкости помола, характеризуемая остатком на сите с соответствующей ячейкой (рисунок 4.28).



*a* — доломит; *б* — сильвинитовая руда

1 —  $n_{\text{эк}} = 1\,000$  об. / мин; 2 —  $n_{\text{эк}} = 1\,500$  об. / мин;

3 —  $n_{\text{эк}} = 2\,000$  об. / мин

Рисунок 4.28 — Влияние частоты вращения эксцентрикового вала  $n_{\text{эк}}$  на качественный показатель процесса  $R$

Вибровалковый измельчитель не является окончательной стадией помола для доломита, оценка тонкости помола для этих материалов не может полностью описать положительные и отрицательные стороны процесса.

При измельчении сильвинитовой руды важным параметром тонкости помола является переизмельчение материала [80; 81; 113]. Таким образом, важным выходным качественным параметром оценки влияния частоты вращения эксцентрикового вала  $n_{\text{эк}}$  будет остаток на ситах  $R_{2,5}$ ,  $R_1$ ,  $R_{0,5}$  и  $R_{0,25}$ .

Так, при увеличении  $n_{\text{ЭК}}$  с нижнего ( $n_{\text{ЭК}} = 1\ 000$  об./мин) уровня варьирования до верхнего ( $n_{\text{ЭК}} = 2\ 000$  об./мин) и значения прочих факторов на нулевом уровне ( $k_v = 0,8$  и  $e = 2$  мм) остаток на ситах меняется следующим образом (см. рисунок 4.28):  $R_{2,5}$  — с 38 до 20 % (на 47,0 %);  $R_1$  — с 82 до 77 % (на 6,1 %);  $R_{0,5}$  — с 98 до 94 % (на 4,1 %).

Таким образом, изменение частоты вращения эксцентрикового вала  $n_{\text{ЭК}}$  позволяет создать вибрационное воздействие на измельчаемый материал и тем самым повысить эффективность их измельчения [206].

*Исследование влияния коэффициента соотношения частот вращения валков на качественные показатели процесса измельчения.* Проведенные теоретические исследования и поисковые эксперименты показали, что не менее значимым фактором, определяющим качественные и количественные характеристики процесса измельчения, является коэффициент соотношения частот вращения валков  $k_v$ .

При измельчении материалов с различной структурой и физико-механическими свойствами существенное значение оказывает сдвиговое деформирование, зависящее от данного коэффициента [133; 223; 225; 226].

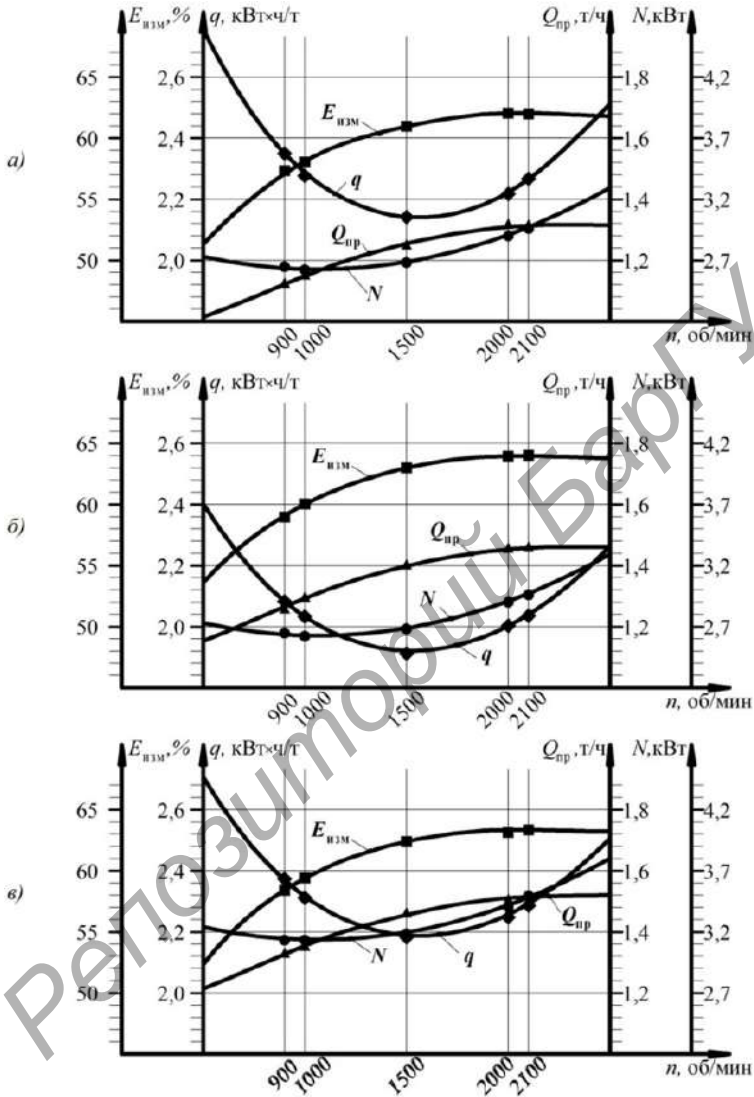
Сдвиговое воздействие возможно осуществить приданием валкам разных частот вращения. Такое условие разрушения материалов возможно получить в вибровалковом измельчителе.

Помимо этого сдвиговое воздействие на материал оказывает эксцентрично установленный валок.

В целях изучения взаимного влияния на выходные показатели и определения рациональных величин нами проведены исследования и изучены зависимости  $Q_{\text{пр}}$ ,  $N$ ,  $E_{\text{изм}} = f(k_v)$  и  $q = f(Q_{\text{пр}}, N)$  (рисунки 4.29, 4.30), при измельчении минеральных материалов (доломита, силвинитовой руды и известняка).

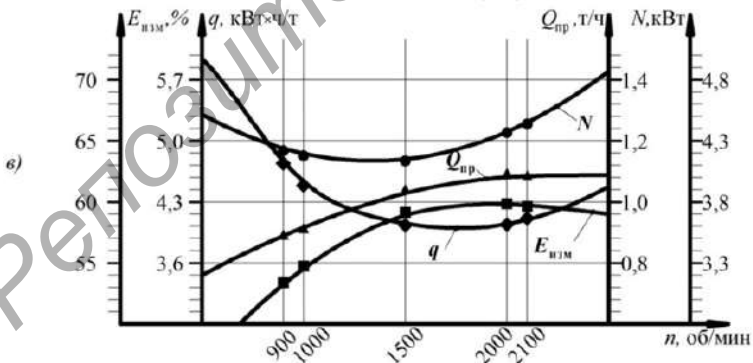
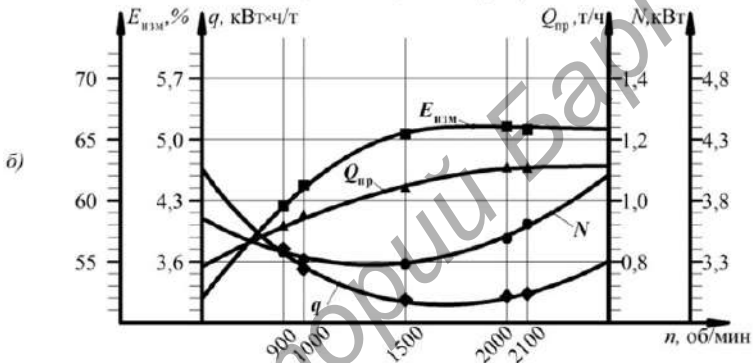
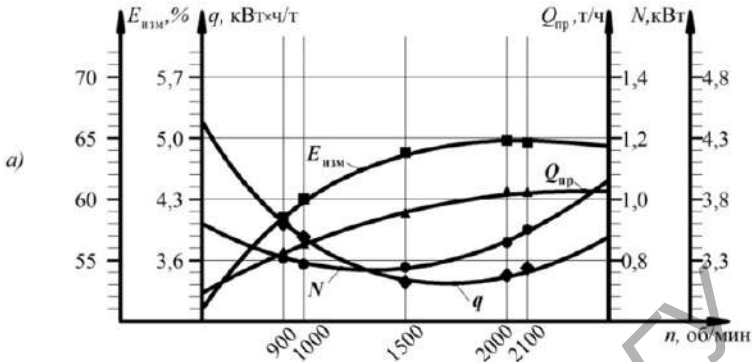
Как видно из графической зависимости (см. рисунки 4.29, 4.30), варьирование коэффициентом соотношения частот вращения валков  $k_v$  меняет качественные и количественные параметры процесса измельчения.

Так, при увеличении  $k_v$  с нижнего ( $k_v = 0,6$ ) уровня варьирования до верхнего ( $k_v = 1$ ) и значения прочих факторов на нулевом уровне ( $n_{\text{ЭК}} = 1\ 500$  об./мин и  $e = 2$  мм) происходит изменение качественных и количественных параметров процесса.



а —  $k_v = 0,6$ ; б —  $k_v = 0,8$ ; в —  $k_v = 0,1$

Рисунок 4.29 — Влияние величины коэффициента  $K_v$  на  $E_{изм}$ ,  $q$ ,  $Q_{пр}$ ,  $N$  (материал — доломит,  $b_{ср} = 4 \times 10^{-3}$  м;  $e = 2$  мм)



a —  $k_v = 0,6$ ; б —  $k_v = 0,8$ ; в —  $k_v = 0,1$

Рисунок 4.30 — Влияние величины коэффициента  $k_v$  на  $E_{изм}$ ,  $q$ ,  $Q_{пр}$ ,  $N$   
(материал — сильвинитовая руда,  $b_{ср} = 4 \times 10^{-3}$  м;  $e = 2$  мм)

При этом немаловажно рассмотреть параметр процесса на нулевом уровне ( $k_v = 0,8$ ) [206]:

1) степень измельчения материалов изменяется следующим образом:

- для доломита —  $E_{\text{изм}} = 60,97—62,89—62,27$  (возрастает на 3,1 и убывает на 2,1 %);
- для сильвинитовой руды —  $E_{\text{изм}} = 64,14—65,37—58,9$  (возрастает на 1,9 и убывает на 8,2 %).

2) приведенная производительность возрастает следующим образом:

- для доломита —  $Q_{\text{пр}} = 1,255—1,399—1,461$  т / ч (на 11,5 и 16,4 %);
- для сильвинитовой руды  $Q_{\text{пр}} = 0,958—1,048—1,024$  т / ч (на 9,4 и 6,9 %).

Создание сдвигового деформирования приводит к совершению меньшей работы за счет меньшей частоты вращения валька, на что указывает уменьшение потребляемой мощности привода, если смотреть от верхнего уровня:

- для доломита —  $N = 3,198—2,688—2,686$  кВт (на 15,9 и 16,0 %);
- для сильвинитовой руды —  $N = 4,15—3,288—3,234$  кВт (на 20,8 и 22,1 %).

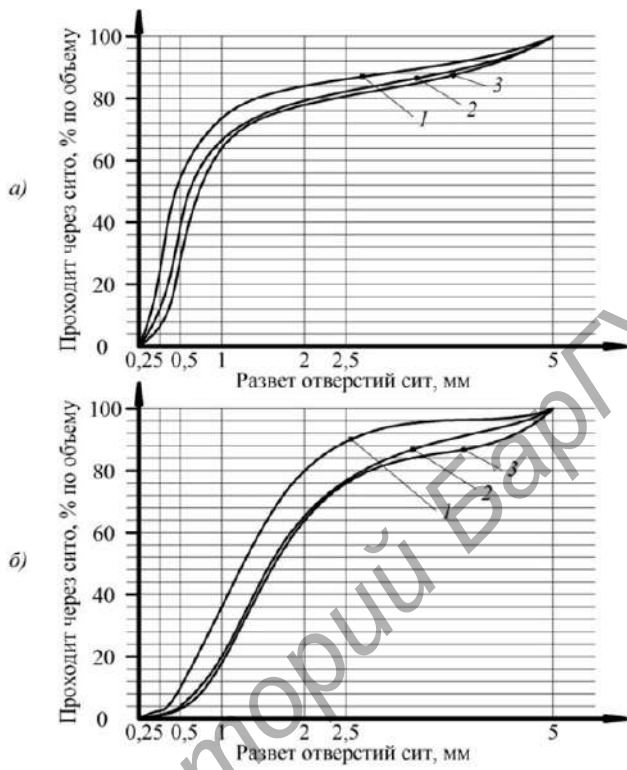
Это приводит к уменьшению удельного расхода электроэнергии, затрачиваемой на осуществление процесса измельчения исследуемых материалов, если смотреть от верхнего уровня:

- для доломита —  $q = 2,189—1,921—2,142$  кВт · ч / т (на 12,2 и 2,1 %);
- для сильвинитовой руды —  $q = 4,053—3,137—3,276$  кВт · ч / т (на 22,6 и 19,2 %).

Наиболее значимое влияние коэффициент соотношения частот вращения валков  $k_v$  оказывает на сильвинитовую руду. Это подтверждает теоретические исследования о том, что материалы с анизотропной структурой лучше разрушаются раздавливающе-сдвиговым деформированием.

Сдвиговое деформирование для материалов с изотропной структурой оказывает менее существенное влияние.

Также не менее значимой характеристикой измельчения материала является величина тонкости помола, характеризующая остатком на сите с соответствующей ячейкой (рисунок 4.31).



а — доломит; б — сильвинитовая руда  
 1 —  $k_v = 0,6$ ; 2 —  $k_v = 0,8$ ; 3 —  $k_v = 1$

Рисунок 4.31 — Влияние величины коэффициента  $k_v$  на качественный показатель процесса  $R$

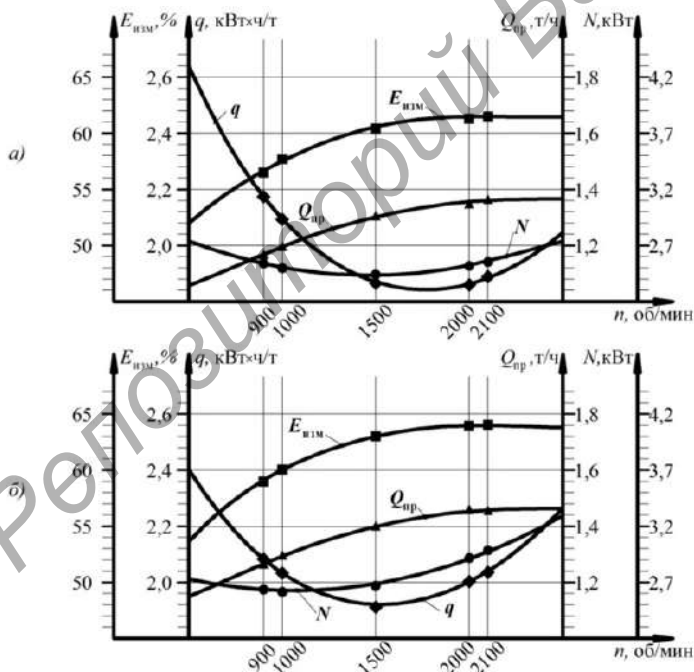
Как и при рассмотрении влияния скорости вращения эксцентрикового вала на параметр тонкости помола, коэффициент соотношения частот вращения валков оказывает существенное влияние. Таким образом, важным выходным качественным параметром оценки влияния данного коэффициента будет остаток на ситах 2,5; 1; 0,5 и 0,25.

Так, при уменьшении  $k_v$  с верхнего ( $k_v = 1,0$ ) уровня варьирования до нижнего ( $k_v = 0,6$ ) и значения прочих факторов на нулевом уровне ( $n_{эк} = 1\,500$  об./мин и  $e = 2$  мм) остаток на ситах меняется следующим образом:  $R_{2,5}$  — с 24 до 10 % (на 58,0 %);  $R_1$  — с 82 до 64 % (на 22,0 %);  $R_{0,5}$  — с 97 до 90 % (на 7,2 %).

Таким образом, применение эксцентриковых валков позволяет создать сдвиговое воздействие на измельчаемый материал с различными физико-механическими характеристиками и тем самым повысить эффективность их измельчения.

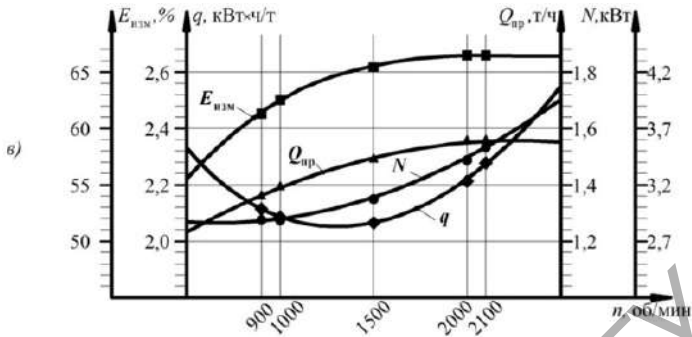
*Исследование влияния величины эксцентриситета на качественные показатели процесса измельчения.* Проведенные теоретические исследования и поисковые эксперименты показали, что величина эксцентриситета при создании вибраций в вибровалковом измельчителе является амплитудой процесса.

В целях изучения взаимного влияния на выходные показатели и определения рациональных величин нами проведены исследования и изучены зависимости  $Q_{пр}$ ,  $N$ ,  $E_{изм} = f(e)$  и  $q = f(Q_{пр}, N)$  (рисунки 4.32, 4.33).

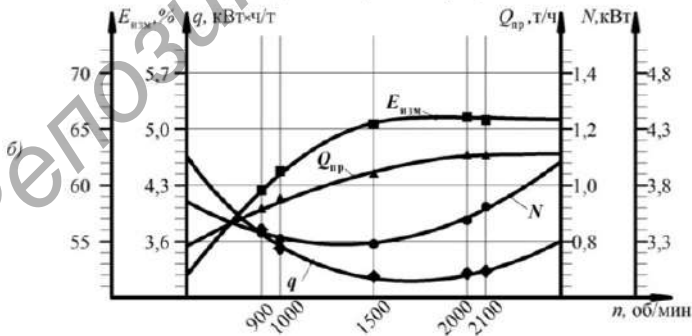
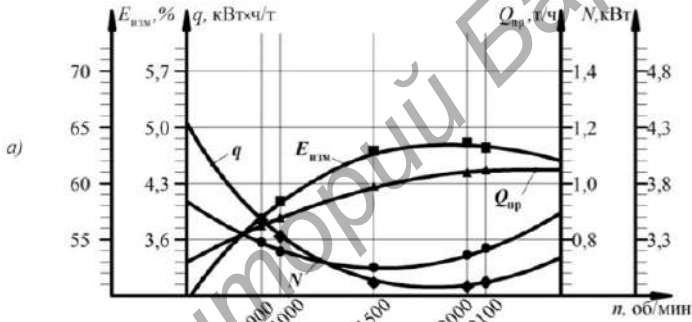


а —  $e = 1 \times 10^{-3}$  м; б —  $e = 2 \times 10^{-3}$  м; в —  $e = 3 \times 10^{-3}$  м

Рисунок 4.32 — Влияние величины эксцентриситета  $e$  на  $E_{изм}$ ,  $q$ ,  $Q_{пр}$ ,  $N$  (материал — доломит,  $b_{ср} = 4 \times 10^{-3}$  м;  $k_v = 1$ )

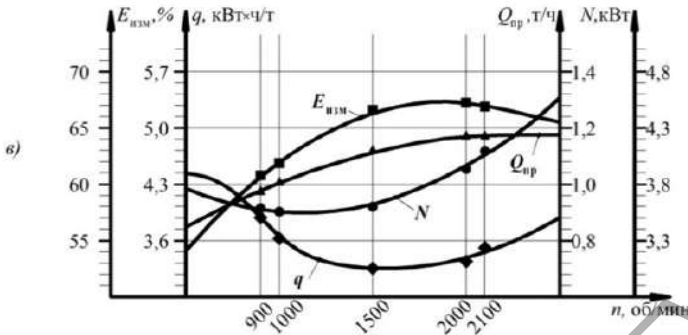


Окончание рисунка 4.32



$a - e = 1 \times 10^{-3} \text{ м}; \quad б - e = 2 \times 10^{-3} \text{ м}; \quad в - e = 3 \times 10^{-3} \text{ м}$

Рисунок 4.33 — Влияние величины эксцентриситета  $e$  на  $E_{изм}$ ,  $q$ ,  $Q_{пр}$ ,  $N$  (материал — сильвинитовая руда,  $b_{ср} = 4 \times 10^{-3} \text{ м}; k_v = 1$ )



Окончание рисунка 4.33

Как видно из графической зависимости, варьирование величиной эксцентриситета  $e$  меняет качественные и количественные параметры процесса измельчения.

Так, при увеличении величины эксцентриситета  $e$  с нижнего ( $e = 1$  мм) уровня варьирования до верхнего ( $e = 3$  мм) и значении прочих факторов на нулевом уровне ( $k_n = 0,8$  и  $n_{жк} = 1500$  об./мин) происходит изменение качественных и количественных параметров процесса:

1) степень измельчения материалов возрастает следующим образом:

- для доломита — с  $E_{изм} = 60,4$  до  $E_{изм} = 65,38$  (на 8,2 %);
- для сильвинитовой руды — с  $E_{изм} = 62,62$  до  $E_{изм} = 66,3$  (на 5,9 %);

2) приведенная производительность возрастает следующим образом:

- для доломита — с  $Q_{пр} = 1,302$  т/ч до  $Q_{пр} = 1,496$  т/ч (на 14,9 %);
- для сильвинитовой руды — с  $Q_{пр} = 0,984$  т/ч до  $Q_{пр} = 1,112$  т/ч (на 13,0 %).

Создание сдвигового деформирования приводит к совершению большей работы, на что указывает рост потребляемой мощности привода:

- для доломита — с  $N = 2,435$  кВт до  $N = 3,091$  кВт (на 26,9 %);
- для сильвинитовой руды — с  $N = 3,045$  кВт до  $N = 3,623$  кВт (на 19,0 %).

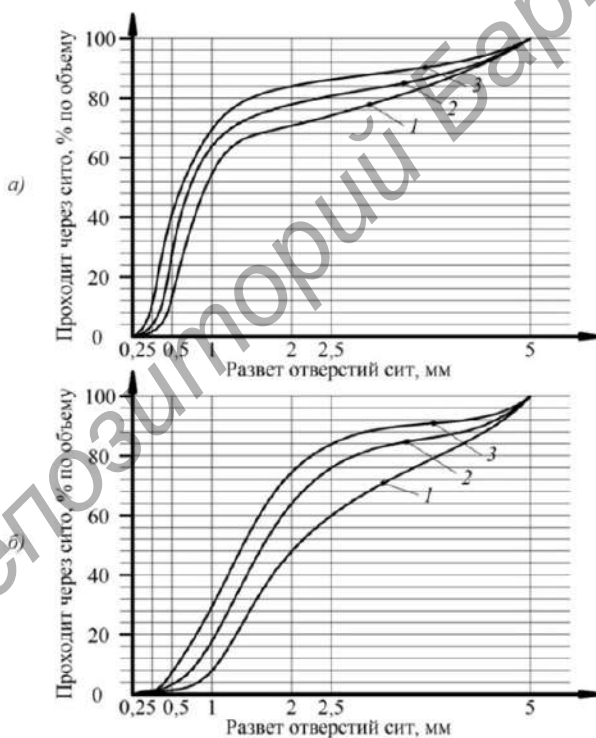
Это приводит к увеличению удельного расхода электроэнергии, затрачиваемой на осуществление процесса измельчения исследуемых материалов:

– для доломита — с  $q = 1,87 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{т}$  до  $q = 2,066 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{т}$  (на 10,5 %);

– для сильвинитовой руды — с  $q = 3,095 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{т}$  до  $q = 3,258 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{т}$  (на 5,3 %).

Наиболее значимое влияние изменение величины эксцентриситета  $e$  оказывает на сильвинитовую руду.

Также не менее значимой характеристикой измельчения материала является величина тонкости помола, характеризуемая остатком на сите с соответствующей ячейкой (рисунок 4.34).



$a$  — доломит;  $б$  — сильвинитовая руда

1 —  $e = 1 \times 10^{-3} \text{ м}$ ; 2 —  $e = 2 \times 10^{-3} \text{ м}$ ; 3 —  $e = 3 \times 10^{-3} \text{ м}$

Рисунок 4.34 — Влияние величины эксцентриситета  $e$  на качественный показатель процесса  $R$

Так, при увеличении  $e$  с нижнего ( $e = 1$  мм) уровня варьирования до верхнего ( $e = 3$  мм) и значении прочих факторов на нулевом уровне ( $k_v = 0,8$  и  $n_{\text{эк}} = 1\,500$  об./мин) остаток на ситах меняется следующим образом (см. рисунок 4.34):  $R_{2,5}$  — с 40 до 16 % (на 60,0 %);  $R_1$  — с 92 до 70 % (на 23,9 %);  $R_{0,5}$  — с 98 до 92 % (на 6,1 %).

Таким образом, применение вибровалкового измельчителя позволяет реализовать объемно-сдвиговое деформирование измельчаемых материалов. Изменение величины эксцентриситета в диапазоне от 1 до 3 мм приводит к повышению эффективности измельчения материалов за счет увеличения объемно-сдвигового деформирования их частиц [206].

#### 4.6 Выбор оптимальных режимов работы вибровалкового измельчителя

Процесс измельчения в вибровалковом измельчителе описывается полученными ранее уравнениями регрессии (4.17—4.22), используя которые, можно провести оптимизацию процесса.

Под оптимизацией понимается подбор входных параметров таким образом, чтобы процесс измельчения протекал наиболее эффективно.

Подбор оптимальных режимов работы вибровалкового измельчителя осуществляется по совместному рассмотрению уравнений регрессий: приведенной производительности, потребляемой мощности, степени измельчения и удельного расхода электроэнергии  $Q_{\text{пр}}, N, E_{\text{изм}} = f(n_{\text{эк}}, k_v, e)$  и  $q = f(Q_{\text{пр}}, N)$ .

Определение оптимальных режимов работы вибровалкового измельчителя сводится к анализу функций отклика от каждого из варьируемых параметров:  $Q_{\text{пр}}, N, E_{\text{изм}} = f(n_{\text{эк}})$ ;  $Q_{\text{пр}}, N, E_{\text{изм}} = f(k_v)$ ;  $Q_{\text{пр}}, N, E_{\text{изм}} = f(e)$ ;  $q = f(Q_{\text{пр}}, N)$ .

Причем к каждой из вышеприведенных функций отклика предъявляются определенные требования, характеризующие процесс измельчения:

- для приведенной производительности  $Q_{\text{пр}}$  — максимальное значение;
- для потребляемой мощности  $N$  — минимальное значение;

- для степени измельчения  $E_{изм}$  — максимальное значение;
- для удельного расхода электроэнергии  $q$  — минимальное значение.

На рисунках 4.35 и 4.36 представлены оптимальные параметры процесса работы вибровалкового измельчителя для исследуемых материалов (доломит и сильвинитовая руда).

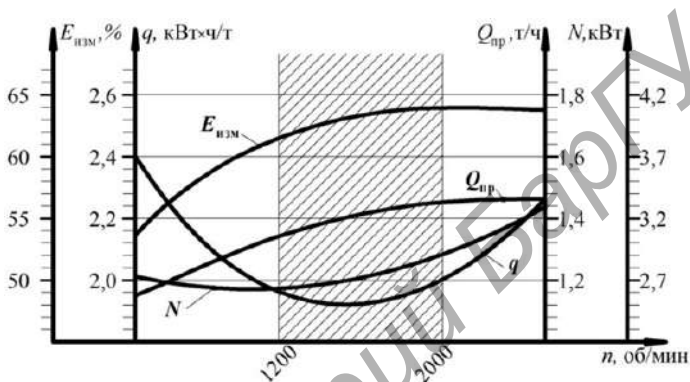


Рисунок 4.35 — Графическая зависимость наиболее рациональных параметров процесса измельчения доломита

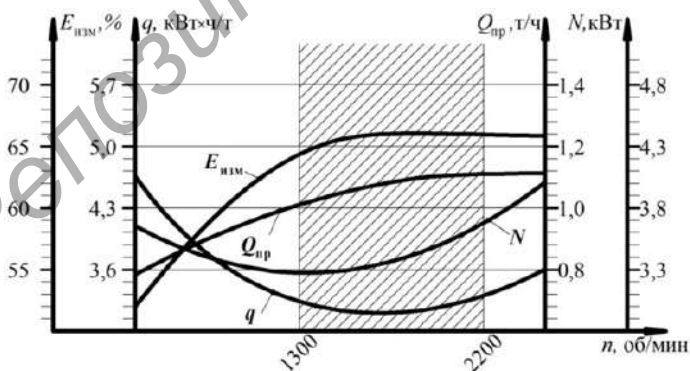


Рисунок 4.36 — Графическая зависимость наиболее рациональных параметров процесса измельчения сильвинитовой руды

Таким образом, проведенный анализ зависимостей функций отклика от варьируемых факторов позволил определить оптимальные конструктивно-технологические параметры вибровалкового измельчителя для материалов с различными физико-механическими характеристиками [233].

Так, для доломита:  $e = 2$  мм;  $k_v = 0,8 \dots 0,9$ ;  $n_{\text{эк}} = 1\,200 \dots 2\,000$  об./мин; для сильвинитовой руды:  $e = 2 \dots 3$  мм;  $k_v = 0,6 \dots 0,8$ ;  $n_{\text{эк}} = 1\,300 \dots 2\,200$  об./мин.

Проведенные аналитические исследования кинематики вибровалкового измельчителя и кинетики движения материала в вибровалковом измельчителе позволили получить уравнения для расчета конструктивных и технологических параметров их рабочих органов, позволяющих реализовать эффективные условия измельчения материалов раздавливающе-сдвиговым и вибрационным воздействием.

Построена математическая модель деформирования материала, аналитически исследован механизм разрушения, получены уравнения для определения усилий измельчения раздавливающе-сдвиговым и вибрационным (ударным) деформированием, изменения напряжений и деформаций, прикладываемых к материалу при вибрационном воздействии.

Получены аналитические зависимости по расчету производительности и потребляемой мощности привода вибровалкового измельчителя, позволяющие реализовать эффективные условия измельчения материалов в зависимости от выбора требуемых конструктивных и технологических параметров рабочих органов.

Проведенные промышленные испытания вибровалкового измельчителя подтвердили теоретические и экспериментально полученные результаты и свидетельствуют о целесообразности реализации раздавливающе-сдвигового и вибрационного деформирования измельчаемых материалов.

Полученные аналитические и экспериментальные зависимости, модели, предложенные методики выбора режимов измельчения и последовательности их использования рекомендуются при разработке технологий дробления, измельчения и помола материалов строительной, сельскохозяйственной и химической промышленности.

## **5 ПРУЖИННЫЕ МЕЛЬНИЦЫ, СМЕСИТЕЛИ И МЕХАНОАКТИВАТОРЫ**

В качестве базового варианта упругого рабочего органа, который в зависимости от своего технологического назначения может быть дугообразно изогнутой с сомкнутыми в зоне минимального радиуса её изгиба или прямой с переменной величиной зазора между ее витками пружиной. Во всех этих исследованиях пружинному рабочему органу придаётся нужный характер движения. В первом — рабочему органу сообщается вращательное движение, он превращается в измельчитель, во втором — пружина приводится в колебательное движение, что обеспечивает ей функции просеивающей поверхности и делает пружинным грохотом. Наибольшим конструктивным многообразием обладают пружинные измельчители, что для создания промышленного агрегата требует решения следующих основных задач:

- 1) разработка и выбор нужной конструктивной системы пружинного измельчителя;
- 2) расчет геометрических и кинематических параметров винтовых рабочих органов;
- 3) расчет напряженно-деформационного состояния и теоретический анализ работы кинематически деформируемого рабочего органа;
- 4) определение энергетических показателей и производительности винтовых аппаратов;
- 5) исследование кинетики измельчения и распределения зернового состава;
- 6) разработка основ расчетов на прочность кинематически деформируемого рабочего органа;
- 7) обобщение и анализ результатов выполненных теоретических и экспериментальных исследований.

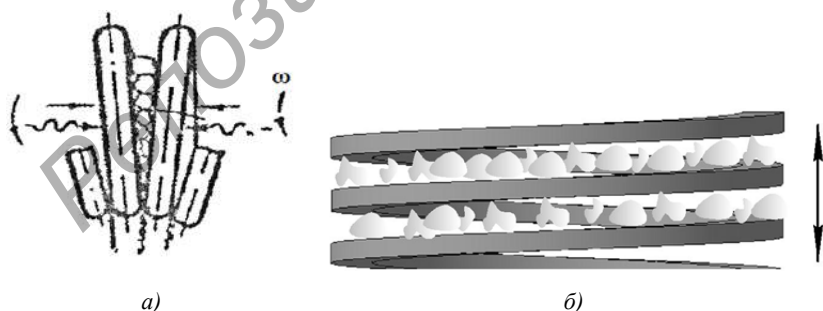
### **5.1 Конструктивные особенности и принцип действия агрегатов с пружинными рабочими органами**

Пружинные мельницы представляют собой технологические аппараты, в которых разрушение материалов осуществляется с помощью пружин, которые имеют большое разнообразие кон-

структивных исполнений, а механизм их воздействия на частицы измельчаемых продуктов определяется кинематикой движения и характером приложения внешних нагрузок. В большинстве своем это устройства с принудительным кинематическим деформированием пружинных рабочих органов и передачей введенной в них энергии в обрабатываемую среду [208]. Наибольшее распространение получили пружинные мельницы вращательного действия. Механизм измельчения единичных частиц материала пружинным рабочим органом показан на рисунке 5.1.

Разрушение материала между звеньями пружины (см. рисунок 5.1, *а*) характеризуется той особенностью, что одновременно с постоянным действием на материал сжимающе-сдвиговых усилий и наложения виброколебаний происходит его принудительное транспортирование в виде тонких слоёв. Это позволяет пружинным рабочим органам выполнять функции транспортирующего устройства.

Пружинные мельницы отличаются чрезвычайным многообразием и защищены более чем 200 изобретениями и патентами [157; 184; 204]. Основные конструкции пружинных аппаратов циклического и непрерывного действия приведены, соответственно, на рисунках 5.2 и 5.3. Принцип их действия из представленных схем понятен и дополнительных пояснений не требует.



*а*)

*б*)

*а* — механизм измельчения; *б* — силы на витке

Рисунок 5.1 — Принцип действия рабочего органа

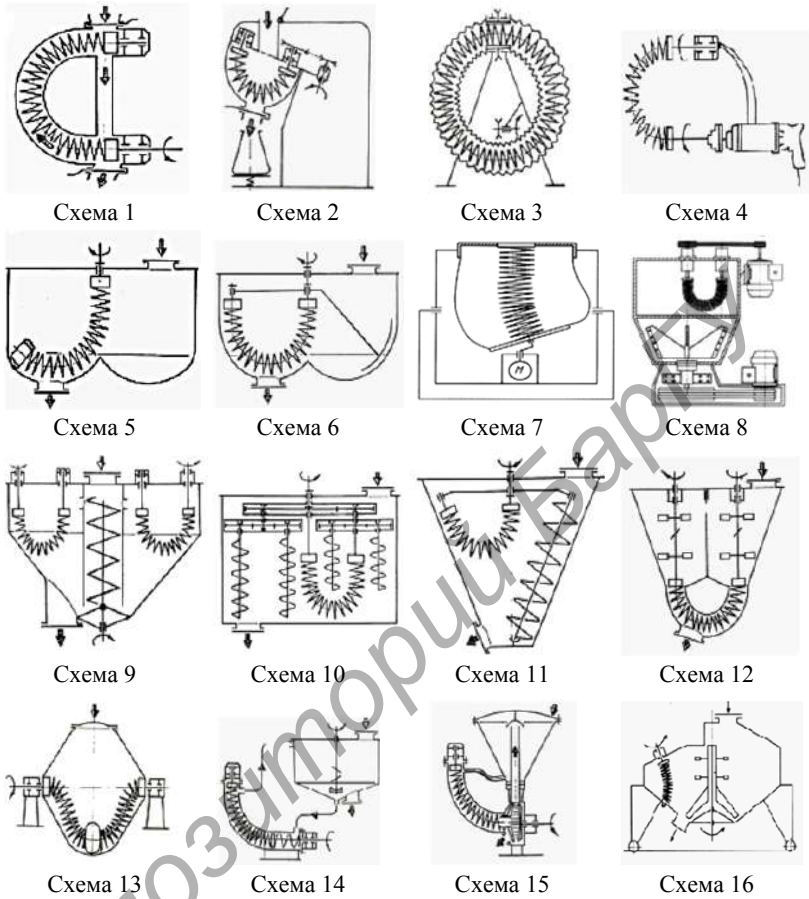


Рисунок 5.2 — Варианты схем конструкций аппаратов циклического действия

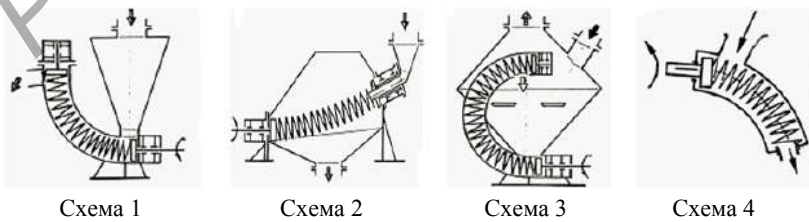


Рисунок 5.3 — Варианты схем конструкций аппаратов непрерывного действия

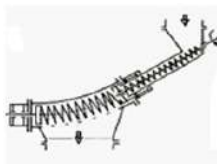


Схема 5

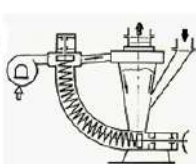


Схема 6

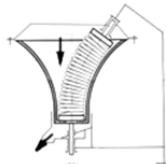


Схема 7

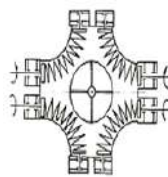


Схема 8



Схема 9

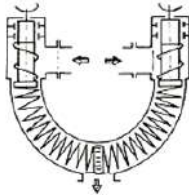


Схема 10

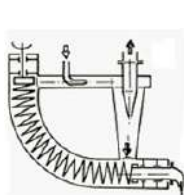


Схема 11

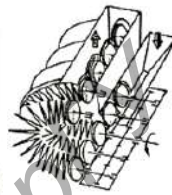


Схема 12

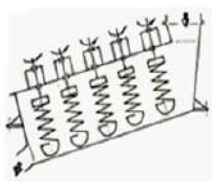


Схема 13

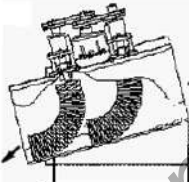


Схема 14

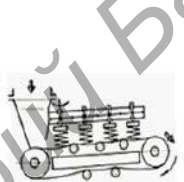


Схема 15

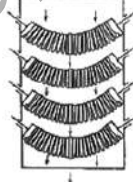


Схема 16

*Окончание рисунка 5.3*

Пружинные мельницы, смесители и диспергаторы объединены единым исполнением рабочего органа. Пружинные аппараты в целом характеризуются очень высокой виброактивностью их рабочих органов. Эти и другие особенности пружинных аппаратов делают их эффективным оборудованием для системной переработки многих видов сырья и материалов. Их функциональные преимущества обусловлены получением дополнительной степени свободы движения рабочего органа за счет кинематического деформирования витков пружин. Это накладывает дополнительные требования на материал и качество изготовления рабочих органов, работающих в условиях знакопеременных нагрузок.

В силу конструктивных особенностей пружинных рабочих органов они могут быть изготовлены только из пружинных ма-

териалов, в частности, сталей. По этой причине поверхностная твердость витков пружин не может превысить 57...60 HRC, а значит, это является предпосылкой к повышенному износу при переработке высокоабразивных материалов.

Основные отказы пружинных рабочих органов обусловлены усталостным разрушением и износом, причем доминирующим является первый фактор. Главный резерв повышения наработки на отказ по критерию усталостной прочности состоит в снижении исходных монтажных внутренних напряжений при изгибе рабочих органов. Это заключается в уменьшении величины углов изгиба рабочих органов, пропорционально повышающих их циклическую прочность.

Вывод по практическому применению таких рабочих органов сводится к выбору баланса между параметрами пружин, в частности, углом и радиусом их изгиба, величиной зазоров и усилий обжатия материала в контактных зонах между витками. В определенной степени ограничителем применения пружинных аппаратов для крупнотоннажных производств является необходимость подвода крутящего момента к каждому рабочему органу, что усложняет конструкцию всей машины в целом или требует индивидуального привода. Повышенная виброактивность пружинных рабочих органов принципиальных ограничений на эксплуатацию не накладывает. Работа пружинных аппаратов в слое материала происходит с минимальным шумом. При этом сам материал является демпфером, расположенным между наружной поверхностью пружинных рабочих органов и стенками рабочей камеры.

## **5.2 Способы организации процессов измельчения материалов в пружинных мельницах и варианты их интенсификации**

Интенсификация работы пружинных рабочих органов и технологических процессов в мельницах, созданных на их основе, может быть обеспечена следующими мероприятиями:

1) установкой на рабочих органах элементов, вызывающих дополнительные продольные и поперечные вибрационные колебания;

2) установкой на корпусе мельницы или опорах рабочих органов дополнительных элементов, изменяющих характер движения самого рабочего органа или обрабатываемого материала;

3) оптимизацией движения материала под действием пружинного рабочего органа, организацией прямотока или протivotока, а также рециркуляции материала;

4) оптимизацией загрузки материала в пружинную мельницу, порционной, пульсирующей подачей;

5) повышение энергонапряженности мельниц путем введения дополнительных зон контакта, дополнительных мелющих тел или дополнительных сжимающих витки пружины элементов.

Первые два из приведенных мероприятий легко реализуются установкой на рабочих поверхностях витков кулачков, эксцентричной установкой одного из концов пружины, оснащением рабочего органа дебалансами и т. д. [181; 188]. Оптимизация движения материала в пружинном аппарате основана прежде всего на том, что сама пружина обладает хорошей транспортирующей способностью и обеспечивает устойчивую циркуляцию материала в рабочей камере. Проблема заключается в том, чтобы движущиеся потоки обрабатываемого продукта с максимальной вероятностью попадали в активные зоны между витками при равномерном распределении частиц материала по всему объему рабочей камеры или рабочего органа.

Рассмотрим более подробно остальные из выбранных направлений обеспечения интенсификации и управления процессами измельчения.


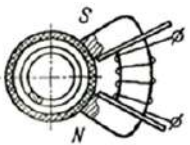

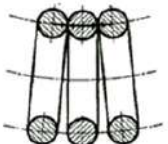


Существенная энергоемкость процесса измельчения вынуждает искать пути проведения процесса с наименьшими затратами на единицу полученного продукта. Имеется ряд направлений решения поставленной задачи. Одним из них является повышение энергонапряженности процесса измельчения, т. е. количества энергии, выделяемой в единице объема мельницы. Это возможно при условии создания мельниц, позволяющих повысить скорость приложения нагрузки, частоту деформаций частицы материала в единицу времени и усилие разрушения частицы.

В конструкции пружинной мельницы главным источником повышения напряжения сжатия частиц материала является увеличение усилия прижатия смежных витков рабочего органа по боковым поверхностям.

Увеличение числа зон воздействия на обрабатываемый материал обеспечивается увеличением числа витков пружин или числа их сопряжений при выполнении рабочего органа из нескольких ввитых одна в другую цилиндрических рабочих винтовых пружин. Использование внутренних силовых факторов рабочих органов мельницы обеспечивается за счет технологии их изготовления (например, с предварительным поджатием витков пружины), качества применяемого материала и его термообработки. Некоторые из интенсифицирующих факторов представлены в таблице 5.1.

**Схема 1** реализуется установкой внутрь пружинного рабочего органа нажимных роликов, которые создают радиальное нагружение и увеличивают контактное нагружение в межвитковых зонах. Несмотря на достаточную простоту создает определенные сложности с установкой и приводит к снижению эксплуатационной надежности.

Т а б л и ц а 5.1 — Силовые факторы повышения энергонапряженности

Нагружение	Внешние силы	Внутренние силы
Радиальное	 <p>Схема 1</p>	 <p>Схема 4</p>
Осевое	 <p>Схема 2</p>	 <p>Схема 5</p>
Изгибное	 <p>Схема 3</p>	 <p>Схема 6</p>

**Схемы 2, 3** характеризуются простотой выполнения. Значительные дополнительные нагружения в них реализуются без применения специальных элементов, что способствует нормальной работе пружинного рабочего органа. Важным замечанием к выполнению рабочего органа, например, по схеме 3, следует считать ограничение по предельному углу изгиба его оси, что неизбежно приведет к снижению прочности при циклическом нагружении.

**Схема 4** осуществима в случае изготовления корпуса мельницы из немагнитного материала и довольно просто реализуема на практике. Возможна полная автоматизация процесса нагружения и контроля усилия обжатия.

**Схема 5** использует действие внутренних сил материала рабочего органа, появляющихся после изготовления последнего с применением, например, подкрутки проката в сторону, обратную направлению навивки витков. То же наблюдается при использовании рабочих органов плотной навивки с начальным усилием растяжения. Эффективность способа зависит от внутренних сил в сечении профиля рабочего органа.

**Схема 6** осуществляется путем сборки нескольких пружин с определенным натягом. Резкое увеличение зон разрушения частиц материала сопровождается изменением характера приложенных нагрузок. Процесс измельчения методом раздавливания совмещается в этом случае с процессом истирания и равномерной подачей исходного материала в зону измельчения.

Каждый из приведенных здесь вариантов интенсификации работы пружинных мельниц может найти практическое применение, но, по нашему мнению, целесообразно разработать такой способ, который может быть реализован в любом из них. Это можно сделать путем сообщения виткам рабочих органов интенсивных колебаний, а в ряде случаев обеспечения их дополнительных соударений не только между собой или с витками соседних пружин или рабочих органов, но и со стенками помольной камеры или дополнительными интенсификаторами рабочего процесса, например, мелющими телами — шарами [103].

Графическая интерпретация реализации концепции использования управляемых колебаний элементов рабочих органов пружинных мельниц приведена на рисунке 5.4, где изображена амплитудно-частотная характеристика работы пружины.

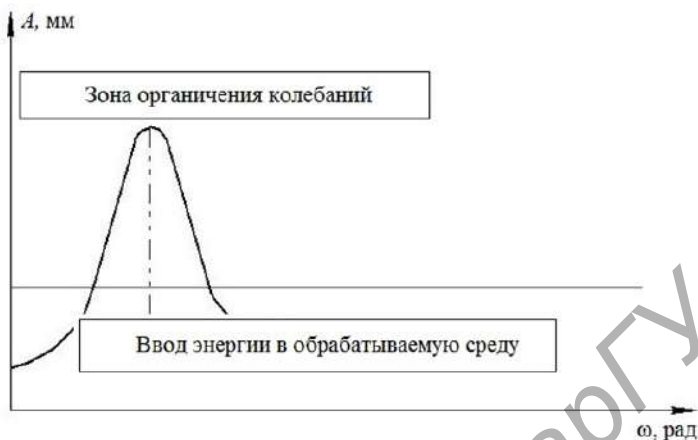


Рисунок 5.4 — Графическая интерпретация концепции управляемых колебаний рабочих органов пружинных мельниц

Здесь в координатах «амплитуда колебаний  $A$  — частота колебаний  $\omega$ » показано, что в режиме резонанса амплитуда имеет максимальное значение. Очевидно, что для реальных условий целесообразно ограничить значения амплитуды до некоторого оптимального значения  $A_q$ , а введенную в рабочий орган энергию при этом передавать в перерабатываемую среду на совершение полезной работы [157]. На практике это легко обеспечивается выбором соответствующих зазоров между стенками рабочей камеры и элементами пружинных рабочих органов, а также оснащением конструкции специальными демпферами и ограничителями.

Поглощение этой энергии может производить как сам обрабатываемый материал, что можно регулировать его физико-механическими свойствами и реологией, так и конструктивные элементы в мельнице: корпус, отбойники, рабочие органы, ограничители колебаний и др.

Анализируя приведенную графическую зависимость, можно сделать вывод, что исходя из условий оптимизации работы пружинной мельницы наиболее целесообразно управлять частотой колебаний рабочих органов, а не их амплитудой.

### 5.3 Теоретические исследования рабочего процесса агрегатов с пружинными рабочими органами

*Анализ напряженно-деформированного состояния пружинного рабочего органа.* В общем виде аппарат представляет собой установленную в опоры вращения и изогнутую пружину, связанную с приводом и помещенную в рабочую камеру с обрабатываемым материалом.

Расчет геометрических параметров включает в себя расчет длины винтовой линии ( $L$ ), угла между рабочими поверхностями витков (угол захвата —  $\alpha$ ), среднего диаметра пружины ( $D_{\text{ср}}$ ), индекса пружины ( $C$ ), равного отношению среднего диаметра пружины к диаметру сечения прутка ( $d$ ), центрального угла изгиба оси пружины рабочего органа ( $j$ ),  $\beta$  — угол, определяющий положение разрушаемой частицы относительно центральной оси пружины, определение характеристик и параметров пружины, которые изменяются при попадании в межвитковые пространства частиц обрабатываемого материала.

Для расчета геометрических параметров пружинного рабочего органа воспользуемся рисунком 5.5.

В начале расчета определяется диаметр сечения проволоки с учетом исходного размера частиц  $D_{\text{max}} \leq (0,5 \dots 0,9)d$ , где  $D_{\text{max}}$  — размер частицы до измельчения, мм.

Расчет среднего диаметра пружины производится с учетом индекса  $C$ , который рекомендуется выбирать не менее  $9 \dots 11$  [20]:  $D_{\text{ср}} = dC = d(0,5 \dots 0,9)$ .

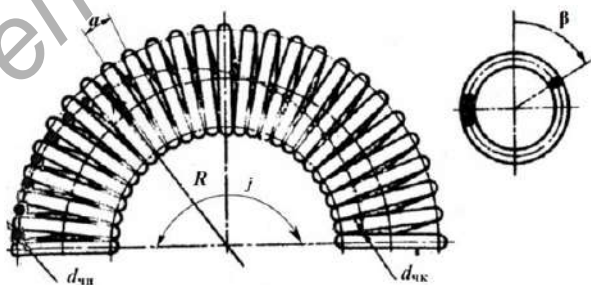


Рисунок 5.5 — Схема к расчету геометрических параметров пружинного рабочего органа

Для расчета длины винтовой линии воспользуемся выражением  $L = \frac{\pi D_{cp} i}{\cos \alpha}$ , где  $i$  — число витков пружины.

Для расчета угла захвата  $\alpha$  воспользуемся зависимостью [208]

$$\cos \alpha = \cos \frac{2\pi}{i} + i^2 \frac{\left(1 - \cos \frac{2\pi}{i}\right) \cos^2 \beta}{\left(\frac{R}{r} + \cos \beta\right)^2 + i^2},$$

где  $\beta$  — угол, определяющий положение частицы на поверхности пружины относительно ее средней линии, град.

Усредненный угол захвата легко определяется по формуле  $\alpha = \frac{j}{i}$ , где  $j$  — центральный угол изгиба оси пружины, град.

В таблице 5.2 приведены геометрические параметры пружинных рабочих органов.

Т а б л и ц а 5.2 — Параметры пружинных рабочих органов

Номер пружины	Обозначение	Диаметр проволоки $d$ , мм	Наружный диаметр пружины $D$ , мм	Шаг навивки $h$ , мм	Длина пружины $l$ , мм	Число витков $n$ , мм
1	МЛ005.00.006	2,5	20	2,5	130	$52 \pm 1$
2	МСЛ025.03.002	4,0	40	4,0	232	$56 \pm 1$
3	МСЛ55.00.00.007	5,0	55	5,0	330	$66 \pm 1$
4	МЛ1.00.00.022	5,0	55	5,0	550	$109 \pm 1$
5	МЛ1.00.00.023	6,0	55	6,0	552	$92 \pm 1$
6	СММ 00.00.005	6,0	64	6,0	246	$41 \pm 1$
7	СММ 00.00.012	5,5	64	5,5	248	$45 \pm 1$
8	СММ 00.00.013	5,0	55	15,0	260	$20 \pm 1$
9	СО 1.00.006	6,0	60	6,0	260	$43 \pm 1$
10	Д80 1.00.037	8,0	84	8,0	628	$78 \pm 1$
11	СМ1 00.00.048	8,0	105	8,0	590	$74 \pm 1$
12	МПС .1 08.001	10,0	105	10,0	640	$68 \pm 1$
13	МЗ105 00.007	10,0	105	13,0	572	$44 \pm 1$
14	СВС40	10,0	120	10,0	700	$70 \pm 1$

В таблице 5.2 представлены только те рабочие органы, которые изготавливались. Нами разработан также целый ряд рабочих органов больших типоразмеров с диаметром сечения  $d = 12 \dots 15$  мм (или заменяющего его профильного сечения) и наружным диаметром  $D = 120 \dots 150$  мм.

Износ рабочих поверхностей витков спирали приводит к изменению величины смещения  $e$  оси пружины в исходном, т. е. статическом, положении относительно ее положения в безыносном состоянии. При этом длина пружины уменьшается, ее ось вжимается в эллипс меньшего размера.

Схема для расчета пружины при попадании частиц между витками и характер изменения  $s$  с учетом износа представлены на рисунке 5.6.

В целях упрощения определения основных силовых параметров рабочего органа в работе предлагается методика расчета рабочего органа, основанная на использовании концепции эквивалентного стержня. Приняты следующие допущения [208]:

1) в целях упрощения расчетов винтовую пружину можно заменить гибким эквивалентным брусом, гипотетическая ось которого совпадает с осью пружины, которая в случае деформирования существенно искривляется, а также растягивается или укорачивается;

2) эквивалентный брус наделяется жесткостными характеристиками, соответствующими жесткостным характеристикам реальной пружины;

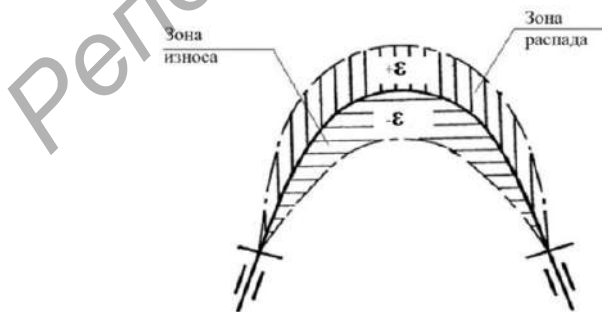


Рисунок 5.6 — Характер изменения величины смещения  $e$  пружины с учетом износа

3) величины жесткостных характеристик не являются постоянными величинами и зависят от степени деформации пружины;

4) при возникновении контакта витков в сжатой зоне пружины при ее изгибе жесткостные характеристики изменяются скачком.

Отметим, что использование эквивалентного бруса уступает в точности известной методике расчета пружины как пространственного бруса, однако позволяет довести задачу до числового выражения при меньших вычислительных затратах.

Примем допущение, что ось пружинного рабочего органа является плоской кривой. В деформированном состоянии образующая цилиндрическая поверхность, на которую навита деформированная ось проволоки, является частью тора.

В расчетах примем следующие обозначения:

$G$  — модуль упругости второго рода для стали, МПа;

$E$  — модуль упругости первого рода для стали, МПа;

$\mu$  — коэффициент Пуассона;

$B$  — жесткость поперечного сечения проволоки при изгибе, Н/м;

$C$  — жесткость поперечного сечения проволоки при кручении, Н/м;

$h$  — шаг пружины в зависимости от угла изгиба пружины, мм;

$H$  — длина оси рабочей части пружины в деформированном состоянии, мм;

$$i_p \text{ — число рабочих витков пружины: } h = \frac{H}{i_p} = \frac{\pi R}{i_p}.$$

Ограничив область исследований одним витком пружины, с учетом достаточной точности положим, что угол подъема витков мал ( $\operatorname{tg} \alpha \gg \alpha$ ). Определение жесткостных характеристик эквивалентного стержня с использованием интеграла Мора сводится к формулам, соответственно, жесткостей, определенных для единичной длины оси винтового бруса (эквивалентного бруса):

$$A_p = \frac{Gd^4}{8D_{cp}^3} h(S) = \frac{Ed^4}{16D_{cp}^3 (1 + \mu)} h(S), \text{ где } A_p \text{ — осевая жесткость}$$

$$\text{эквивалентного бруса. } A_{изг} = \frac{d^4 E}{32D_{cp}^2 (2 + \mu)} h(S), \text{ где } A_{изг} \text{ — жесткость}$$

$$\text{на изгиб. } A_{сдв} = \frac{d^4 E}{8D_{cp}^2} h(S), \text{ где } A_{сдв} \text{ — жесткость на сдвиг.}$$

В случае наличия контакта между витками жесткостные характеристики эквивалентного стержня изменяются скачкообразно и окажут существенное влияние на изгибную жесткость. При условии, что перемещение концевое сечения из плоскостей невозможно, раскрывая статическую неопределенность и преобразовывая, получим:  $A_{изг}^k = kA_{изг} \frac{h(S)}{\pi R} \frac{BC}{C+B} k$ , где  $k = \frac{3B+C}{2(C+B)}$ .

Для круглого сечения с учетом момента инерции:

$$\left. \begin{aligned} B &= EJ_{кр} = E \frac{\pi d^4}{64}; \\ C &= GJ = \frac{E}{2\mu} \frac{\pi d^4}{32}; \\ \frac{B}{C} &= \frac{1}{1+\mu} \end{aligned} \right\} k = \frac{3B(1+\mu) + B}{2B(1+\mu) + 2B} = \frac{4+3\mu}{4+2\mu} > 1.$$

Наиболее важным параметром при изучении работы пружинного рабочего органа является усилие обжатия  $P_k$ , которое определяется на основе расчетной схемы взаимодействия рабочего органа с обрабатываемым материалом. При этом рассмотрим частицу материала между боковыми поверхностями витков. Схема составлена без учета малых колебаний, возникающих на рабочих поверхностях витков. Механизм такого акта разрушения приведен на рисунке 5.7.

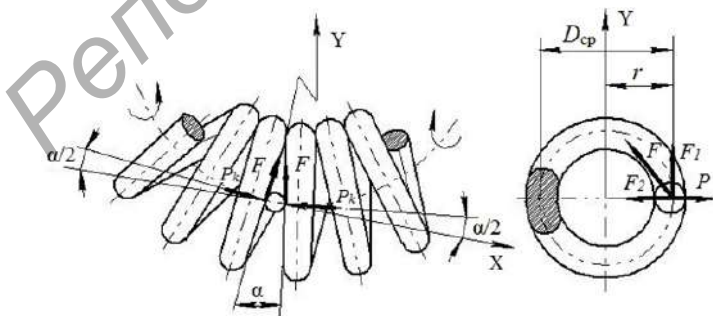


Рисунок 5.7 — Расчетная схема взаимодействия рабочего органа с обрабатываемым материалом

Для правильного выбора конструктивных параметров пружинного рабочего органа и усилия обжатия  $P_k$  в том числе необходимо выполнение условия обязательного разрушения частицы материала (рисунки 5.8, 5.9).  $P_k \geq P_{kmax}$ , где  $P_k$  — усилие обжатия материала между витков, Н;  $P_{kmax}$  — предельное усилие обжатия на разрушение, Н.

В соответствии с интегралом Мора запишем:

$$P_k = \delta \frac{BC}{\pi R^3 (C-B)} + \frac{M}{R} + \frac{2B}{C-B} N,$$

где  $B$  — размер частицы измельчаемого материала, мм;

$M$  — изгибающий момент, действующий в пружине, Н · м;

$N$  — нормальная сила, Н.

При отсутствии внутренних силовых факторов  $M$  и  $N$ , например, в случае ненагруженной пружины, изготовленной без межвиткового зазора, попадание частицы в межвитковое рас-

стояние вызывает усилие  $P_k$ :  $P_k = \delta \frac{BC}{\pi R^3 (C-B)}$ .

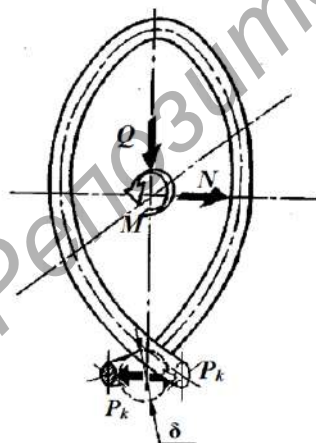


Рисунок. 5.8 — Схема сил, действующих на виток пружины в процессе измельчения

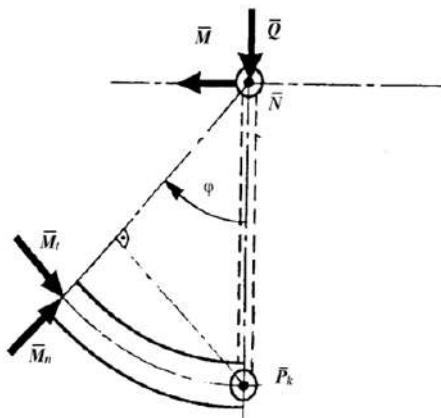


Рисунок 5.9 — Схема сил, действующих на фрагмент витка пружины

Отметим, что данные зависимости справедливы в предположении, что размер частицы мал по сравнению с характерными размерами пружины, попадание частицы в межвитковое пространство не приводит к существенному изменению геометрии пружины.

Для решения полученной нелинейной краевой задачи применяются алгоритмы, основанные на использовании методов непрерывного или дискретного продолжения решения по параметру.

Алгоритм реализован в виде пакета прикладных программ.

Результаты численных расчетов усилия разрушения между витками для используемых в лабораторных и промышленных условиях пружин, характеристики которых соответствуют данным таблицы 5.2, приведены на рисунке 5.10.

Расчёты показывают, что увеличение угла изгиба оси пружинного рабочего органа приводит к значительному росту усилия разрушения. При вращении рабочего органа, на материал со стороны витков по нормали к их боковым поверхностям действуют силы  $P_k$ . За счет вращения по окружности частица, имеющая некоторую массу, получает центробежную силу инерции  $P$ , которая направлена от оси вращения рабочего органа.

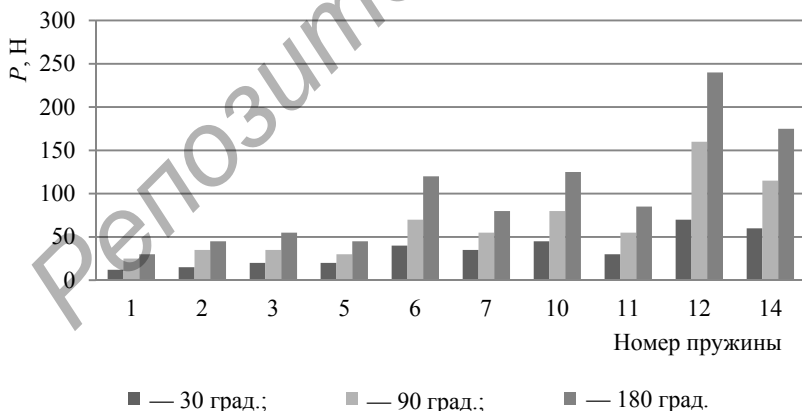


Рисунок 5.10 — Результаты численных расчетов усилия разрушения между витками пружин

Сила обжатия  $P_k$  и центробежная  $P$  вызывают силу трения  $F$ . Направление силы трения в пространстве зависит от соотношения сил  $P_k$  и  $P$ . Систему координат выбираем таким образом, чтобы начало ее располагалось на оси вращения пружины  $Z$  и по направлению совпадало с центробежной силой  $P$ , а ось  $Y$  в плане являлась биссектрисой угла  $\alpha$ .

Для определения критического значения частоты вращения пружины  $\omega$  и угла захвата  $\alpha$  применим принцип Даламбера. Запишем условия равновесия действия сил на частицу измельчаемого материала:

$$\begin{cases} \sum x = P_k \cos \frac{\alpha}{2} - P_k \cos \frac{\alpha}{2} + F_1 \sin \frac{\alpha}{2} - F_1 \sin \frac{\alpha}{2} = 0, \\ \sum y = 2F_1 \cos \frac{\alpha}{2} - 2P_k \sin \frac{\alpha}{2} = 0, \\ \sum z = m\omega^2 r - 2F_2 = 0. \end{cases}$$

Подставив недостающие выражения и преобразовав, получим формулу определения угла захвата при условии обеспечения защемления частицы:

$$\alpha = 2 \operatorname{arctg} \sqrt{f^2 - \frac{m^2 \omega^4 r^2}{4P_k^2}},$$

где  $f$  — коэффициент трения между материалом и поверхностью пружины;

$m$  — масса частицы, г;

$r$  — радиус вращения, мм.

Средний диаметр пружины  $D_{cp}$  с учетом того, что  $D_{cp} = 2r$ , найдем из выражения

$$D_{cp} = \frac{4P_k}{m\omega^2} \sqrt{f^2 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}.$$

Частоту вращения  $\omega$  находим из выражения

$$\omega = \sqrt{\frac{4P_k^2}{m^2 r^2} \left( f^2 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \right)}.$$

Максимальное усилие обжатия, необходимое для разрушения материала, можно определить по формуле  $P_{\text{кmax}} = \frac{\sigma b}{1,9E_m S} (D_i^2 - d_i^2)$ ,

где  $\sigma$  — прочность материала на сжатие, МПа;  $b$  — ширина зоны дробления (принимается равной диаметру  $D_i$  частицы материала до измельчения, входящей в межвитковое пространство) при максимальном шаге пружины, мм;  $S$  — разность между диаметром  $D_i$  и минимальным шагом пружины, т. е. величина деформации пружины, мм;  $d_i$  — диаметр раздробленной частицы, мм.

Время нахождения частиц в зоне воздействия рабочего органа на основе расчетной схемы определяется выражением  $t = \frac{\omega}{\varphi}$ ,

где  $\omega$  — угловая скорость вращения винтовой спирали,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\varphi$  — центральный угол дуги, определяющий начало и окончание нагружения частицы, град.

Легко видеть, что реальное время нагружения частиц очень мало, особенно при переработке мелкодисперсных материалов, и может составлять  $t = 0,0005 \dots 0,1$  с, для скоростей вращения рабочих органов  $250 \dots 3\,000$   $\text{с}^{-1}$ .

Анализируя полученные результаты, следует сделать вывод, что увеличение диаметра рабочего органа и частоты его вращения, а также снижение крупности исходного материала являются основными факторами уменьшения времени воздействия. Это необходимо для изменения характера воздействия на перерабатываемую среду различной физической природы.

Для практических целей представляет интерес вариант исполнения пружинной мельницы, когда один из концов рабочего органа свободно контактирует с опорной поверхностью. Это позволяет отказаться от подшипниковой опоры для работы с малоабразивными материалами. Схема установки пружины в рабочей камере для такого случая приведена на рисунке 5.11, а схема пружины с геометрическими параметрами — на рисунке 5.12.

Определим усилие прижатия консольной части пружины к корпусу мельницы. Рассмотрим изгиб пружинного рабочего органа длиной  $L$ , радиусом изгиба геометрической оси  $\rho_0$ , средним диаметром  $D_0$ , диаметром поперечного сечения витка  $d$  и величиной центрального угла изгиба  $\gamma$ .

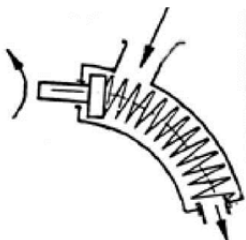


Рисунок 5.11 — Схема пружины со сводным концом

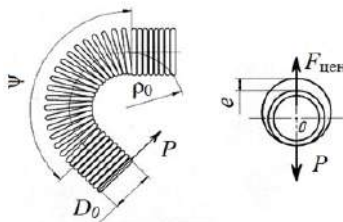


Рисунок 5.12 — Схема пружины с геометрическими параметрами

Усилие, возникающее от изгиба рабочего органа, определяется зависимостью

$$P = \lambda \frac{Ed^4}{16(1+\mu)D_0^3z}, \quad (5.1)$$

где  $\lambda$  — удлинение геометрической оси рабочего органа, мм;  
 $E$  — модуль упругости материала спирали, ГПа (для стали  $E = 200$  ГПа);  
 $d$  — диаметр поперечного сечения витка, мм;  
 $\mu$  — коэффициент Пуассона (для стали равен 0,3).

Для определения удлинения геометрической оси рабочего органа воспользуемся зависимостью

$$\lambda = \frac{D_0 d_i}{2\rho_0 - D_0}. \quad (5.2)$$

Величина усилия прижатия консольной части пружины с учетом (5.1) и (5.2) будет определяться из выражения

$$P = \frac{Ed^5}{16(1+\mu)[2(\rho_0 - x) - D_0]D_0^2},$$

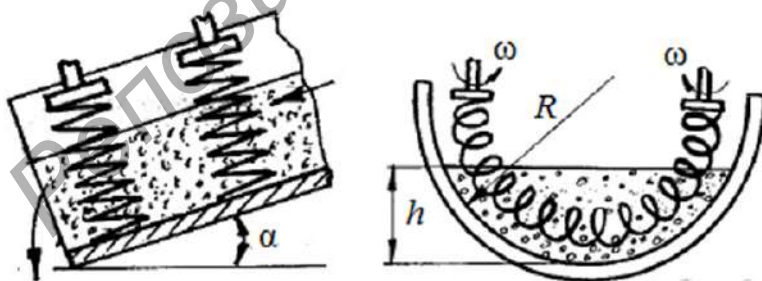
где  $x$  — величина отклонения витков консольной части пружины от исходного положения, мм.

При вращении пружины геометрический центр витка в поперечной плоскости будет смещаться на величину  $x$ , максимум которой соответствует эксцентриситету  $e$ .

Полученные аналитические зависимости могут быть использованы при проектировании различных видов пружинных измельчителей с учетом свойств перерабатываемых материалов, условий и режимов их работы. Они являются основой для дальнейшего развития конструкторско-технологической базы при создании новых конструкций пружинных аппаратов многоцелевого назначения.

*Определение производительности аппарата с корытообразным корпусом.* Для расчетов воспользуемся рисунком 5.13. Отметим основной вариант выполнения, когда корпус неподвижен и установлен к горизонту под углом  $\alpha$ , а движение материала осуществляется за счет импульсов от рабочих органов, а также посредством сил гравитации и изменения реологической обстановки в аппарате (тиксотропного разжижения).

Производительность аппарата можно определить на основе выражения  $Q = F\nu\rho k_p$ , где  $F$  — площадь сечения перемещающегося потока материала,  $m^2$ ;  $\rho$  — объемная масса материала,  $kg/m^3$ ;  $k_p$  — коэффициент разрыхления материала,  $k_p = 0,50 \dots 0,6$ .



а) — продольное сечение; б) — поперечное сечение

Рисунок 5.13 — Схема к расчету производительности аппарата с корытообразным корпусом

С учетом формы поперечного сечения движущегося потока материала, представляющего собой сегмент с длиной хорды  $A$  и высотой слоя  $h$  и перекрываемого самим рабочим органом, найдем  $F$ :

$$F = \pi \left( \frac{A^2 + 4h^2}{8h} \right) \frac{\varphi}{180} - \frac{1}{2} A(R_1 - h) - Ddz_1,$$

где  $\varphi$  — центральный угол, соответствующий хорде длиной  $A$ , град;

$R_1$  — внутренний радиус корпуса, мм;

$D$  — наружный диаметр пружины, мм.

Число рабочих витков определяется из выражения

$$z_1 = \frac{(A - 2D)^2 + 4(h - D)^2}{8(h - D)} \frac{\varphi \pi}{180 d},$$

где  $d$  — диаметр сечения витка, мм.

Следует заметить, что высота слоя материала в корпусе должна быть больше наружного диаметра  $D$  пружины. Это необходимо для улучшения заполнения рабочего пространства между витками. Вследствие малости амплитуды колебаний пружины в сравнении с обрабатываемым объемом материала ее роль в определении производительности не учитывается.

Считаем, что движение материала происходит в направлении, перпендикулярном осям рабочих органов вдоль продольной оси корпуса. Объем материала, перемещаемого за один оборот рабочего органа, принимаем равным объему пространства между витками  $V_p$  на основе разностей объемов тора  $V_{HT}$  с радиусом поперечного сечения  $D$  и тора  $V_{BT}$  с радиусом поперечного сечения  $(D - d)$  и объема, занимаемого, соответственно, пружинной  $V_{пр}$ :

$$V_p = V_{HT} - V_{пр} = \varphi \left( R_1 - \frac{D}{2} \right) \frac{\pi D^2}{4} - \varphi \left( R_1 - \frac{D}{2} \right) \frac{\pi (D - d)}{4} - z_1 \pi \frac{d^2}{4} \pi D,$$

где  $R_1$  — радиус изгиба рабочего органа, мм.

Остальные параметры взяты из предшествующего расчета.

Тогда производительность аппарата определяется из выражения  $Q = V_{\text{рп}} n k_{\text{р}} k_{\text{п}}$ , где  $k_{\text{р}}$  — коэффициент разрыхления обрабатываемого материала;  $k_{\text{п}}$  — коэффициент, учитывающий изменение производительности от изменения угла  $\alpha$  наклона корпуса, влажности, крупности и некоторых других характеристик,  $k_{\text{п}}$  определяется экспериментально.

Приведенные зависимости производительности являются базовыми для расчетов пружинных аппаратов. Остальные расчеты можно производить по известным методикам, изложенным в работе [208]. Часть недостающих для определения производительности данных определяется экспериментальным путем.

Резюмируя полученные результаты расчета производительности пружинных аппаратов, можно сделать главный вывод, состоящий в том, что их производительность в условиях интенсивных виброколебаний практически во всех случаях возрастает за счет увеличения объемов подвергаемого обработке материала.

*Определение мощности привода пружинной мельницы.* Мощность, необходимую для устойчивой работы пружинного рабочего органа, можно рассчитывать по методике, изложенной в [157]. Особенность поведения пружины в условиях интенсивных виброколебаний вносит свои коррективы в расчет, что выражается в увеличении объемов одновременно обрабатываемого материала, повышению зазоров между витками и укрупнения разрушаемых частиц материала [181]. Расчетная схема взаимодействия рабочего органа с обрабатываемым материалом приведена ранее (см. рисунок 5.7).

Максимальное усилие измельчения можно определить по формуле [208]

$$P_{k\text{max}} = \frac{\sigma^2 B}{1,9ES} (D_1^2 - d_1^2), \quad (5.3)$$

- где  $B$  — ширина зоны измельчения, равная диаметру сечения пружины или диаметру  $D_1$  частицы материала, мм;  
 $S$  — величина деформации пружины, т. е. разность между диаметром  $D_1$  и минимальным шагом пружины, мм;  
 $D_1, d_1$  — максимальный и минимальный размеры частиц измельчаемого материала, т. е. исходный и измельченный продукт, мм.

С учетом формулы (5.3) условие разрушения куска можно записать в виде

$$\frac{Hd^4}{32D_{\text{cp}}R^2i^2} \frac{E}{2+\mu} \geq \frac{\sigma^2 B}{1,9ES} (D_1^2 - d_1^2), \quad (5.4)$$

где  $H$  — высота (длина) пружины, мм.

Анализ формулы (5.4) показывает, что для обеспечения условия разрушения материала необходимо увеличить, прежде всего, диаметр сечения витков пружины, уменьшить средний диаметр пружины или радиус ее изгиба.

Следует отметить, что полученные зависимости описывают процесс измельчения в статике. Но в реальных условиях эксплуатации воздействие на материал будет в динамическом режиме, а это означает, что рабочий орган способен измельчить частицы более прочные или большей крупности.

Решая неравенство (5.4) относительно  $\sigma$ , получаем значение прочности материала на сжатие:

$$\sigma \leq Ed^2 \sqrt{\frac{1,9HS}{32D_{\text{cp}}R^2i(2+\mu)(D_1^2 + d_1^2)}}. \quad (5.5)$$

Примечательно, что если условие (5.5) не будет выполняться, то обрабатываемый материал не будет измельчаться. Устройство при этом превращается в транспортер или смеситель, но условия его работы ухудшаются вследствие возникновения повышенных колебаний, так как прочие частицы будут расклинивать витки пружины и сообщать дополнительные перемещения.

Анализ полученных расчетных формул показывает, что для осуществления размола более крупных частиц необходимо увеличить или угол захвата  $\alpha$  и частоту вращения  $\omega$ , средний диаметр спирали  $D_{\text{cp}}$ , или принудительно раздвигать витки путем их колебаний.

Суммарный крутящий момент, необходимый для вращения в материале пружинного рабочего органа при условии измельчения, определяется из формулы  $M_{\text{сум}} = M_1 + M_2 + M_3 + M_4$ , где

$M_1$  — момент, необходимый для разрушения материала, попадающего в межвитковые пространства, Н · м;  $M_2$  — момент, необходимый для преодоления сил трения при качении витков пружины друг по другу в случае их соприкосновения, в том числе через слой материала, Н · м;  $M_3$  — момент, необходимый для преодоления потерь при колебаниях в материале рабочего органа (внутреннее трение) и в опорных витках (конструктивное трение) и вращение пружины как гибкого вала. Вследствие малости последними пренебрегаем [60]. Момент, связанный с колебаниями, может быть достаточно большим, но его определение аналитически затруднено и требует экспериментальных исследований, Н · м;  $M_4$  — момент, необходимый для вращения рабочего органа в смеси с учетом сил сопротивления перемещению, Н · м.

Для определения  $M_1$  воспользуемся формулой расчёта работы  $A$  при дроблении материалов, которую приводит Л. В. Левинсон [82]:

$$A = \frac{\sigma^2 V}{2E}, \quad (5.6)$$

где  $V$  — объем разрушаемого материала, м<sup>3</sup>.

Формула (5.6) не отражает степени измельчения, для учета которой в формулу подставляется вместо  $V$  объем измельчаемого материала в межвитковом пространстве:  $V = V_{\text{ед}}^* m$ .

Вычислим рабочий объем пространства, занимаемого материалом между витками с учетом того, что рабочая зона равна

половине дуги окружности:  $V_{\text{ед}}^* = \frac{\pi \pi B_1}{3 \cdot 8} (d_{\text{max}}^2 + d_{\text{min}}^2 + d_{\text{max}} d_{\text{min}})$ .

Введем поправку на степень заполнения объема материалом:

$V_{\text{ед}}^* = K_3 \frac{\pi \pi D_1}{3 \cdot 8} (d_{\text{max}}^2 + d_{\text{min}}^2 + d_{\text{max}} d_{\text{min}})$ , где  $K_3 = 0,3 \dots 0,4$  — коэф-

фициент заполнения межвитковых пространств. Число рабочих органов зон равно числу витков винтовой пружины  $i$  за вычетом единицы  $m = i - 1$ .

Тогда объем обрабатываемого материала с учетом коэффициента увеличения заполнения межвитковых пространств при

колебаниях рабочего органа  $K_K$   $V = \frac{K_3 \pi^2 D_1 (i-1)}{24} (d_{\text{max}}^2 + d_{\text{min}}^2 +$

+  $d_{\max} d_{\min}$ )  $K_K$ , где  $K_K$  в первом приближении можно принять равным 1,05...1,1.

Отсюда работа разрушения  $A = \frac{K_3 \sigma^2 \pi^2 D_1 (i-1)}{48E} (d_{\max}^2 + d_{\min}^2 + d_{\max} d_{\min}) K_K$ . Тогда крутящий момент на приводном валу  $M_1 = \frac{K_3 \sigma^2 \pi^2 D_1 (i-1)}{48E} (d_{\max}^2 + d_{\min}^2 + d_{\max} d_{\min}) K$ .

Необходимо отметить, что рассчитанный по данной формуле крутящий момент на валу привода имеет завышенное значение. Это объясняется тем, что при вращении пружины в межвитковые пространства попадают не все частицы материала, которые были учтены при определении объема разрушаемого материала, а только некоторая часть. Это следует учесть поправочным коэффициентом  $K$ , который показывает, какая часть материала реально участвует в измельчении между боковыми поверхностями витков пружины от теоретически возможной  $K = 0,3 \dots 0,5$ .

Величина  $M_2$  определяется как произведение сил трения качения частиц материала о витки пружины на расстояние от точки контакта витков до оси вращения:  $M_2 = P_k f r i K_{yc}$ , где  $P_k$  — давление витков пружины или сила сжатия материала, Н;  $f$  — коэффициент трения при качении витков пружины друг по другу или по материалу,  $f = 0,05 \dots 0,08$ ;  $r$  — расстояние от точки контакта витков до оси вращения, мм;  $i$  — число контактирующих между собой витков пружины;  $K_{yc}$  — коэффициент увеличения значений  $P_k$ , обусловленный колебаниями витков пружины.  $K_{yc}$  следует принимать равным 1,1...1,3.

Величину  $M_4$  на основании рекомендаций [82], а также с учетом собственных калориметрических расчетов можно принимать равной 0,5...1,5 % от суммарной мощности, необходимой на привод рабочего органа.

В расчетах потребляемой мощности не рассмотрены случаи заклинивания рабочего органа в помольной камере. Это отражено в [208].

Величину  $M_4$  приближенно можно оценить по формуле К. М. Королева, приведенной в [76]:  $M_4 = k_{\text{пер}} F R$ , где  $k_{\text{пер}}$  — коэффициент сопротивления перемещению;  $F$  — фронтальная площадь рабочей части пружины, м<sup>2</sup>;  $R$  — средний радиус вращения, мм.

Коэффициент  $k_{\text{пер}}$  выбирается на основании экспериментальных данных. Фронтальную площадь рабочей части пружины можно определить как произведение длины винтовой линии  $S$  и увеличения зоны захвата материала, определяемой амплитудой колебаний.

Длина винтовой линии пружины для упрощения расчетов с небольшой погрешностью может быть найдена по формуле

$$S = \frac{\pi D_{\text{ср}} i}{\cos \alpha},$$
 где  $D_{\text{ср}}$  — средний диаметр пружины, мм;  $i$  — число витков;  $\alpha$  — угол подъема винтовой линии, град.

Суммарная расчетная мощность двигателя, необходимая для вращения пружины как рабочего органа мельницы с учетом всех сил сопротивления, может быть определена по формуле

$$N = \frac{M_{\text{сум}} \omega}{\eta},$$
 где  $M_{\text{сум}}$  — суммарный крутящий момент, Н · м;

$\omega$  — угловая скорость рабочего органа, с<sup>-1</sup>;  $\eta$  — КПД привода, который можно принимать равным 0,93...0,95.

Расчет потребляемой мощности при работе кинематически деформируемых рабочих органов реализован в виде пакета прикладных программ. Некоторые результаты численных расчетов будут приведены ниже для сравнения результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Сопоставительный анализ потребляемой мощности, рассчитанной для работающих в одинаковых условиях пружинных мельниц, показывает, что генерирование интенсивных виброколебаний путем вывода рабочих органов в резонансный или управляемый режим требует на 10...20 % большей мощности, чем аналогичные пружинные аппараты без форсирования их работы.

#### **5.4 Экспериментальные исследования помольных агрегатов с пружинными рабочими органами**

Исследование закономерностей при взаимодействии с обрабатываемой средой кинематически деформируемого рабочего органа целесообразно начинать с исследования влияния параметров пружинных рабочих органов на межвитковое усилие обжатия.

Основным параметром, определяющим интенсивность силового воздействия пружинного рабочего органа на измельчаемый материал, является усилие обжатия витков. Косвенно это усилие можно определить по усилию протяжки стальной ленты между витками пружины при различном ее деформировании (угле изгиба).

Для реализации этого способа был разработан специальный стенд, который предназначен для определения межвиткового усилия обжатия между смежными витками рабочего органа (пружины). Схема стенда представлена на рисунке 5.14.

Стенд состоит из рамы 1, установленной на подвижном столе 2 вертикально-сверлильного станка (2Н118), который имеет механизм подъема 3. Смонтированный на раме привод 4 имеет барабан 5, связанный посредством каната с динамометром 6 и испытательной лентой 7, проходящей через фиксирующее нагрузочное устройство 8 между витками пружины 9, 10, и контрольно-нагрузочный динамометр сжатия 11 (ДОС-01), жестко зафиксированный в патроне 12, а также пульт управления приводом 13 с таймером 14.

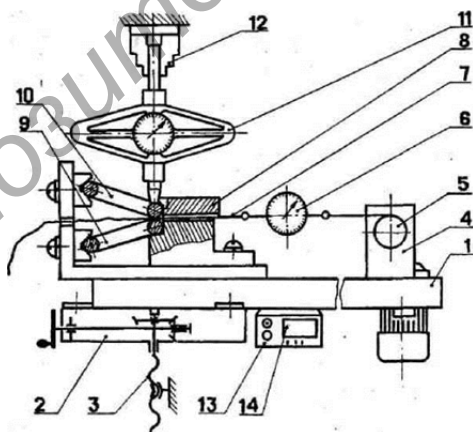


Рисунок 5.14 — Схема испытательного стенда для определения межвиткового усилия

Стенд работает следующим образом. В фиксирующее нагру- зочное устройство 8 устанавливаются витки контролируемой пружины 9, 10, а между ними помещается стальная термически обработанная испытательная лента 7. Натяжение и протаскива- ние ленты осуществляется приводом 4 от барабана 5 через канат с динамометром 6, контролирующим силу натяжения, возника- ющую от силы трения при прижатии ленты 7 к боковым рабо- чим поверхностям витков 9, 10 посредством контрольно-на- грузочного динамометра 11. Движение испытательной ленты 7 осуществляется с постоянной скоростью в пределах от 0,005 до 0,2 м / с. Подбор скорости осуществляется путем замены бара- бана 5 различного диаметра.

Регулировка межвиткового усилия осуществляется подъемом или опусканием стола 2 посредством винтового механизма 3.

Работой реверсивного привода 4 управляет пульт 13, а длина пути протяжки ленты 7 контролируется таймером 14.

Изменяя межвитковое усилие  $P$ , скорость протяжки ленты  $V$ , зазор между витками в расходящейся части или угол между ра- бочими поверхностями витков  $g$ , размеры рабочих витков ( $d$ ,  $D_p$ ) и другие параметры, получаем тарифовочные графические или табличные зависимости перечисленных выше параметров от силы трения  $F$ . Характеристики исследуемых пружинных рабо- чих органов приведены в таблице 5.2.

Эксперимент проводили на испытательном стенде, позволя- ющем получить тарифовочные графики для основных типов ра- бочих органов (таблица 5.3).

В ходе экспериментов была определена зависимость влияния механических свойств материала, из которого изготовлен рабочий орган, на усилие протяжки при изменяющемся усиллии обжатия.

Т а б л и ц а 5.3 — Соотношение усилия обжатия  $P_k$  и угла закрутки  $j_3$  торца рабочего органа

Угол закрутки $j_3$	60 исходный	75	90	105	120	135	150	165	180
Усилия обжатия $P_k$	80,0	76,2	72,9	69,0	66,5	63,9	60,8	56,6	52,5

Результат, отраженный на рисунке 5.15, указывает на различие усилия протяжки до 20 % для сталей 51ХФА, 65Г и стали 70. Это отклонение объясняется изменением коэффициента трения при изменении состояния рабочей поверхности витков пружины и поверхностной твердости материала пружины.

Следует отметить, что при соблюдении технологии изготовления рабочих органов и выбора испытательной ленты с более высокой твердостью по отношению к материалу пружины различие в усилиях протяжки отсутствует независимо от типа проволоки.

Из всего этого следует, что материал пружины и скорость протяжки не влияют на усилие протяжки ленты. Для упрощения исследований и уменьшения габаритов стенда была выбрана скорость протяжки  $v_n = 0,051$  м / с.

Определение зависимости влияния основных геометрических параметров пружин на контрольное усилие протяжки ленты также выполнено на описанном стенде.

Согласно таблице 5.2, испытанию подвергались пружины с диаметром проволоки  $d = 4 \dots 10$  мм, наружным диаметром  $D = 40 \dots 105$  мм и плотной навивкой.

Влияние межвиткового усилия обжатия на усилие протяжки контрольной ленты  $F$  для ряда пружин представлено на рисунке 5.16.

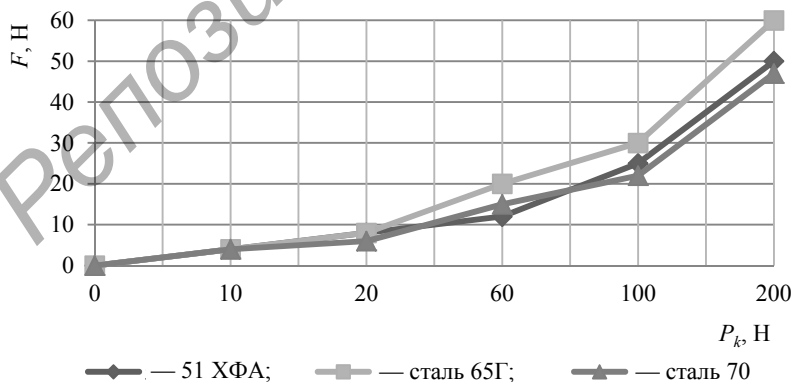


Рисунок 5.15 — Зависимость усилия протяжки от усилия обжатия

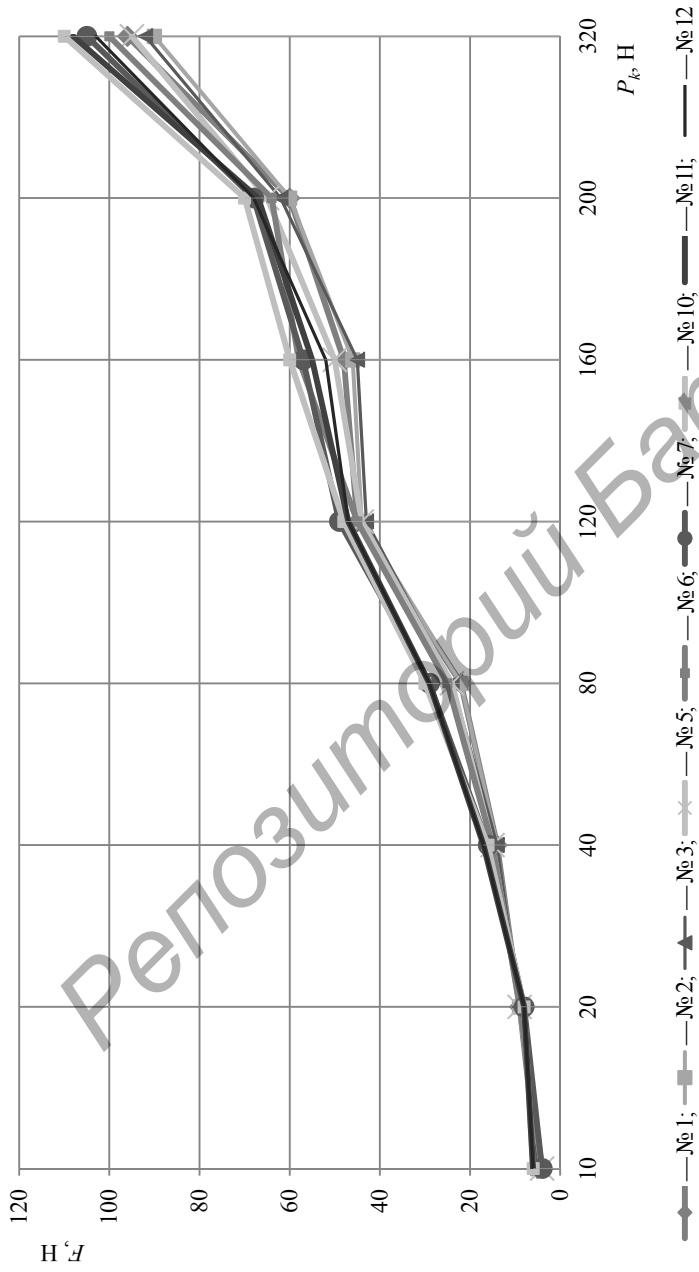


Рисунок 5.16 — Зависимость усилия протяжки от межвиткового усилия сжатия

Из зависимости (см. рисунок 5.16) следует, что значительного влияния геометрических параметров пружины на усилие протяжки  $F$  во всем диапазоне изменения межвиткового усилия обжатия  $P_k$  не наблюдается. Полученная тарировочная зависимость справедлива для соответствующей скорости протяжки, твердости, ширины и толщины ленты. В связи с этим в качестве контрольной индикаторной ленты была принята стальная лента из пружинной стали 65Г с твердостью 60 HRC, шириной  $b = 0,01$  м при толщине  $\varepsilon = 15 \times 10^{-5}$  м.

В случае применения этих условий испытаний можно по изменению  $F$  на натурном образце рабочего органа или аппарата определить монтажное или рабочее межвитковое усилие обжатия материала, подлежащего обработке.

В процессе проектирования и эксплуатации пружинных рабочих органов имеется необходимость прогнозировать  $P_k$  в зависимости от числа витков или угла изгиба пружины (производным является угол  $\alpha$  между рабочими поверхностями соседних витков). С этой целью была определена зависимость  $F$  от угла  $\alpha$  для различных  $P_k$  (рисунок 5.17).

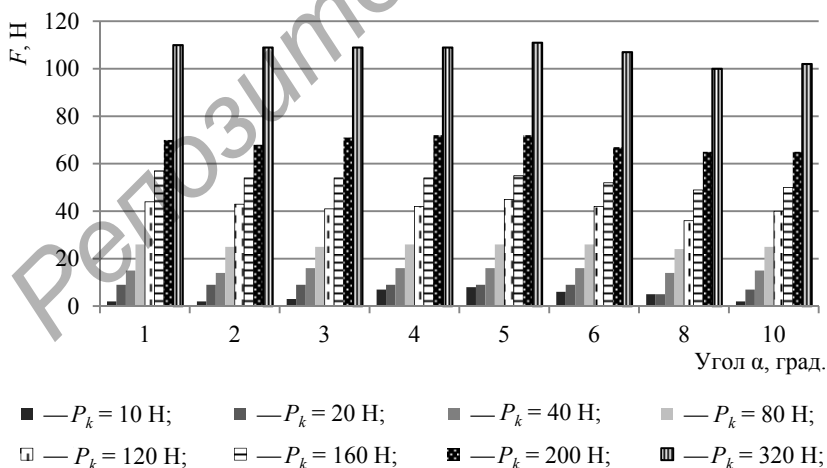


Рисунок 5.17 — Зависимость усилия протяжки от межвиткового угла

Уменьшение показателя  $F$  для угла  $\alpha = 6...10^\circ$  не существенно (4...8 %), тем более что угол изгиба витка  $\alpha = 6...10^\circ$  не является предпочтительным из-за малой усталостной прочности пружинного рабочего органа по причине значительных циклических напряжений, возникающих в сечении витка пружины.

Таким образом, установлено, что на усилие протяжки  $F$  влияют состояние рабочей поверхности витка пружины (твердость и шероховатость) и усилие прижатия рабочих поверхностей друг к другу  $P_k$ .

Расходимость теоретических и экспериментальных значений усилия обжатия  $P_k$  от крупности частиц для всех исследуемых типоразмеров рабочих органов (см. таблицу 5.2) оказалась не более 7...8 %.

Назначение величины усилия обжатия  $P_k$  при проектировании винтовых рабочих органов необходимо производить с учетом их износа и релаксационных изменений упругих свойств. К сожалению, оценить это математически пока не представляется возможным, что и побудило создать экспресс-метод учета этих явлений. В основу его положена идея контроля напряженно-деформационного состояния рабочего органа по контролю величины предельного угла закрутки одного из торцов единичной силой (моментом). При этом наблюдается достаточно устойчивая корреляционная зависимость между усилием обжатия  $P_k$  и углом закрутки торца спирали  $j_3$ .

Испытания проводились таким образом, что для работающего в среде кварцевого песка рабочего органа через определенные промежутки времени производились замеры параметров  $j_3$  и  $P_k$ . Разработаны рекомендации по выбору коэффициента  $r_3$ , учитывающего условия эксплуатации. При проектировании новых рабочих органов значения  $P_k$  следует увеличивать на величину  $r_3$ . Значение  $r_3$  рекомендуется принимать равным 1,2...1,5.

В качестве замечания при анализе реальных значений  $P_k$  следует отметить, что действующее в работающем рабочем органе усилие обжатия  $P_k$  всегда будет больше расчетного, так как под действием обрабатываемой среды и сил трения в опорах пружина будет закручиваться, что приведет к увеличению ее длины.

Визуальное наблюдение за работой пружинного рабочего органа осуществлялось на установке с прозрачной рабочей камерой, при этом изучалось движение потоков в прозрачном корпусе. Методом фотографирования регистрировалась картина движения потоков при различных частотах вращения рабочего органа (рисунок 5.18).

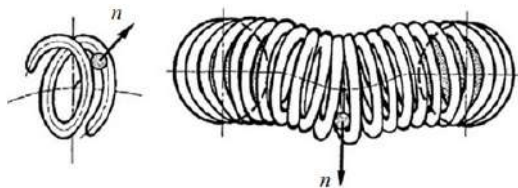
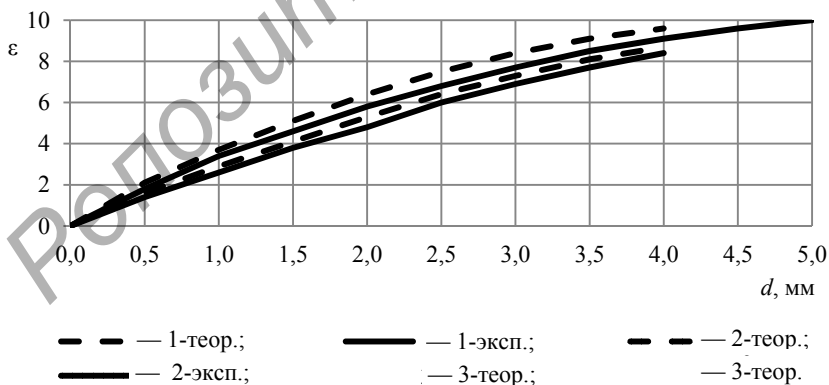


Рисунок 5.18 — Изменение кривизны рабочего органа при взаимодействии с частицами обрабатываемого материала

Из данного рисунка видно, что винтовая пружина, имея развитую поверхность, обеспечивает высокую турбулентность потоков, причем ею можно управлять как частотой, так и различного рода отражателями, лотками и т. д.

Нельзя обойти стороной и изменение геометрической оси пружинного рабочего органа в процессе его работы. Это связано с тем, что под действием реакций от разрушаемого материала ось рабочего органа изгибается в его плоскости, что иллюстрирует рисунок 5.18. Величина этих перемещений зависит от многих факторов, но, как правило, не превышает 0,1 среднего диаметра пружины  $D_{\text{ср}}$ .

Сопоставление экспериментальных и теоретических значений смещения оси спирали  $\varepsilon$  для рабочего органа СММ 00.00.012 представлено на рисунке 5.19.



$\varepsilon$  — штриховая линия — теория;  $\varepsilon$  — сплошная линия — эксперимент; 1 — угол изгиба оси рабочего органа 180°; 2 — угол изгиба оси рабочего органа 150°; 3 — угол изгиба оси рабочего органа 120°

Рисунок 5.19 — Результаты расчетов смещения оси пружины

Для исключения разного рода погрешностей (см. рисунок 5.19) в качестве мерных тел для заклинивания использовались куски проволоки, помещаемых в каждое межвитковое пространство. Меньшее значение величины  $\varepsilon$  для экспериментальных условий следует объяснить наличием бокового смещения оси спирали рабочего органа. Подобные закономерности характерны и для всех других рабочих органов. Отклонение теоретических и экспериментальных данных не превышает 5 %.

На рисунке 5.20 представлены результаты влияния крупности частиц на потребляемую мощность привода. Снижение потребляемой мощности после некоторого времени обработки объясняется измельчением крупных частиц, что снижает деформацию рабочих элементов.

Данные получены на лабораторной мельнице рабочим объемом 1 литр при измельчении известняка, имеющего прочность на сжатие  $R_{сж} = 100$  МПа.

Совместное влияние на потребляемую мощность крупности и прочности частиц приведено на рисунке 5.21.

Рост потребляемой мощности с увеличением диаметра и прочности частиц происходит из-за того, что частицы не разрушаются и «распирают» витки, вызывая повышенные затраты на их деформацию. Результаты получены на мельнице с рабочим объемом 5 дм<sup>3</sup>.

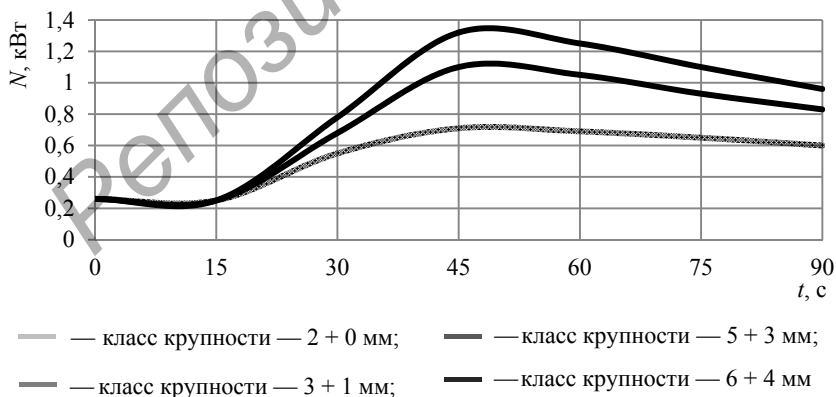


Рисунок 5.20 — Зависимость потребляемой мощности от крупности измельчаемых частиц

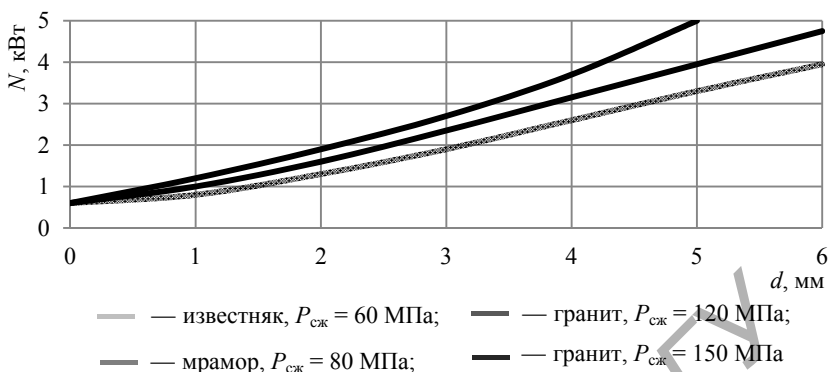


Рисунок 5.21 — Влияние на потребляемую мощность крупности и прочности частиц

Исследования влияния частоты вращения проводились на лабораторной установке с рабочим объемом  $V = 1$  дм<sup>3</sup>. Результаты экспериментов для кварцевого песка представлены в таблице 5.4.

Анализ полученных данных показывает, что наилучшие по качеству измельчения результаты достигаются при максимальной частоте вращения, а наихудшие — при минимальной. Изменение мощности объясняется, прежде всего, увеличением поперечных колебаний рабочего органа. Исследования процессов помола в трубчатом аппарате проводились на мельницах с диаметром отводов  $D_{отв} = 49 \dots 149$  мм, для всех типов аппаратов установлена высокая интенсивность обработки материалов средней крепости с исходной крупностью 5 мм до конечной крупности, соответствующей 50...80 % прохода продукта через сито № 016.

Т а б л и ц а 5.4 — Результаты исследований влияния частоты вращения рабочего органа на потребляемую мощность и тонкость помола

Частота вращения, мин	Режим холостого хода, Вт	Загрузка, % / Вт	Полный остаток $V$ , % на сите № 008 / потребляемая мощность, Вт		
			Время помола, мин		
			1	2	3
712	250	100 / 445	68,0 / 405	39,4 / 370	18,8 / 355
950	620	100 / 530	53,5 / 480	27,6 / 440	10,3 / 408
1 420	710	100 / 615	34,0 / 530	12,6 / 490	6,5 / 455
2 820	415	100 / 820	26,3 / 610	9,3 / 530	4,0 / 510

Энергозатраты при этом незначительны и не превышают 5 кВт · ч / т. Дальнейшее измельчение нецелесообразно, так как мелкая фракция засоряет движущийся поток и препятствует процессу.

Кроме того, отмечено негативное влияние влажности на процесс. Так, влажность материала более 5...7 % приводит к налипанию его на стенки аппарата и для большинства продуктов является предельно допустимой.

Влияние частоты вращения рабочего органа на производительность аппарата показывает, что после достижения некоторого значения частоты производительность резко падает, что объясняется отбрасыванием обрабатываемого продукта к стенкам за счет действия центробежных сил и оголением зоны обработки (рисунок 5.22).

Изменение угла наклона помольной камеры уменьшает производительность, но улучшает степень измельчения. При этом зависимость снижения производительности и остатка на сите № 008 для доломита от угла наклона представлена в таблице 5.5.

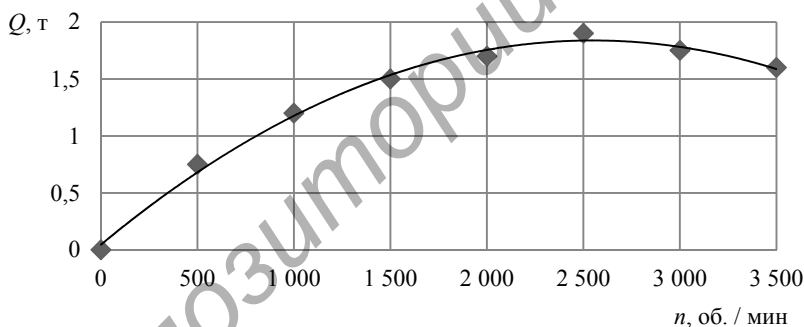


Рисунок 5.22 — Зависимость транспортирующей способности от частоты вращения

Т а б л и ц а 5.5 — Зависимость коэффициента снижения производительности от угла наклона корпуса

Параметры	Значение						
	0	15	30	45	60	75	90
Угол наклона, град.	0	15	30	45	60	75	90
Снижение производительности $K_{п}$	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9
Остаток на сите № 008	65	62	57	51	44	36	26

Особо следует отметить, что для аппаратов с различными диаметрами трубчатых помольных камер (изготовленных, например, из стандартных трубных отводов) при измельчении кварцевого песка модулем крупности  $M_{кр} = 1,52$  мм определен масштабный фактор протекания рабочего процесса, что иллюстрируется рисунком 5.23 и заключается в том, что наилучшие условия измельчения обеспечиваются в рабочей камере диаметром 89 мм.

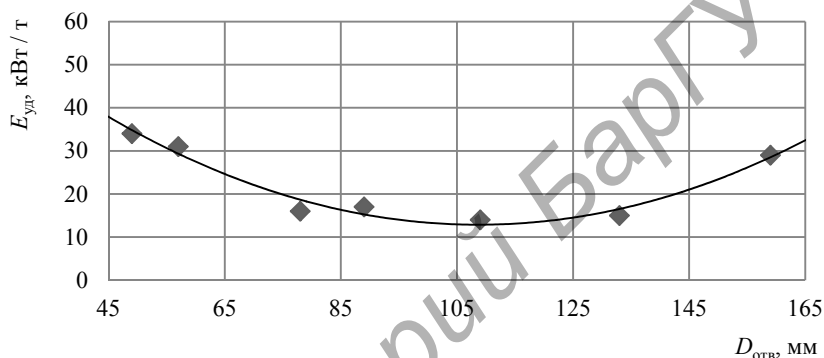


Рисунок 5.23 — Зависимость удельной энергоёмкости от диаметра отвода рабочей камеры

Более полные экспериментальные исследования рабочего процесса пружинных мельниц изложены в работе [208]. Часть из них будет приведена ниже при описании пружинных агрегатов для приготовления высококачественных смесей и механоактивации.

### **5.5 Пружинные агрегаты для приготовления высококачественных смесей и механоактивации композиционных материалов**

Уровень исследований в области смесеобразования, особенно после развала СССР, нельзя считать соответствующим той важности, которую эти процессы имеют в современном материаловедении вообще, а в строительном в частности. Смешивание, как тех-

нологический передел, уже не отвечает условиям создания высокоэффективных материалов и требует новых подходов. Одним из них является метод совмещения смешивания и механоактивации [25; 17; 182; 192; 208, 257].

С определением идеального смешивания, когда в результате процесса должна получиться такая смесь компонентов, что в любой ее точке к частице одного из компонентов примыкают частички другого компонента в заданном количественном соотношении, нельзя согласиться. Это необходимое, но недостаточное условие. Дальнейшим этапом интенсификации смесеобразования является комплекс воздействий на перерабатываемую среду путем увеличения поверхности взаимодействия компонентов, управления свойствами их поверхности, в том числе изменения дефектности, формы частиц, энергонасыщенности структуры и ряда других, в том числе ввода химических добавок (ПАВ) [182; 189; 192; 257] и управления внешними условиями — температурой, давлением и др.

С учетом перечисленных факторов и условий нами разработано технологическое оборудование для приготовления высококачественных строительных смесей. Оно охватывает широкий спектр перерабатываемых материалов и производительностей для различных условий применения. Их объединяющим звеном является адаптивный механизм выполнения рабочего оборудования, основанный на использовании многошарнирных элементов (бил) и кинематически деформируемых пружинных рабочих органов.

Главными исходными требованиями при проведении процессов механоактивации твердых тел и дисперсных сред, по нашему мнению, являются:

- осуществление процессов механообработки непосредственно перед завершающей операцией, например, перед растворением водой или вводом органического вещества;
- проведение процессов на условиях максимального соответствия изменения структуры вещества потенциалу последующих физико-химических взаимодействий в конгломератном материале;
- создание конструкций механоактиваторов, обладающих малыми габаритными размерами и массой, которые легко вписываются в состав действующих технологических линий, что жестко обусловлено, к примеру, для бетонных заводов;

– правильный выбор общей технологии производства с тем расчетом, чтобы создать оптимальные условия для проведения процессов механоактивации. Это в первую очередь относится к переработке сложных составов, многокомпонентных шихт и смесей;

– создание простых, надежных и высокопроизводительных конструкций повышенной энергонапряженности, обладающих хорошей демпфирующей способностью и самоочищаемостью при работе с влажными, вязкими или налипающими материалами.

Рассмотрим более предметно механоактиваторы различных конструкций и дадим оценку их технологических возможностей и путей развития.

*Пружинные механоактиваторы.* Этот класс оборудования отличается большим конструктивным многообразием [182; 192]. Их основу составляют пружинные рабочие органы, которые представляют собой изогнутые и вращающиеся подобно гибкому валу элементы. Воздействие на материал осуществляется в сходящихся клиновых пространствах между витками рабочих органов. Основные виды пружинных механоактиваторов приведены на рисунке 5.24.

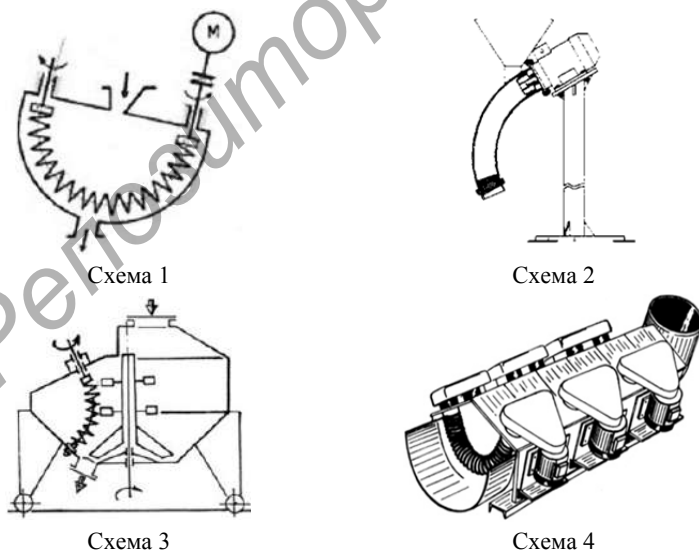


Рисунок 5.24 — Основные виды пружинных механоактиваторов

**Схема 1.** Конструкция представляет собой лоткообразную камеру с люками для загрузки и выгрузки, внутри которой установлен на опорных узлах связанный с приводом вращения дугообразно изогнутый пружинный рабочий орган. Эффективность механоактивации в таком аппарате очень высокая, например, прочность на сжатие образцов на основе цементного раствора повышается в 1,5...2,0 раза или при заданной прочности экономится до 30 % цемента. Это малопроизводительный аппарат, его назначение — приготовление небольших объемов активированных составов и проведение исследований.

**Схема 2.** Малогабаритный активатор непрерывного действия. Включает в себя трубчатую рабочую камеру, в которой установлен связанный с приводным электродвигателем пружинный рабочий орган, причем его свободный конец не имеет опорного узла. Работа этого аппарата отличается удобством и достаточной эффективностью при производительности 0,1..0,8 м<sup>3</sup>/ч. Область применения — приготовление активированных составов на рассредоточенных объектах с небольшими объемами работ, например, при укладке тротуарной плитки.

**Схема 3.** Это модернизированная виброгазомешалка СМС-40 с встроенными в нее механоактиваторами, т. е. пружинами, помещенными в рабочую камеру и связанными с дополнительными приводами. Рабочий объем такого агрегата — 3 м<sup>3</sup>, число пружинных активаторов — 4.

Применение пружинных активаторов позволяет повысить показатели физико-механических свойств изделий из ячеистого бетона. Для марки бетона средней плотности Д600 устойчив переход из класса прочности В2 (25 кг · с / см<sup>2</sup>) в класс В2,5...В3,0 (30...36 кг · с / см<sup>2</sup>). Аналогичные результаты характерны и для других плотностей такого бетона, причем состав для плотности Д500 после механоактивации может при той же прочности достигать плотности Д450 и даже Д400.

При создании активаторов на базе агрегата СМС-40 долгое время не удавалось создать надежную конструкцию, так как пружинные органы генерировали на корпус неуправляемую вибрацию. Только после замыкания кинематической цепи и отказа от традиционной нижней опоры пружины проблема была решена. Функции

опоры выполняют вставки из более мягких материалов, чем витки пружины, на которые они свободно опираются, в частности, это чугунные башмаки.

**Схема 4.** Смеситель-активатор непрерывного действия (рисунок 5.25). Его техническая характеристика соответствует данным таблицы 5.6.



Рисунок 5.25 — Общий вид смесителя-активатора

Т а б л и ц а 5.6 — Техническая характеристика промышленного смесителя-активатора непрерывного действия

Наименование параметра	Значения
Обрабатываемые материалы	Грубодисперсные смеси
Число рабочих органов, шт.	4...8
Содержание в смеси твердых частиц класса +10 мм, %	Не более 80
Производительность по твердому материалу, т / ч	10...50
Число приводных электродвигателей, шт.	4...6
Мощность электродвигателя, кВт	2,2
Габаритные размеры, мм: длина × ширина × высота	2 500 × 1 700 × 1 400
Масса, кг	1 100

Конструкция состоит из 6...8 пружинных рабочих органов, установленных параллельными рядами вдоль оси лоткообразного корпуса. Рабочее оборудование выполнено в виде отдельных секций с индивидуальными приводами мощностью 2,2 кВт на каждый рабочий орган. Производительность таких агрегатов при приготовлении строительных смесей составляет 20...30 м<sup>3</sup> / ч. Более десятка этих машин работают в г. Краснокаменске Читинской области и г. Желтые Воды Днепропетровской области на приготовлении закладочных смесей для заполнения выработанных подземных пространств. На этих смесях экономится 15...20 % цемента при увеличении прочности структуры закладочного массива в 1,25...2,0 раза. На интенсивность процесса активации главное влияние оказывает частота вращения пружинных органов (рисунок 5.26). Нижняя точка на приведённом графике — контрольное приготовление смеси. Спад эффекта активации при увеличении частоты вращения свыше 1 250 об. / мин связан с явлением центробежного выбрасывания частиц смеси из рабочих зон. Аппараты данной конструкции могут найти широкое применение в технологиях раздельного приготовления бетонной смеси.

В целом пружинные активаторы являются эффективным инструментом для механоактивации большого спектра материалов. Сдерживающим фактором их развития является отсутствие централизованного изготовления высококачественных пружинных рабочих органов.

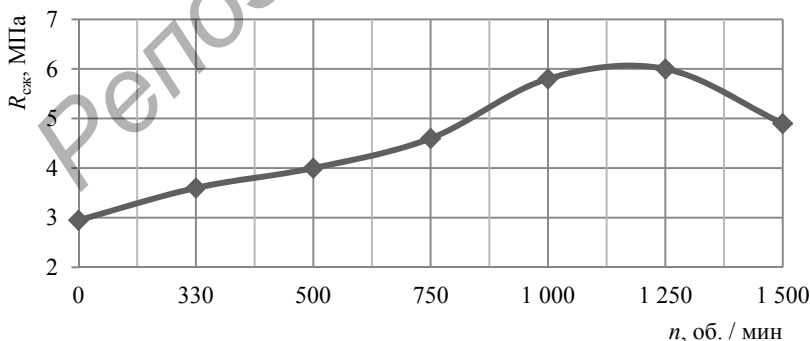


Рисунок 5.26 — Зависимость прочности на сжатие образцов из закладочной смеси от частоты вращения пружин

Получение технологических результатов (таблица 5.7) свидетельствует о том, что во всем диапазоне частот вращения пружин (от 300 до 1 000 мин<sup>-1</sup>) наблюдается повышение прочности активированных образцов в сравнении с контрольными в пределах от 25 до 114 %, т. е. в 1,25...2,14 раза.

Несколько слов следует сказать об особенностях механоактивации в пружинных аппаратах. Эффект активации более всего наблюдается на мелкозернистых смесях, что объясняется демпфирующим эффектом крупного заполнителя. Это хорошо иллюстрируется результатами обработки асфальтобетонных смесей (рисунок 5.27) Кривые 1, 2 — мелкозернистый, 3, 4 — среднезернистый и 5, 6 — крупнозернистый асфальтобетон. Кривые 1, 3, 5 — образцы из штатного смесителя, кривые 2, 4, 6 — активированные образцы. Четко видно влияние крупности на прочность образцов на сжатие. Важно, что параллельно улучшаются и другие характеристики асфальтобетона, в частности, набухание и водонасыщение.

Для пружинных механоактиваторов определена оптимальная частота вращения, когда резонансный режим вызывает наибольшую виброактивность. Генерируемые таким образом колебания гасятся обрабатываемым материалом, который получает максимальную интенсивность переработки, а сами рабочие органы работают в стабильном режиме.

Т а б л и ц а 5.7 — Результаты обработки твердеющих закладочных смесей

Частота вращения пружин, мин	Угол изгиба пружин, град.	Возврат образцов, дн.	Прочность образцов на сжатие, МПа		Повышение прочности активированных образцов по сравнению с контрольным, %
1 000	180	90	5,8	2,88	103,5
1 000	180	90	3,9	1,98	97,0
1 000	180	90	4,1	1,94	114,0
700	180	110	3,1	1,99	56,5
500	180	110	2,1	1,52	39,7
333	180	72	1,6	1,25	33,5
333	120	30	2,9	2,33	25,2

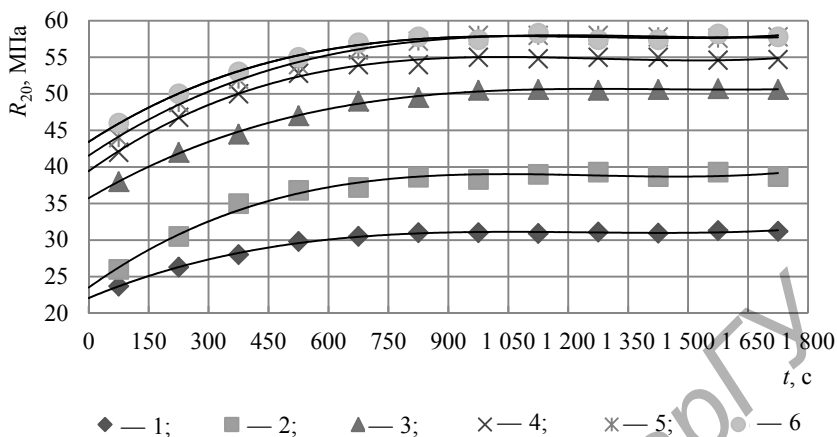


Рисунок 5.27 — Результаты механоактивации асфальтобетонной смеси

Исследование рабочего процесса пружинных механоактиваторов показало, что пружинные рабочие органы являются эффективным инструментом воздействия на обрабатываемые материалы и их структуру. Комплексный характер положения внешних силовых факторов на частицы исходных продуктов позволяет целенаправленно производить тот вид обработки, который необходим для организованного изменения свойств выходных веществ в целях использования заложенных в них потенциальных возможностей. Подтверждающим фактом к этому является уровень энергонапряженности, который для пружинных механоактиваторов на основе расчетов по [165] может достигать 3...5 кВт / дм<sup>3</sup>.

Чисто смесеобразовательная способность пружинных агрегатов была оценена при переработке многих видов композиций дисперсных материалов. Для подавляющего большинства материалов, кроме составов с наличием высокой концентрацией длинномерных включений, качествоготавливаемых смесей значительно превосходит аналогичные показатели существующего оборудования. В наибольшей степени это проявляется при приготовлении ультрадисперсных смесей концентрированных суспензий и отражено во многих работах [205; 208; 244].

## 5.6 Использование пружинных аппаратов для тонкого и сверхтонкого помола материалов

Разработка новых материалов с заданным комплексом свойств осуществляется переводом материала в ультрадисперсное состояние, в котором его характерные геометрические размеры оказываются соизмеримы с тем или иным масштабом физического явления, например, поверхностной энергией [25]. Сегодня это называется нанотехнологиями и является приоритетным направлением в науке.

Одним из основных методов получения сверхтонких и наноразмерных композиций является измельчение, осуществляемое преимущественно механическими методами. Главным условием при этом подходе является минимизация размеров мелющих тел. Это положение хорошо известно специалистам [57] и находит самое широкое применение в технике измельчения. Его физическая суть заключается в создании максимальных напряжений в структуре измельчаемого материала. Этот метод успешно реализуется, например, в бисерных и коллоидных мельницах. В настоящее время это одно из основных направлений повышения эффективности тонкого и особенно сверхтонкого помола.

Сравнение различных методов получения ультрадисперсных частиц и нанокomпозиций показывает, что для целей производства целого ряда эффективных материалов наиболее приемлемы механические [67]. При этом следует понимать необходимость совмещения этих технологий с другими операциями переработки дисперсных сред, являющихся основой структуры искусственных конгломератов.

При механическом измельчении существует устойчивая зависимость тонины помола от размеров мелющих тел и энергонапряженности рабочего процесса [48; 57]. Это четко коррелируется на примерах бисерных мельниц, развитие которых идет по пути уменьшения размеров мелющих тел (шаров), диаметр которых в ряде случаев достигает 50 и даже 20 мкм [1]. Получение столь малых мелющих тел — сама по себе очень сложная и дорогостоящая технология, следовать по этому направлению, т. е. создавать собственные установки на подобном принципе действия, — значит обречь себя на постоянное отставание.

При проведении процессов ультрадисперсной переработки (помола, диспергирования или микрогранулирования) дисперсных

сред необходимо постоянно блокировать силы поверхностного взаимодействия между частицами, которые прогрессивно возрастают по мере уменьшения их размеров и в какой-то момент, при достижении критической крупности, процесс разрушения частиц прекращается при любой продолжительности и интенсивности осуществляемых внешних воздействий. Получение более мелких частиц возможно различными способами: уменьшением размера мелющих тел, оптимизацией характера механизмов единичных актов разрушения, увеличением энергонапряженности процесса, использованием ПАВ, обработкой в жидких средах, применением охлаждающих веществ и т. д.

В работе [150] излагается вывод, что аппарат тем энергетически выгоднее (при прочих равных условиях), чем меньше отношение объёма его загрузки к производительности и чем выше удельный прирост поверхности при измельчении единицы объёма. В подтверждение сказанному авторы предлагают коэффициент так называемого лишнего времени  $k_l$ , который определяется как отношение времени ожидания  $t_1$  акта измельчения  $k_1$  ко времени  $t_2$  осуществления акта измельчения  $k_2$ , т. е.  $k_l = \frac{k_1}{k_2}$ .

Приведенные в этой работе значения  $k_l$ , определенные и аналитически, и на основании конкретной работы конусной дробилки, составляют, соответственно, 2 000 и 2 100. Этот простой и показательный пример даёт все основания полагать, что сокращение значения  $k_l$  должно привести, во-первых, к повышению собственно эффективности процесса помола, во-вторых, что предположительно, обеспечит получение частиц с более мелкими размерами. Последнее обстоятельство следует из свойств частиц «закрывать» полученные ими при измельчении трещины и понимания того, что «скорострельностью» внешних воздействий этот процесс можно замедлить.

Особого внимания заслуживает использование механизма дополнительного воздействия на мелкие мелющие тела сжимающими силами, создаваемыми витками пружинного рабочего органа. Его задачей является создание максимально возможных контактных напряжений в рабочих зонах. Это возможно на основе идеи перевода измельчения с метода свободного движения мелющих тел к методу их принудительного адаптивного защемления.

Осуществить подобную задачу можно на примере пружинной мельницы с мелющей загрузкой в виде мелких шариков диаметром 0,05...0,5 мм. В отличие от традиционных механизмов измельчения между витками на этих мелющих телах реализуются повышенные контактные напряжения, чем обеспечивается сверхтонкий помол. Техническое решение этого метода иллюстрируется рисунками 5.28, 5.29, на которых приведены кинематическая схема и общий вид пружинной мельницы соответственно [110; 208].

Пружинная мельница содержит электродвигатель 1, муфту 2, рабочую камеру 3, в которой на опорных валах 4 посредством узлов крепления 5 смонтирован дугообразно изогнутый пружинный рабочий орган 6, а для загрузки и выгрузки материала предусмотрены патрубки 7, 8.

Работа мельницы производится при заполненной камере 3 исходным материалом, который также содержит от 10 до 50 % по загрузке мелющих тел. При включенном двигателе 1 рабочий орган 6 приводится во вращение и производит разрушение материала как между собственно витками пружины, так и с заклиниванием между ними мелющих шариков. Мелющие тела могут отделяться от обработанного продукта как посредством сетки, помещаемой в выгрузочный патрубок 8, так и на отдельном посту после выгрузки из аппарата всей находящейся в нем загрузки. Мельница в режиме нанопомола предназначена для работы преимущественно по мокрому способу.

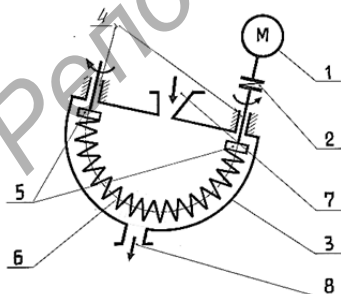


Рисунок 5.28 — Кинематическая схема пружинной мельницы



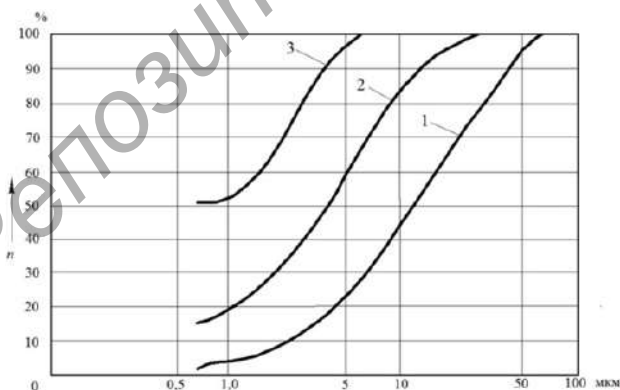
Рисунок 5.29 — Общий вид пружинной мельницы

Интенсивность измельчения материала в пружинных мельницах мелкими мелющими телами потенциально значительно выше, чем в традиционных мельницах, так как в межвитковых зонах можно обеспечить предельно допустимые по условиям, прежде всего, прочности по контактными напряжениям измельчающих элементов — витков пружины рабочего органа и мелющих тел.

К достоинствам предлагаемой конструкции мельницы [208] можно отнести ее простоту. При этом присутствие в обрабатываемой среде мелких шариков позволяет отказаться от закрепления пружинного рабочего органа своим свободным кольцом на оси опоры. Шарики будут выполнять роль своеобразных тел качения и дополнительно улучшат условия работы пружины, которая не будет испытывать сопротивление на трение в опоре, которое будет переведено в работу измельчения.

Потенциал сверхтонкого помола материалов в пружинной мельнице без мелких мелющих тел можно продемонстрировать на примере размла дисульфида молибдена, являющегося одним из наиболее трудно диспергируемых продуктов, показывает возможность обработки не только твердых и хрупких материалов, но и обладающих высокой способностью диспергирования.

Гранулометрические составы в дифференциальной форме исходного дисульфида молибдена и обработанного в течение 2 и 4 часов приведены на рисунке 5.30.



1 — до обработки; 2 — после 2 ч диспергирования;  
3 — после 4 ч диспергирования

Рисунок 5.30 — Интегральные кривые дисперсного анализа дисульфида молибдена

Полученные результаты показывают реальную возможность получения в измельченном материале большого количества наночастиц. Заметим, что работ по нанопомолу в аппаратах с пружинными рабочими органами не проводилось.

Введение в помольную камеру пружинной мельницы мелких мелющих тел создает дополнительные механизмы повышения напряжений в частицах измельчаемого материала и тем самым позволяет повысить дисперсность готового продукта, в том числе перевести его в разряд нанопродукта. Концепция такого подхода изложена в работах [103; 208].

Создание нового эффективного оборудования для комплексной переработки материалов, находящихся в ультрадисперсном состоянии, необходимо для производства продуктов с дополнительными потребительскими свойствами или специального назначения. Область применения аппаратов подобного назначения не только огромна, но и постоянно расширяется, охватывая практически все сферы деятельности человека, начиная от бытовой техники и заканчивая космическими технологиями. Определенную нишу в такой технологической эволюции смогут занять и представленные в данной статье разработки и возможные варианты их развития.

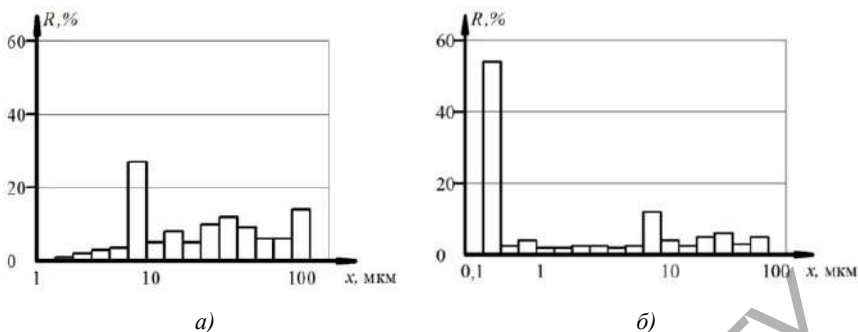
Результаты сухого измельчения кварцевого песка Раменского месторождения приведены в таблице 5.8.

Эти результаты также подтверждают высокую диспергирующую способность мельниц с упругодеформируемыми рабочими органами.

Очень высока интенсивность размолы слюды в пружинной мельнице. Результаты экспериментов представлены на рисунке 5.31.

Т а б л и ц а 5.8. — Результаты измельчения кварцевого песка

Класс крупности, мм	Массовая доля частиц, %	
	Исходный песок	Время помола 2 мин
+0,3	9,1	—
−0,3...+0,2	47,1	—
−0,2...+0,16	20,5	0,1
−0,16...+0,1	15,2	0,2
−0,1...+0,076	2,0	0,9
−0,076...+0,045	2,5	9,4
−0,045	2,6	89,4



*a* — до обработки; *б* — после обработки

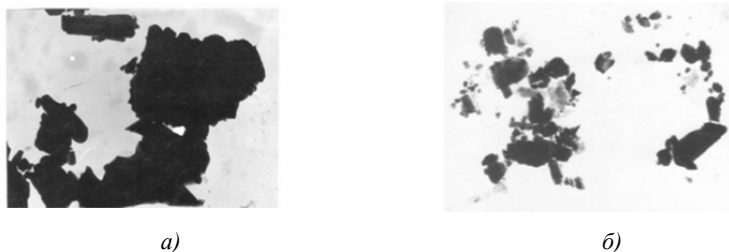
Рисунок 5.31 — Результаты дисперсного анализа слюды

Анализ полученных на лазерном гранулометре результатов показывает, что после 10 мин обработки выход мелких классов (менее 1 мкм) прекращается. Это следует, по-видимому, объяснить уже недостаточной энергонапряженностью процесса, которая не превышает  $0,3 \dots 0,4$  кВт / дм<sup>3</sup>. Между тем удельная поверхность продолжает нарастать по мелким классам на 10...15 %. Это свидетельствует о том, что происходит накопление дефектов (трещин, сдвигов решеток по плоскостям спайности и др.). При более длительном помоле должно произойти образование более мелкой фракции, однако часть ее может образовывать прочные агрегаты.

Проведенные исследования показали также высокую эффективность винтовых мельниц при обработке таких твердых материалов, как нитрид кремния, электрокорунд, окись циркония, технические алмазы, нитрид бора, многие металлы (кроме быстрорежущей стали) и др. Например, помол в течение 1 ч нитрида кремния крупностью 40 мкм обеспечивает получение тонкодисперсного порошка с размерами основной массы частиц 1...2 мкм.

На рисунке 5.32 показаны фрагменты порошка нитрида кремния до и после обработки в течение 1 ч при увеличении в 4 500 раз.

Исследовались порошки нитрида кремния  $\alpha$ - и  $\beta$ -модификаций, полученные методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (далее — СВС).



*a*) — исходный продукт; *б*) — порошок после 1 ч размола

Рисунок 5.32 — Фрагменты порошка нитрида кремния  $\times 4\ 500$

Исследование потенциальных возможностей пружинных аппаратов для сверхтонкого помола и получение нанодисперсных композиций планируется в области дальнейшего развития.

### **5.7 Оценка потенциальных возможностей и прогнозирование путей развития пружинных технологических аппаратов**

Анализируя результаты выполненных ранее исследований [157; 196; 208], можно сделать вывод, что пружинные аппараты являются эффективным видом оборудования для помола и смешивания. При этом установлена область их рационального использования при переработке минеральных веществ с твердостью до 4...5 единиц по шкале Мооса как по сухому, так и по мокрому способу, причем последний является наиболее предпочтительным. Подробно это изложено в работах [180; 201]. Вместе с тем, по нашему мнению, пружинные аппараты обладают комплексом неисследованных потенциальных возможностей. К их числу можно отнести:

1) многократное увеличение энергонапряженности как за счет концентрации числа рабочих органов, так и за счет увеличения силовых характеристик единичных рабочих зон, в том числе путем внешних силовых нагружений;

2) создание оптимальной циркуляции материала загрузки при ее радиально-центробежном движении в рабочей камере под действием пружинных рабочих органов;

3) способность формирования амплитудно-частотных характеристик рабочих органов, требуемых параметров, в том числе управляемого резонанса;

4) совмещение рабочих процессов в пружинных аппаратах с другими операциями — транспортированием, гранулированием, растворением, механоактивацией, классификацией и т. д.;

5) варьирование характером единичных актов воздействия на обрабатываемую среду, в частности, путем последовательного чередования различных механизмов нагружения: сжатие — сдвиг, сжатие — истирание, сжатие — удар и т. д.;

6) достижение предельно возможных для механического способа измельчения размеров частиц готового продукта, включая получение стабильных нанодисперсных композиций;

7) получение максимально однородных смесевых составов, в том числе на основе ультрадисперсных компонентов;

8) проведение процессов селективной обработки горнорудных материалов, химических веществ специального назначения, рациональной переработки сырьевых масс и т. д.;

9) встраивание пружинных аппаратов в действующие линии, включая совмещение их с насосными установками, турбинными мешалками, высокоскоростными классификаторами и др.;

10) проектирование технологически эффективных установок специального назначения, например, для криоизмельчения вязкопластичных материалов, механического легирования компонентов для порошковой металлургии или проведения различных твердофазных реакций.

Можно ожидать, что реализация этих далеко не полных положительных качеств пружинных аппаратов позволит создать установки производительностью до 100 т / ч и обрабатывать материалы твердостью до 7...8 единиц по шкале Мооса, а также обеспечить тонкий и сверхтонкий помол при достаточно высокой производительности. Будет расширена конструктивная база аппаратов и предложены новые машины, совмещающие несколько функций в одном агрегате. Аппараты производительностью до 5...10 т / ч будут выполняться на базе промышленных насосов. Заслуживает внимания модульный принцип конструирования, который на базе унифицированных агрегатов обеспечит проектирование оборудования различной производительности и технологической применимости.

Ввиду простоты конструкции пружинных аппаратов общий ресурс их работы можно оценить по ресурсу пружинных рабочих органов, уплотнений, узлов трения, подшипников, камер для обработки материала и привода. Учитывая, что уплотнения узлов трения, подшипника и привода достаточно совершенны и имеют высокую наработку, исключим их из рассмотрения, априорно считая, что они соответствуют условиям работы и должны быть заимствованы. Камера для обработки непосредственно с рабочим органом не взаимодействует и, как правило, при нормальных условиях эксплуатации выполняет свои функции на протяжении жизни аппарата. Коротко остановимся на пружинных рабочих органах.

Проведенные испытания показали, что наработка до поломки пружинных рабочих органов составляет 80...100 млн циклов, что уже позволяет довести ресурс их работы до 1 000...1 500 ч при частоте вращения 750...1 500 об. / мин. Интересно, что аналогичные результаты получаются при работе гибких проволочных валов глубинных вибраторов [51]. Имеющиеся резервы (материал, химическая и химико-термическая обработка, поверхностное упрочнение, точность изготовления, степень деформации, нагруженность и др.), по нашим оценкам, позволяют довести наработку до 200...300 млн циклов и далее или до 2 000...3 500 ч работы, что вполне достаточно для обеспечения эффективной работы оборудования в производственных условиях. Это касается обработки материалов твердостью до 4...5 единиц по шкале Мооса.

Износ витков пружин накладывает двойное действие на этот процесс. С одной стороны, уменьшается сечение витков пружин и снижается ее крутильная нагрузочная способность, с другой — происходит затирание (залечивание) поверхностных трещин и повышение прочности при циклическом нагружении. В значительной степени величина износа определяется условиями работы пружин, особенно при их радиальных колебаниях, что приводит к интенсивному трению боковых поверхностей витков между собой и внешних поверхностей витков по стенкам рабочей камеры.

Величину коррозионного износа следует снижать путем применения нержавеющей пружинных сталей и сплавов. Интенсивность абразивного износа можно уменьшить за счет более мелкого питания, футеровки и упрочнения рабочих поверхностей, снижения взаимного перемещения витков друг по другу. Предельная величина

на износа может иметь достаточно большое значение, но для реальных условий ее можно назначить не более 25...30 % сечения витков, что достаточно хорошо коррелируется с допустимым износом спиралей гибких валов, определенным в 25 % сечения [51].

Обработка высокоабразивных и особо твердых материалов приведет к значительному снижению наработки и повышению износа рабочих органов, но это компенсируется интенсивностью измельчения и вполне достаточно для подобных условий работы.

Организация специализированного производства пружинных рабочих органов позволит повысить их качество и снизить себестоимость. Сейчас качество рабочих органов недостаточно высокое, что подтверждается магнитопорошковой дефектоскопией. Выявлено, что по меньшему радиусу витков имеются внутренние трещины глубиной до 2...3 мм в количестве 10...15 на один виток, расположенные под углом примерно 45° к поверхности, что может привести к разрушению пружин даже в первые минуты их работы. Входной контроль по этим показателям исключит случайные отказы на начальной стадии эксплуатации.

Сформируем основные области применения и перспективы использования пружинных аппаратов. В силу своей универсальности и конструктивного многообразия рассматриваемое оборудование может быть использовано практически во всех отраслях народного хозяйства для комплексной переработки дисперсных материалов. Область их рационального использования охватывает материалы исходной крупности менее 5...8 мм, прочностью на сжатие до 200...250 МПа, твердостью до 7 единиц по шкале Мооса, средней абразивности. Такие материалы можно обрабатывать как по сухому, так и по мокрому способу, кроме диапазона критической влажности, вызывающей образование пробок в рабочих пространствах. Следует при этом оговориться, что для случая принудительной подачи материала в рабочие зоны это ограничение снимается. Производительность пружинных аппаратов определяется в первую очередь размерами и количеством установленных в них рабочих органов. На этом основании производительность для одного рабочего органа составляет не более 2 т / ч для сухой обработки и не более 10 т / ч для мокрой. Дополнительная установка рабочих органов позволяет довести производительность оборудования до 50 и более тонн в час.

## 6 ВИБРАЦИОННЫЕ ПРУЖИННЫЕ АППАРАТЫ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ПЕРЕРАБОТКИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

### 6.1 Результаты технологической обработки различных материалов в вибрационных пружинных мельницах

Конструктивные особенности пружинных рабочих органов, уникальность их функциональных свойств при взаимодействии с перерабатываемой средой, большой потенциал изменения выходных характеристик и закономерностей поведения при варьировании их кинематическими, геометрическими и силовыми параметрами позволяют расширить методологическую базу создания новых технологических аппаратов и использовать их для проведения различных видов технологической обработки материалов [208].

Создание пружинных аппаратов с кинематически деформируемыми рабочими органами позволило реализовать ряд новых механизмов воздействия на перерабатываемые продукты: сжатие со сдвигом, наложение вибрации, селективность нагружения, высокую энергонапряженность, транспортирующую способность, минимальное время воздействия на частицы материала и ряд других. Это, в свою очередь, приводит к изменению целого ряда свойств обработанных материалов, которые могут служить основой совершенствования многих технологий, а также оборудования. Рассмотрим в качестве примеров некоторые из них.

*Обработка пластичных металлов и материалов.* Приведем результаты по размолу бериллиевой бронзы БрБ2 (ГОСТ 15835-70) в виде исходных гранул крупностью  $-0,7...+0,2$  мм.

После 5 мин размола получились чешуйки овальной формы диаметром  $0,3...0,7$  мм и толщиной  $0,1...0,2$  мм, после 10 мин — чешуйки овальной формы с рваными кромками диаметром  $0,3...0,9$  мм и толщиной  $0,02...0,05$  мм, после 20 мин — чешуйки овальной формы с рваными кромками диаметром до 1 мм и толщиной около 0,01 мм. Дальнейшая обработка заметного результата по диспергированию не дает, так как материал упрочняется, а приложение нагрузки совпадает по направлению с максимальной прочностью структуры [93; 191].

Анализ бронзовых частиц на содержание железа показал, что количество аппаратного железа составляет 0,08...0,09 %.

Разрушение полученных чешуек до размеров менее 63 мкм оказалось сравнительно легкой задачей для вихревого аппарата. Для этого достаточно 2...3 мин обработки при линейных скоростях потока 30...50 м / с, что объясняется изменением характера нагружения частиц, которые после сжатия подвергаются изгибу.

Размол алюминия производился в пружинной и вибрационной мельницах для дисперсного упрочнения или механического легирования. Исследовался эффект дисперсного упрочнения. Из полученного порошка формовались цилиндрические образцы, термически обрабатывались и подвергались испытанию на разрыв. Полученные результаты представлены в таблице 6.1.

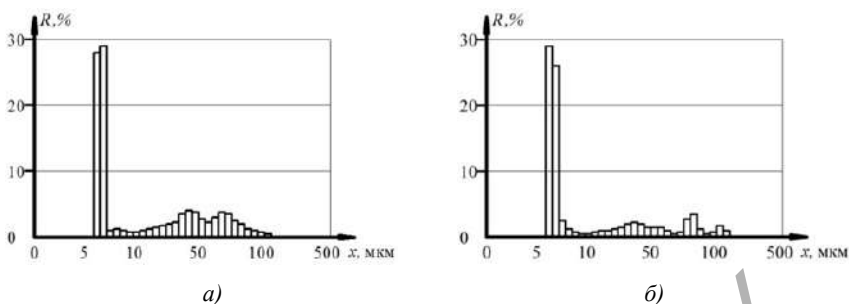
Подобные результаты на вибрационной мельнице достигаются за 20 ч работы. При этом примол железа в материале из пружинной мельницы составил 0,09 и 0,63 % материала из вибрационной. Это свидетельствует о явных технологических преимуществах пружинного измельчителя, который может найти широкое использование в порошковой металлургии.

*Селективная переработка горнорудных минеральных продуктов.* Избирательное измельчение является наиболее актуальным для подготовки минерального сырья к обогащению и заключается в получении максимального выхода целевого класса, для обеспечения повышения степени извлечения полезных компонентов.

Проиллюстрируем это на экспериментальном материале (рисунок 6.1), где представлены гистограммы зернового состава измельченных всухую в пружинной мельнице циклического действия с помольной камерой в виде дугообразно изогнутой трубы с объёмом загрузки 1 л и в конусно-инерционной дробилке КИД-60, работающей на проход, проб джекказганской руды крупностью 1...3 мм [205].

Т а б л и ц а 6.1 — Зависимость прочности образцов из порошков от времени размола

Параметры	Значение				
	0	0,5	1,5	4,0	8,0
Прочность образцов на растяжение, Мпа	107	129	229	492	582



а — проба, измельченная в течение 2 мин в винтовой мельнице;  
 б — проба, измельченная в КИД-60

Рисунок 6.1 — Результаты дисперсного анализа проб измельченной джезказганской руды

Полученные на лазерном гранулометре «Анализатте-20» гистограммы распределения частиц на крупности следует оценивать с технологических позиций и, прежде всего, по содержанию классов нефлотируемых частиц, т.е. порошка с размерами менее 5...10 мкм и крупки с размерами более 100 мкм. Хорошо видно, что пружинная мельница при 2-минутном размоле по этим критериям эффективнее КИД-60, её рабочим процессом легко можно управлять как изменением времени обработки, так и переводом в замкнутый режим работы.

Предполагается, что отмеченные качества пружинных мельниц при использовании их для целей рудоподготовки и доизмельчения концентратов и промпродуктов позволят повысить степень извлечения ценных минералов на 5...20 %. Работа в этом направлении является чрезвычайно актуальной потому, что при её положительной реализации можно сократить объёмы добычи сырья, особенно полиметаллов.

*Исследование песка, смолотого в различных мельницах.* Известно, что способ измельчения определяет форму, размеры, характер поверхности кварцевого песка, что оказывает значительное влияние на тип применяемого помольного оборудования [205]. Исследование этого влияния проведено сотрудниками ГП «Институт НИИ» (Минск) для шаровой, центробежной и пружинной мельницы. Песок, смолотый в шаровой мельнице, характеризуется полифракционным составом

вам. Наряду с крупными (с размерами 50...120 мкм) частицами присутствует значительное количество мелких частиц (от 3 мкм и менее). Их количество составляет около 50 %. Измельчение зерен песка происходит за счет процесса их истирания. На это указывает овальная (рисунок 6.2, *а*), смешанная (рисунок 6.2, *б*) и игольчатая формы частиц (рисунок 6.2, *в*).

Иной характер как формы зерен песка, так и их поверхности наблюдается при исследовании песка, смолотого в центробежной мельнице. Зерна песка имеют остроугольную форму. Поверхность зерен покрыта сетью трещин, указывающих на то, что измельчение происходит за счет раскалывания частиц кварца по плоскостям спайности.

Наряду с характером поверхности зерен песка постоянным для всех исследованных проб сохраняется соотношение размеров зерен (длина:ширина).

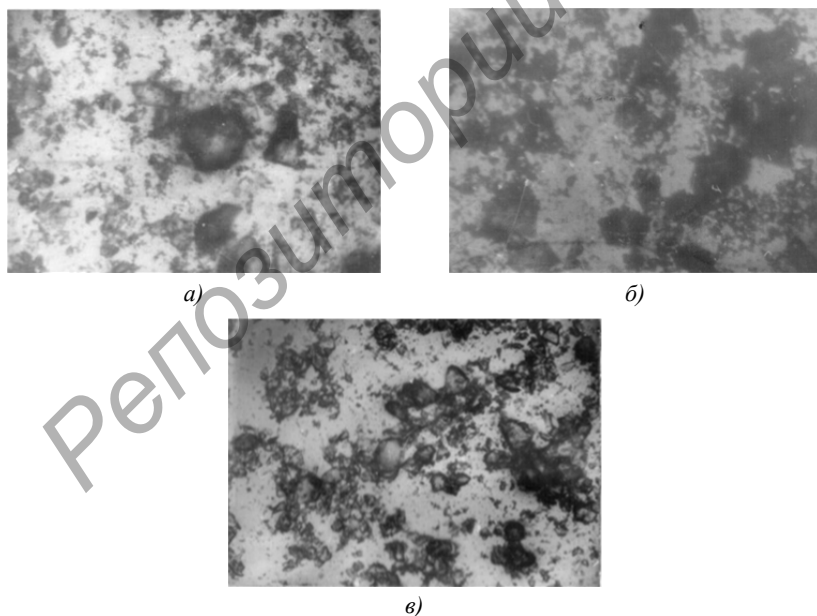


Рисунок 6.2 — Микроструктура песка  $\times 100$ , смолотого в шаровой мельнице (*а*), пружинной мельнице (*б*), центробежной мельнице (*в*)

Для центробежной мельницы эта величина колеблется в пределах от 1,5:1 до 3:1, в то время как для песка, смолотого в шаровой мельнице, характерны более округлые зерна с соотношением размеров от 2:1 до 1:1.

Песок, смолотый в пружинной мельнице, как и песок, смолотый в шаровой мельнице, характеризуется полифракционным составом с большим разбросом в размерах частиц. Однако в нем присутствуют несколько меньше мелких частичек (от 3 мкм и менее) по сравнению с песком, смолотым в шаровой мельнице. Отличается и форма частиц песка. Наряду с овальными зернами, характерными для песка, смолотого в шаровой мельнице, присутствует значительное количество остроугольных зерен. Это может свидетельствовать о двойственном механизме измельчения при помоле песка в пружинной мельнице: как за счет раскалывания кварцевых зерен, так за счет их истирания.

Характеристика размеров частиц в зависимости от условий помола и типа помольного агрегата приведена в таблице 6.2.

Как видно из приведенных данных, при использовании для помола кварцевого песка шаровой мельницы наблюдается большой разброс в размерах частиц, причем до 50 % состава составляют частицы с размером от 3 мкм и менее. Этот разброс в размерах последовательно уменьшается от шаровой мельницы к пружинной и далее к центробежной.

Выявленные характеристики изменения дисперсного состава песка в процессах измельчения являются важными данными для организации многих технологических процессов производства строительных материалов.

Т а б л и ц а 6.2 — Характеристика крупности песка в зависимости от типа помольного агрегата

Характеристика песка	Тип мельницы		
	шаровая	пружинная	центробежная
Удельная поверхность, см <sup>2</sup> / г	2 200	2 500	2 530
Размеры частиц песка, мкм:			
максимальный	120	85	35
средний	12	8	6

*Гомогенизация порошковых смесей и получение мелкодисперсных композиций.* Развитие этого спектра технологий характеризуется, прежде всего, тем, что принципиальным преимуществом процесса механического измельчения с точки зрения гомогенизации порошковой смеси по сравнению с обычным механическим смешиванием является то, что в ходе этого процесса разнородные частицы не просто равномерно распределяются относительно друг друга, а претерпевают структурные и фазовые изменения. Поэтому характеристический размер гомогенности смеси оказывается существенно, порой на один-два порядка величины, меньше средних размеров частиц исходных порошков, что недостижимо при простом механическом смешивании. Получаемые из таких порошков композиционные материалы характеризуются исключительно высокой однородностью состава.

Оценка эффективности различных типов современных помольных аппаратов показывает, что наилучшие результаты по получению так называемых «композитных» частиц достигаются в тех из них, где реализуются «складывающиеся» усилия, когда рабочие поверхности воздействуют друг на друга с большими усилиями, т. е. происходит преимущественно сжатие со сдвигом (истиранием) или реализуется стесненный удар. К числу таких машин в первую очередь следует отнести вибрационные, планетарные и атриторные мельницы, которые обеспечивают «схватывание» исходных частиц, которого практически нет в струйных и вихревых мельницах и в дезинтеграторах. Важно отметить, что пружинные мельницы в полной мере отвечают указанным условиям вследствие своего им особого механизма воздействия на частицы обрабатываемых компонентов.

Исследования в этом направлении проводились на пружинных мельницах лабораторного типа с объемом загрузки 1 л при обработке нитрида кремния, окиси циркония, электрокорунда, нитрида бора, многих металлов и ряда других продуктов.

Приведем некоторые результаты обработки порошка нитрида кремния,  $\alpha$ - и  $\beta$ -модификаций, полученных методом СВС.

Оценка качества порошков проводилась путем измерения их удельной поверхности, определения содержания примесей, химического состава и размеров кристаллитов, а также однородности перемешивания.

Определение удельной поверхности, характеризующей дисперсность, осуществлялось на приборе «Аккусорб». Загрязнение порошков продуктами помола оценивалось по содержанию железа, количество которого определялось химическим способом путем обработки порошка раствором соляной кислоты, восстановлением полученного фильтрата хлоридом олова с последующим титрованием раствором двухромово-кислого калия [93; 191].

Изменение химического состава оценивалось по содержанию двуокиси кремния, определяемому методом избирательного растворения в 20 %-ном растворе натриевой щелочи при температуре 70 °С, а размеры кристаллитов определялись рентгеновским методом.

Результаты экспериментов по кинетике размола представлены на рисунке 6.3. Из них следует, что процесс диспергирования практически прекращается после 60 мин работы аппарата. Дальнейшее форсирование процесса возможно лишь путем введения некоторого количества ПАВ в обрабатываемую среду за счет повышения энергонапряженности процесса в целом.

Графические зависимости изменения содержания примесей железа от времени обработки представлены на рисунок 6.4.

Увеличение содержания железа, особенно в первые 30...40 мин размола, связано в первую очередь с корродированием материала помольной камеры, выполненной из обычной «ржавеющей» стали. Дальше, очевидно, за счет аморфизации мельчайших частиц порошка, которые начинают выполнять по сути, функции твердой смазки, процесс намола практически прекращается.

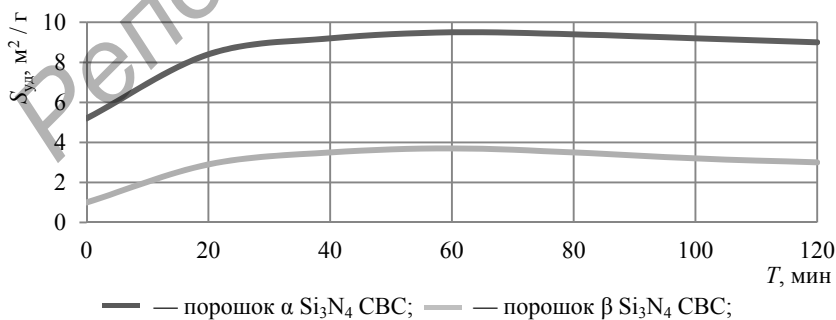


Рисунок 6.3 — Изменение удельной поверхности порошков от времени размола при частоте вращения рабочего органа 2 000 об. / мин

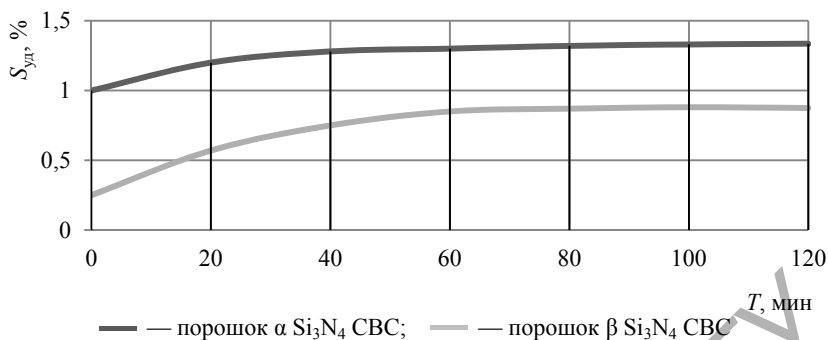


Рисунок 6.4 — Изменение содержания железа в порошках от времени размолта при частоте вращения рабочего органа 2 000 об./мин

Повышение концентрации SiO<sub>2</sub> с 0,9...1,1 % до 2,8...3,6 % в порошке нитрида кремния следует объяснить интенсивным механическим воздействием, реализующим эффекты механоактивации [65].

В результате анализа на аппарате «ДРОН-3» установлено, что с увеличением времени размолта происходит фрагментация кристаллитов от 250 Å у исходного порошка Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> до величины 100 Å через 2 ч работы мельницы, т. е. в результате диспергирования растет активность порошка в спекании. В проводимых ранее исследованиях по изучению диспергирования порошков нитрида кремния в атриторе аналогичный эффект изменения кристаллической решетки частиц при механической обработке не был обнаружен.

Важной особенностью работы пружинного измельчителя является увеличение насыпной массы порошка нитрида кремния, получаемого плазмохимическим синтезом, причем этот показатель может быть увеличен в 5...6 раз и более. Например, с 0,1...0,15 т/м<sup>3</sup> до 0,8...0,9 т/м<sup>3</sup>. Это приводит к повышению плотности прессования, снижению усилия прессования в 1,3...1,5 раза и большей активности спекания [205].

Оценка качества смешивания ультрадисперсных порошков нитрида кремния с оксидными добавками, произведенного в аппарате с рабочей камерой типа «плошка» с объемом загрузки 1 л, произведена при получении шихты порошка.

Критерием качества служит коэффициент вариации  $v_s$ , определяемый по формуле [205]

$$v_c = \frac{100\%}{\bar{C}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}{n-1}},$$

где  $\bar{C}$  — усредненное по объему значение концентрации компонентов;

$C_i$  — концентрация «ключевого» компонента в пробе;

$n$  — количество проб.

Ключевым компонентом служит порошок  $\alpha$   $\text{Si}_3\text{N}_4 + 5\% \text{Al}_2\text{O}_3$ .

По величине коэффициента вариации  $v_c$  оценивают однородность смеси и кинетику процесса перемешивания.

Результаты экспериментов, представленные на рисунке 6.5, показывают, что процесс перемешивания практически заканчивается после 2,5...5,0 мин обработки, при этом процесс микроперемешивания интенсивнее при большей частоте вращения рабочего органа.

Аналогичные результаты получены в УкрНИИ абразивов и шлифования (Запорожье) при переработке в пружинных мельницах-диспергаторах графитизированных материалов. Совместная обработка частиц графита и окомкованной борной кислоты позволила получить однородную смесь с коэффициентом вариации  $v_c$  в диапазоне 0,75...1,2, что говорит о высокой смесеобразовательной способности такого оборудования [205].

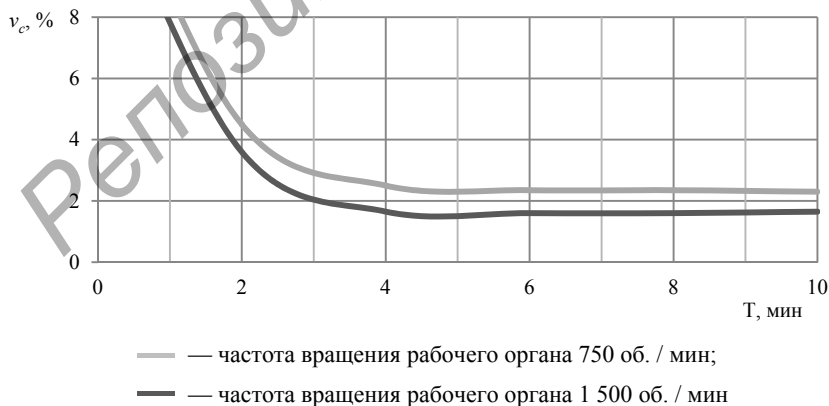


Рисунок 6.5 — Изменение вариационного коэффициента  $v_c$  от времени смешивания порошков  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 5\% \text{Al}_2\text{O}_3$

Описанные выше примеры технологической эффективности пружинных аппаратов можно дополнить результатами по механоактивации глин для повышения качества керамических изделий [78]. Исследованы глины ряда месторождений Красноярского края. При этом установлено, что в аппаратах с высокой энергонапряженностью (планетарная, вибрационная и пружинная мельницы) происходит почти двукратное увеличение пластичности, что имеет важное значение для оптимизации технологии использования неформуемых видов минерального сырья.

Хорошие результаты по гомогенизации порошковых смесей и получению мелкодисперсных (ультрадисперсных) композиций, полученных при дезинтеграторной переработке в пружинных аппаратах электро- и сферокарунда, бариевого феррата, окалина прокаткой, технического кремния, нитрида бора, мусковита, технических алмазов, специальных шихт, апатитов, кокса, люминофоров, цеолитов, минеральных пигментов и многих других материалов.

*Технологическая обработка жидкотекучих сред в пружинных аппаратах.* Рассмотрим вопросы механохимической активации в пружинных мельницах на процесс извлечения гуминовых веществ из землистых бурых углей Александрийского месторождения (Украина), содержащих до 70 % гуминовых веществ, которые на 90 % переводятся в водорастворимую форму гидроксидами натрия и калия. Следует отметить, что просто аммиачной водой ранее удавалось переводить в водорастворимую форму не более 30 % гуминовых веществ [47].

Для этого использовали мельницы, которые создают различные виды разрушения и разную степень механохимической активации:

- 1) дезинтегратор ДЕЗИ-31 Таллинского НПО «Дезинтегратор»;
- 2) двухскоростная ножевая мельница типа РТ-1 (4 000 и 8 000 об. / мин);
- 3) мельница с динамическим самоизмельчением Коммунарского горнометаллургического института;

4) мельница пружинного типа различных конструкций «Млын».

Опыты проводили в двух вариантах:

– сухое измельчение на воздухе до одинаковой дисперсности — 95 % менее 45 мкм с последующим контактом в реакторе с аммиачной водой;

– диспергирование сразу в водоаммиачной среде.

Анализ результатов опытов по первому варианту показал:

а) время измельчения до заданных параметров дисперсности было минимально на мельницах типа «Млын», на 30...35 % больше на ДЕЗИ-31 и мельнице КГМИ и на 50 % больше на мельнице типа РТ-1;

б) изменение влажности было минимальным в мельницах типа «Млын», чуть больше — в РТ-1, а на мельницах ДЕЗИ-31 и КГМИ отмечалось уменьшение влажности угля на 10...12 %;

в) выход гуматов аммония коррелировался с влажностью: чем больше влажность угля, тем выше выход;

г) выход гуматов изменялся в пределах 25...20 %;

д) низкий выход гуматов связан с низкой смачиваемостью высокодиспергированного угля.

Опыты по второму варианту проводили только на мельницах типа РТ-1 и «Млын», так как остальные мельницы не работали на измельчение в жидкой среде. В этих опытах также общим параметром была дисперсность. Для сравнения были проведены опыты и на шаровой мельнице. Анализ данных опытов показал: в ряде мельниц — «Млын», РТ-1 и шаровая мельница — выход гуматов аммония после одноразовой обработки составлял, соответственно, 67, 48, и 30 %, а после трехразовой, соответственно, 95, 80 и 51 %; так же возрастают временные и энергозатраты с 0,5 до 1 кВт / м<sup>3</sup>.

В мельницах типа «Млын» происходит наиболее сложный вид разрушения твердого тела: раздавливание и истирание со сдвигом с наложением виброколебаний. Очевидно, здесь происходит и максимальная активация, так как в этом случае во внутреннюю энергию переходит большая доля подводимой внешней энергии, чем в мельницах других типов и других видах разрушения. В проведенной работе только на мельницах «Млын» заметна достаточно четкая корреляция механохимической активации с технико-экономическими показателями проводимых процессов.

Таким образом, механохимическая активация процесса извлечения гуминовых веществ из землистого бурого угля с помощью аммиачной воды позволяет получить водорастворимые гуматы аммония с высоким выходом и низкими удельными энергозатратами, которые являются основой для приготовления эффективных удобрений для целого ряда культур.

Расширение использования порошков и паст из тонкодисперсных материалов органического происхождения требует создания

новых технологий и оборудования, что было испытано с применением пружинной мельницы тонкого помола. При проведении исследований в качестве сырья использовали торф и костру (отходы льнопроизводства), дисперсность ( $P \leq 250$ ) этих материалов до и после переработки составляла, соответственно, 56,0 и 96,0 % для торфа, 5,0 и 91,0 % — для костры [242].

Измельчение проводилось как в нормальном (сухом) режиме, так и во влажном. Процесс измельчения в водной среде проходил значительно интенсивнее, вместе с тем он существенно зависел от природы перерабатываемого материала.

Полученные высококачественные порошки и пасты были использованы для получения экологически чистого связующего для производства костроплит, экспериментальных образцов заполнителей легких бетонов, теплоизоляционных материалов.

Широкое технологическое применение пружинных аппаратов может быть в приготовлении жидких комплексных удобрений, являющихся экологически наиболее безопасными и наилучшим образом усваиваемыми сельскохозяйственными культурами.

Эксперименты по получению различных жидких комплексных удобрений на стабилизаторе (3 % пульпа суперфосфата различных марок, определяемых по содержанию частиц крупностью до 3 мм) проводились на пружинном аппарате «Млын-ИО5» непрерывного действия.

Для суспензии ЖКУ 3-10-30 (азот—фосфор—калий) средний размер частиц составляет 7,71 мкм, для суспензии ЖКУ 13-13-13 — 6,95 мкм. Полученные суспензии не расслаиваются и пригодны для длительного хранения.

Проведены испытания промышленной пружинной мельницы в составе комплексной установки УС-10. В их результате установлено, что производительность достигает  $9 \text{ м}^3 / \text{ч}$  при мощности привода 2,2 кВт. Диспергатор ГАРТ установки УС-10 имеет двигатель мощностью 55 кВт.

Фактором, сдерживающим широкое внедрение новых ремонтных материалов, является нерешенный вопрос централизованного производства коллоидных цементных вяжущих. В этих условиях создание оборудования для приготовления на объектах коллоидных цементных клеев и растворов их активирования является актуальной задачей.

Коллоидные цементные вяжущие — это смесь цемента с песком, совместно домолотыми до получения удельной поверхности около  $5\ 000\ \text{см}^2 / \text{г}$ .

Выбору конструктивной схемы активатора для коллоидных вяжущих предшествовали технологические испытания, выполненные на лабораторной установке с трубчатым корпусом и объемом готовой смеси  $3\ \text{дм}^3$ . При этом частота вращения рабочего органа, выполненного из прутка проволоки  $d = 6\ \text{мм}$  с наружным диаметром навивки  $D = 65\ \text{мм}$ , была принята равной  $1\ 450\ \text{мин}^{-1}$ .

Испытания были проведены на растворе, состоящем из воды, цемента, песка при соотношении 1:2:4,15 при времени обработки  $t = 5\ \text{мин}$ , результаты опытов, представленные в таблице 6.3, получены при энергонапряженности процесса в рабочей зоне установки  $0,4 \dots 0,6\ \text{кВт} / \text{дм}^3$ . Обнаружен существенный прирост прочности образцов, размеры которых  $100 \times 100 \times 100\ \text{мм}$ .

Очевидно, что это достигается за счет интенсивного домола компонентов, особенно цементных зерен, являющихся наименее прочными личными в составе активированной смеси.

На основании проведенных технологических испытаний разработана пружинная мельница для получения коллоидных цементных вяжущих с вместимостью загрузочной емкости  $60\ \text{л}$ , предназначенная для работы в производственных условиях непосредственно на строительных объектах.

Т а б л и ц а 6.3 — Результаты испытаний пружинной мельницы при производстве коллоидных цементных вяжущих

Типы образцов	Номера образцов	Прочность образцов на сжатие $R_{сж}$ , МПа	Среднее значение прироста прочности активированных образцов, %
Контрольные (неактивированные)	1	7,70	0
	2	7,76	
	3	8,70	
Активированные	1	23,30	186
	2	24,20	
	3	21,80	

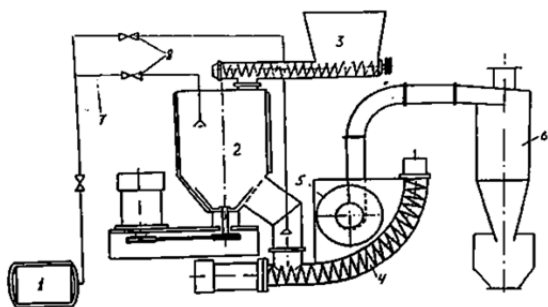
*Криоизмельчение полимеров в пружинных мельницах.* Традиционно измельчение полимерных материалов осуществляют при охлаждении их ниже температуры стеклования. Специфика криоизмельчения требует минимизации потерь сжиженных газов на охлаждение измельчительного оборудования и в окружающую среду. Поэтому из перечисленного выше многообразия способов механического разрушения реальное практическое воплощение получили лишь машины камерного типа, имеющие строго ограниченный объем помольного пространства, легко изолируемый от окружающей среды, либо машины с небольшим временем пребывания материала в зоне дезинтеграции. Тонкое и сверхтонкое измельчение полимеров требует значительных временных интервалов (от десятка до сотен минут). Такое измельчение целесообразно вести в замкнутом объеме без циркуляции материалов по внешним контурам и при отсутствии ненужных тепловых потерь.

В криоизмельчении важно, во-первых, отведение тепла механического контакта для поддержания полимеров в охрупченном состоянии, во-вторых, выведение из помольного пространства уже измельченных, достигших конечного размера частиц.

С этих позиций периодическое измельчение в замкнутом объеме может проигрывать по удельным показателям проточному непрерывному способу обработки, так как требует поддержания в помольном пространстве более низких температур, компенсирующих локальное тепловыделение и поддерживающих сыпучесть измельчаемого материала.

Выделим специфические требования, характерные для криогенного измельчения материалов: минимальные габаритные размеры и масса измельчителя; простота конструкции его корпуса; минимальные внешние транспортные цепи; совмещение процессов измельчения и классификации в одном теплоизолированном объеме; максимальное использование температурного потенциала холодильного агента; высокая эффективность устройств предварительного охлаждения материалов; использование энергии отработанных паров холодильного агента на проведение процессов классификации; высокая эффективность механического контакта, исключающая холостые непроизводительные перемещения и избыточное тепловыделение.

С учетом приведенных требований разработана полупромышленная установка для криоизмельчения полимерных материалов растительного и синтетического происхождения. Схема установки изображена на рисунке 6.6.



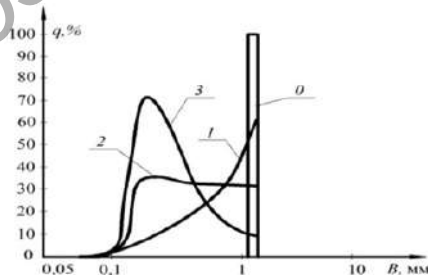
1 — емкость для жидкого азота; 2 — дробилка;  
3 — шнековый питатель; 4 — винтовая мельница; 5 —  
классификатор; 6 — циклон; 7 — система трубопроводов;  
8 — запорные вентили

Рисунок 6.6 — Полупромышленная установка  
для криоизмельчения полимеров

Данная схема включает предварительное охлаждение в шнековом питателе 3 и предварительное дробление гранул исходного материала в роторной дробилке 2. Подача охлаждающих сжиженных газов осуществляется из сосуда Дьюара 1 по системе трубопроводов 7 через запорные вентили 8 [267].

Основные технологические функции в такой установке выполняет пружинный измельчитель, что позволяет получить требуемый порошок при удельном расходе жидкого азота не более 2...3 кг на 1 кг измельченного продукта.

Типичные кривые распределения частиц измельченного ПЭТФ производства ОАО «Могилевхимволокно» приведены на рисунке 6.7.



0 — исходная фракция; 1, 2, 3 — после 2, 5  
и 11 мин при обработке в винтовой мельнице  
соответственно

Рисунок 6.7 — Дифференциальные кривые  
распределения частиц ПЭТФ по размерам

В заключение отметим, что пружинные вибрационные мельницы имеют высокую эффективность в сравнении с известными механическими измельчителями и позволяют получать высококачественные порошковые материалы и композиции различного технологического назначения.

## **6.2 Вибрационные пружинные грохоты и их технологическая эффективность**

*Разработка конструкций пружинных грохотов.* В различных отраслях промышленности необходимой технологической стадией многих производственных процессов является грохочение (разделение сыпучих материалов по крупности механическим способом), которые осуществляются на просеивающих поверхностях с отверстиями различной формы. Просеивающая поверхность может быть изготовлена в виде колосниковой решётки, листовой решётки со штампованными отверстиями, проволочных сит и сит, изготовленных из эластичных нитей (струн) [112; 114].

В подавляющем большинстве современных грохотов движущей силой для обеспечения прохождения части материала через отверстия сит является вибрация, что обеспечивается выполнением их приводов в виде вибраторов. Основные проблемы использования грохотов связаны с разделением мелкозернистых и влажных материалов, однако используемые для их решения подходы не только усложняют конструкцию, но значительно снижают производительность аппаратов. Это вызывает необходимость создания новых конструкций оборудования для переработки подобных продуктов. Одним из вариантов в решении подобных задач может быть использование в качестве просеивающих поверхностей винтовых пружин [165; 168].

Конструктивные особенности винтовых пружин, в частности, их способность деформироваться, наличие достаточно стабильных по размерам межвитковых зазоров и возможность совершать малые высокочастотные колебания позволяют использовать их в качестве просеивающих рабочих органов (поверхностей) аппаратов для разделения зернистых материалов по крупности. Принципиальная схема выполнения единичного рабочего органа для пружинного грохота иллюстрируется рисунком 6.8, где представлен механизм просеивания [98].

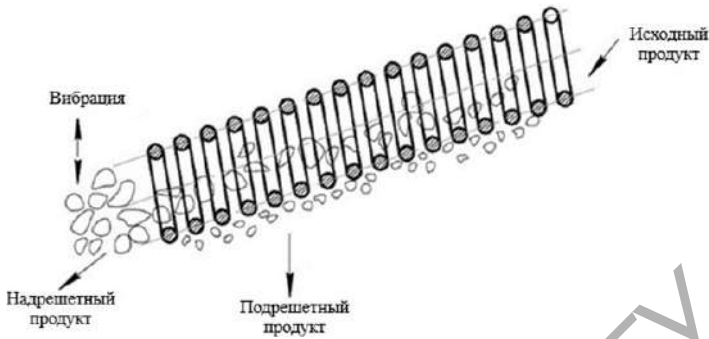
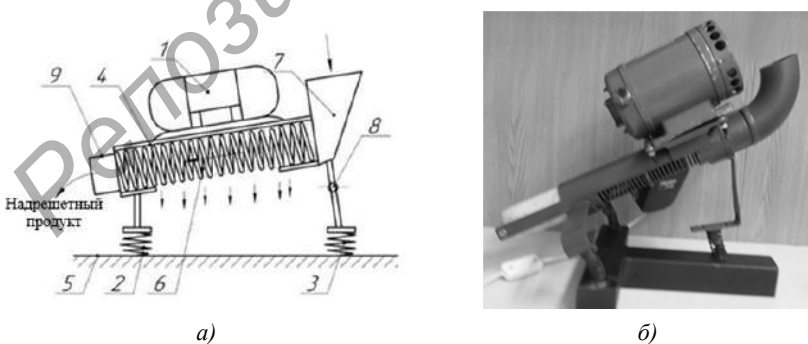


Рисунок 6.8 — Механизм просеивания материала в пружинном грохоте

Описанный механизм следует дополнить тем, что границы разделения регулируются путем осевого перемещения витков пружины. Конструктивная схема реализации рабочего процесса пружинного грохота показана на рисунке 6.9, *а*. Общий вид экспериментальной установки на рисунке — 6.9, *б*.

Конструкцию грохота образуют вибропривод 1, амортизаторы 2, 3, короб 4, рама 5, пружинное сито 6 и загрузочный патрубок 7. Для изменения режимов работы предусмотрено устройство для регулировки угла наклона и механизм 9 для регулирования границ разделения.



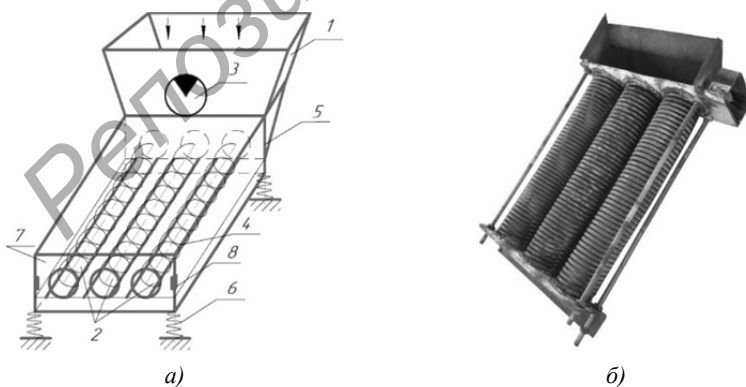
*а* — конструктивная схема; *б* — экспериментальная конструкция

Рисунок 6.9 — Пружинный грохот

Пружинный грохот работает следующим образом. Включается вибропривод *1* и приводит в колебательное движение смонтированный посредством амортизаторов *2, 3* короб *4* на раме *5*, в который помещена спиральная просеивающая поверхность *6* — винтовая пружина. Просеиваемая масса зернистых материалов подается в устройство для загрузки материала через загрузочный патрубок *7* и далее внутри пружинной просеивающей поверхности *6*. Просеивание материала осуществляется за счет того, что просеивающая поверхность *6*, смонтированная в коробе *4* с продольным пазом, установленным с определенным углом наклона к горизонту, изменяемая с помощью устройства для регулировки угла наклона *8*, совершает вместе с материалом интенсивные колебания и имеет необходимый зазор между витками.

Для просеивания большого объема материала разработана конструкция рабочего оборудования промышленного пружинного грохота, представленного на рисунке 6.10, *а*, его рабочее оборудование, выполненное в виде набора пружин, приведено на рисунке 6.10, *б*.

Конструкция пружинного грохота для разделения сыпучего материала содержит устройство для загрузки материала *1*, винтовые просеивающие поверхности *2*, выполненные по меньшей мере из одного ряда параллельных между собой винтовых цилиндрических пружин, свободно установленных на поддерживающих стержнях *4* с помощью поддерживающих втулок на коробе *5*, связанном с приводом колебательных движений *3*.



*а* — конструкция рабочего оборудования; *б* — рабочее оборудование

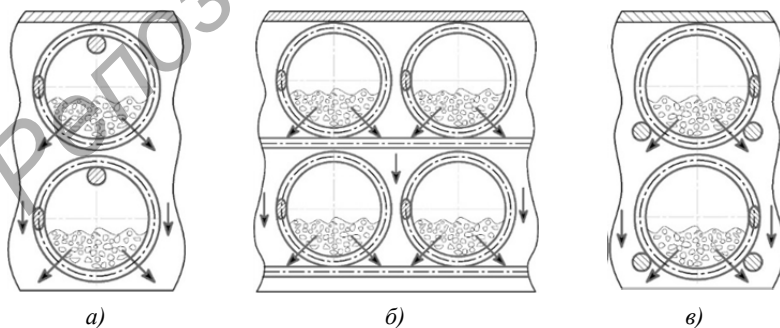
Рисунок 6.10 — Конструкция пружинного грохота секционного типа

Нижние концы винтовых цилиндрических пружин закреплены на подвижной торцевой стенке 7, которая снабжена механизмом перемещения относительно их центральных осей и механизмом фиксации 8 к коробу 5. Вся конструкция смонтирована на коробе 5, который установлен посредством амортизатора 6 на опорном основании.

Особенностью конструкции пружинного грохота является возможность выполнения многоярусной схемы, при которой просеивающая поверхность состоит из большого набора пружин, что позволит повысить производительность и уменьшить его габариты, схемы вариантов поярусной установки рабочих органов пружинного грохота приведены на рисунке 6.11 [75].

В силу определенных причин одной из главных проблем проектирования пружинных грохотов для мелкого грохочения является необходимость создания агрегатов повышенной производительности, для этого нами разработана конструкция пружинного грохота промышленного назначения [75].

Его конструкция изображена на рисунке 6.12. Грохот включает в себя опорную раму 1, на которую посредством пружинных амортизаторов 3, 4 устанавливается короб 2 с дебалансным виброприводом 5, два его борта 6, 7 образуют боковые стенки бункера 8 для приема горной массы, причем по бортам 6, 7 короба 2 с его внешних сторон расположены лотки 9, 10, 11 и 12 соответственно для отвода из рабочих зон мелкой и крупной фракций после процесса разделения материала на пружинных просеивающих поверхностях 15.



*a* — с помощью одного цилиндрического прутка; *б* — с помощью конструктивных стержней; *в* — с помощью парных цилиндрических прутков

Рисунок 6.11 — Варианты установки винтовых цилиндрических пружин

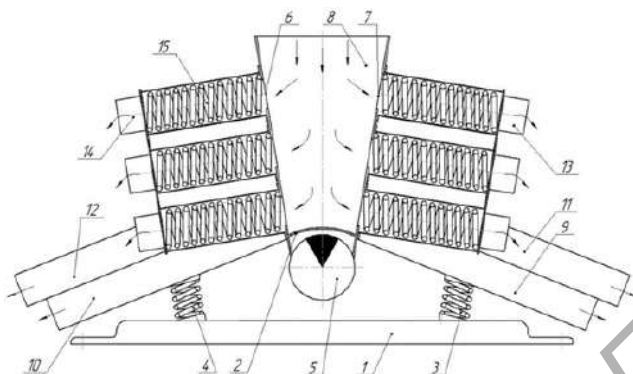


Рисунок 6.12 — Общий вид пружинного грохота

Для изменения границы разделения и компенсации износа витков пружин предусмотрены устройства 13 и 14 для регулирования межвитковых зазоров.

Перед началом работы грохота пружинные рабочие органы 15 регулируются на заданную границу разделения. Далее включается дебалансный вибропривод 5 и за счет создаваемой им вынуждающей силы приводит в колебательные движения установленный на раме 1 посредством пружинных амортизаторов 3, 4 короб 2. Посредством механического питателя в бункер 8 подается гранитный отсев, который через окна на бортах 6, 7 поступает во внутренние полости вибрирующих пружин 15, где происходит его разделение на нужные фракции, причем мелкая фракция проходит между витками и сыпается на лотки 9, 10, а крупная проходит внутренние полости пружин и с их торцов выгружается на лотки 10, 11. Отсортированный таким образом материал поступает на соответствующие конвейеры и далее транспортируется к местам складывания.

В представленной конструкции грохота реализована многоуровневая схема установки пружинных просеивающих элементов, что позволяет повысить производительность установки и уменьшить ее габаритные размеры, в частности, длину. Важнейшими отличительными признаками любого из исполнений пружинного грохота является возможность плавного регулирования границы разделения путем изменения межвиткового зазора, повышенная долговечность, основанная на возможности компенсации износа за счет поджатия или проворота пружин, и самоочищаемость.

*Исследование технологической эффективности пружинного грохота.* Для проведения экспериментальных исследований использовали лабораторный грохот, изображенный на рисунке 6.9 и имеющий следующие характеристики:

– размеры просеивающей поверхности (пружины): наружный диаметр пружины  $D = 50$  мм, диаметр сечения витков пружины  $d = 4$  мм, длина пружины  $l = 250$  мм;

– угол наклона просеивающей поверхности к горизонту  $\alpha = 0 \dots 25^\circ$ ;

– частота вращения дибалансного вала  $n = 2\,200$  об. / мин;

– мощность электродвигателя  $N = 0,12$  кВт.

При экспериментальных исследованиях использовали кварцевый песок крупностью  $0 \dots 3$  мм с влажностью  $2,5\%$ . По отобраным после просева на грохоте пробам проводился ситовой анализ (определялась эффективность грохочения, а также замерялась производительность грохота).

Основным показателем грохочения является эффективность  $E$  (%), характеризующая точность разделения материала по крупности. Численно она определяется отношением количества подрешетного продукта к общему количеству его в исходном материале, т. е. представляет собой выход нижнего класса в подрешетный продукт. Эффективность грохочения определяли по известной методике [112].

В результате анализа предварительных экспериментальных данных в качестве факторов влияния были выбраны: межвитковый зазор, угол наклона и амплитуда колебаний просеивающей поверхности. Зазор просеивающей поверхности изменялся в ходе эксперимента от  $0,5$  до  $1,5$  мм, а угол наклона — от  $5$  до  $25^\circ$ . Амплитуда колебаний просеивающей поверхности изменялась путем варьирования массы эксцентрика двигателя и составляла  $1,5 \dots 4$  мм.

Характер зависимостей, представленных на рисунке 6.13, показывает, что самая высокая эффективность грохочения ( $89,2\%$ ) обеспечивается при амплитуде колебаний  $A = 4$  мм при зазоре просеивающей поверхности в  $1,5$  мм и угле наклона просеивающей поверхности в  $5^\circ$ .

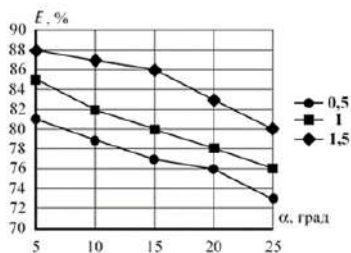


Рисунок 6.13 — Изменение эффективности грохочения от угла наклона грохота при амплитуде колебания пружины  $A = 4$  мм

На рисунке 6.14 представлена зависимость эффективности разделения сыпучего материала от угла наклона просеивающей поверхности к горизонту при амплитуде колебаний 2,5 мм. При данной амплитуде колебаний эффективность грохочения составила 80,4 % при угле наклона 5° и зазоре между витками 1,5 мм.

На рисунке 6.15 показана зависимость эффективности разделения сыпучего материала от угла наклона просеивающей поверхности к горизонту с амплитудой колебания 1 мм с максимальной эффективностью в 75 % при угле наклона 5° и зазоре между витками 1,5 мм.

Для определения производительности по подрешетному продукту при сохранении качества получаемого сыпучего материала рассматривалось прохождение зерен материала через зазоры пружинного рабочего органа за определенные промежутки времени. Определен объем части материала, который обеспечит производительность пружинного грохота по подрешетному продукту для одного рабочего органа.

Производительность по подрешетному продукту  $Q$  однопружинного грохота может быть определена по формуле  $Q = 3600Fv\rho k_p k_{\text{усл}}$ , где  $F$  — площадь живого сечения просеивающей поверхности, м<sup>2</sup>;  $v$  — скорость прохождения материала через просеивающую поверхность,  $v = 0,06$  м/с;  $\rho$  — плотность материала,  $\rho = 1525$  кг/м<sup>3</sup>;  $k_p$  — коэффициент разрыхления материала,  $k_p = 0,2 \dots 0,3$ ;  $k_{\text{усл}}$  — коэффициент, учитывающий условия работы,  $k_{\text{усл}} = 0,6 \dots 0,7$ .

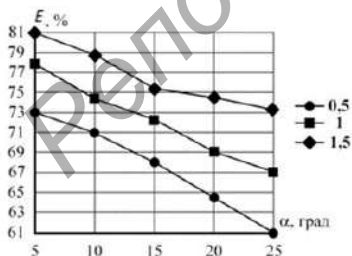


Рисунок 6.14 — Изменение эффективности грохочения от угла наклона грохота при амплитуде колебания пружины  $A = 2,5$  мм

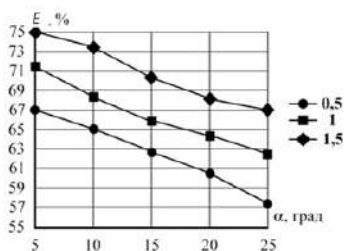


Рисунок 6.15 — Изменение эффективности грохочения от угла наклона грохота при амплитуде колебания пружины  $A = 1$  мм

Результаты экспериментов показали, что производительность по подрешетному продукту находится в диапазоне 67...108 кг / ч. При этом установлено, что оптимальное значение производительности достигается путем изменения угла наклона просеивающей поверхности. Расчетное значение производительности по подрешетному продукту составило 101,3 кг / ч с эффективностью процесса грохочения 89,2 %. Дальнейшее увеличение угла наклона и зазора рабочего органа приводит к снижению эффективности процесса вследствие увеличения движения материала по просеивающей поверхности [75].

Представленные выше результаты исследований показывают непосредственную зависимость эффективности и производительности рабочего процесса грохота от угла наклона, границы разделения (зазор) и амплитуды колебаний просеивающей поверхности.

В результате экспериментальных исследований было выявлено, что оптимальными параметрами грохочения с максимальной эффективностью и производительностью являются: угол наклона  $\alpha = 5...10^\circ$ , границы разделения материала  $b = 1...1,5$  мм, амплитуда колебаний  $A = 4$  мм.

Анализ исследований показал, что с увеличением угла наклона просеивающей поверхности эффективность грохочения уменьшается и производительность по подрешетному продукту уменьшается.

Для ряда технологических условий пружинный грохот может представить интерес как агрегат для предварительной сушки, воздушной очистки от пыли, оттирки крупки от налипшей мелочи и ряда других операций. Наличие пространственной формы просеивающих поверхностей и их разноуровневое расположение открывает новые конструктивные возможности в проектировании пружинных грохотов.

Наиболее предпочтительными областями применения пружинных грохотов можно считать тонкое грохочение с границами разделения 0,5...3 мм, в том числе для переработки гранитного отсева, подготовки компонентов для производства различных видов строительных материалов, разделение горно-химического и горнорудого сырья по фракциям, приготовление составляющих асфальтобетонных смесей, сортировка гранитного отсева (камнедробление) и т. д. По мнению авторов, наибольшая эффективность от использования пружинных грохотов в Республике Беларусь может быть получена в циклах обогащения ОАО «Беларуськалий».

Предполагается, что процесс мокрого разделения материалов в пружинном грохоте гораздо эффективнее и производительней, чем по сухому способу, в том числе с выполнением дополнительных функций, например, промывки исходных компонентов.

Определены направления дальнейшего совершенствования пружинного грохота, заключающиеся в исследовании кинематических параметров грохота и их влияния на основные показатели работы, оптимизации элементов рабочего оборудования и изучении условий работы пружинного грохота по мокрому способу, в исследовании закономерностей собственных колебаний элементов пружин рабочих органов и их влияния на границы разделения.

### **6.3 Виброуплотнители бетонных смесей с пружинным излучателем колебаний**

*Разработка способа пружинного виброуплотнения бетонных смесей и его техническая реализация.* Уплотнение бетонных смесей является важнейшей стадией строительного производства и оказывает еще большее влияние на свойства бетона, чем перемешивание [26; 63; 89]. Недоуплотнение или неравномерное уплотнение приводит к резкому уменьшению прочности бетона, ухудшает его долговечность и другие свойства. Из различных способов уплотнения бетонных смесей наибольшее распространение получило вибрирование, которое в монолитных конструкциях реализуется с помощью глубинных вибраторов [23; 63].

При вибрировании бетонной смеси ее начальная структура предельно разрушается, внутренние силы трения и сцепления уменьшаются до минимума, в полной мере проявляется эффект тиксотропного разжижения, предельное напряжение сдвига приближается к нулю. Смесь начинает течь, как тяжелая жидкость, заполняя форму. Одновременно с этим падение вязкости растворной части смеси и цементного теста позволяет заземленным пузырькам воздуха всплывать на поверхность. Однако из-за понижения взвешивающей способности смеси при длительной вибрации начинается расслоение, происходит оседание наиболее тяжелых частиц крупного заполнителя.

Очень важно знать, что при правильно подобранном составе смеси этот нарушающий однородность бетона процесс протекает

достаточно медленно и при правильно назначенной продолжительности вибрации, не вызывает к концу уплотнения смеси ее расслоения. Эффективность уплотнения зависит от основных параметров вибрации прежде всего, ее частоты и возникающей в бетонной смеси амплитуды колебаний. Внутреннее вибрирование энергетически наиболее выгодно, так как возбудитель колебаний передает всю энергию непосредственно уплотняемой смеси с минимальными потерями [63; 89].

Для качественного уплотнения бетонной смеси требуется, чтобы в уплотняемой среде одновременно были налажены различные частоты (полнечастотное вибрирование), при которых все зерна твердой фазы, в том числе цемента, могут одновременно компактно располагаться в бетонной смеси. Кроме того, для плотной упаковки зерен мелкого и крупного заполнителей в бетонной смеси и предотвращения ее разрыхления возникающие при вибрации инерционные силы должны совпадать с направлением силы тяжести [23].

Учитывая, что собственно уплотнение является одной из определяющих, но явно не самой последней стадией в технологии бетона, за которой следуют процессы диффузии, гидратации, термовлажностной обработки и другие, можно предположить, что этот спектр обработки рационально расширить путем введения в него механоактивации компонентов бетонной смеси при совмещении этой операции с виброуплотнением и, что особенно важно, осуществления на одном оборудовании.

Механоактивация — способ интенсификации физико-химических процессов путем изменения реакционной способности твердых веществ под действием механических сил. Основными инструментами реализации процессов механоактивации являются механоактиваторы, т. е. мельницы, в которых посредством удара или трения изменяется химическая активность обрабатываемых компонентов [256]. Механоактивация представляет собой многоступенчатый процесс накопления энергии. Он начинается с грубого разрушения частиц материала и заканчивается его трансформацией путем микродеформаций поверхностных слоев компонентов бетонной смеси.

Для глубинного уплотнения бетонных смесей используется достаточно большое количество разнообразных по конструкции устройств, однако по принципу действия среди них преобладают вибрационные, а по техническому исполнению — уплотнители с рабочим оборудованием типа «булава» с приводом посредством гибко-

го вала или со встроенным в корпус излучателя колебаний электродвигателя. Действие виброколебаний на уплотняемую смесь в этих аппаратах осуществляется в горизонтальной плоскости, а основная модернизация виброизлучателей касается преимущественно их формы и вида поверхности (лопастные, разрезные, оребренные и другие вибронаконечники). Последнее обстоятельство продиктовано необходимостью увеличения излучающей поверхности для передачи большего количества энергии в уплотняемую среду [63; 89].

Из важнейших технологических недостатков существующих глубинных вибраторов необходимо отметить содержание и порядок выполнения ими всех стадий процесса, который заключается в последовательных стадиях погружения вибронаконечника в бетонную смесь и перестановок его из одного положения в другое, что требует значительного времени и является трудоемкой операцией, а в итоге приводит к резкому уменьшению производительности и не позволяет равномерно уплотнять весь массив бетонной смеси. Это является следствием конструктивного исполнения виброизлучателя, который оператору не представляется возможным перемещать в горизонтальной плоскости из-за большого сопротивления бетонной смеси и невозможности составляющих ее частиц проходить непосредственно через рабочий орган [24; 238].

Имеющиеся научно-технологические наработки [23], основанные на исследовании влияния вибрирования на реологические характеристики, кинетику твердения и набор прочности цементного камня, показывают, что создание интенсивных вибрационных колебаний в уплотняемой бетонной смеси приводит не только к повышению плотности, но и увеличивает прочность бетона в 1,2...1,3 и более раза. Это представляется чрезвычайно важным обстоятельством в понимании выбора важнейших направлений повышения качества конгломератных материалов на основе вяжущих веществ. Возможен перенос части работы активации в эту стадию технологического процесса, что является пионерным решением в общей технологии бетона. Убедительным доводом в пользу сказанного служит тот факт, что значительная часть вяжущих веществ в бетонных изделиях выполняет функции мелкого заполнителя [23; 24].

Идеология создания нового вида оборудования для совмещения процессов глубинного уплотнения и механоактивации бетонной смеси сводится к приданию рабочему органу двух функций — виб-

роизлучателя и механоактиватора. В качестве такого устройства может быть использована цилиндрическая пружина, витки которой совершают растягивающе-сжимающие перемещения вдоль своей оси. Приводной механизм пружинного излучателя колебаний основан на растяжении или сжатии витков пружины, что определяет его устройство и принцип действия в составе конкретного агрегата [71; 197; 238].

Рабочий орган пружинного излучателя колебаний может быть выполнен как в виде пружины растяжения, так и в виде пружины сжатия. В первом случае свободный конец рабочего органа перемещается с помощью жесткого элемента (стержня) или штока, во втором — это перемещение производится либо жестким, либо гибким элементом (цепь, канат), работающим на растяжение. Тело пружины, погружаемое в бетонную смесь и находящееся в близком к вертикальному положению, совершает сложные поличастотные колебания, причем наибольшую амплитуду при заданной частоте имеют вынужденные осевые колебания витков, обеспечиваемые приводным механизмом. Генерируемые при работе виброизлучателя собственные колебания витков значительно меньше по амплитуде и больше по частоте, чем вынужденные. Совокупность перечисленных видов колебаний способствует эффективному уплотнению разноточечных компонентов бетонной смеси [162; 163; 177].

Принцип действия пружинного излучателя колебаний приведен на рисунке 6.16, а характер излучения колебаний для варианта его расположения в реальных условиях уплотнения и управления оператором — на рисунке 6.17.

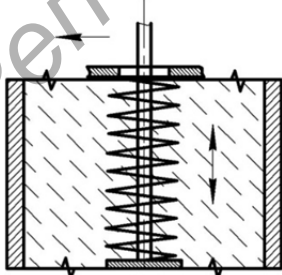


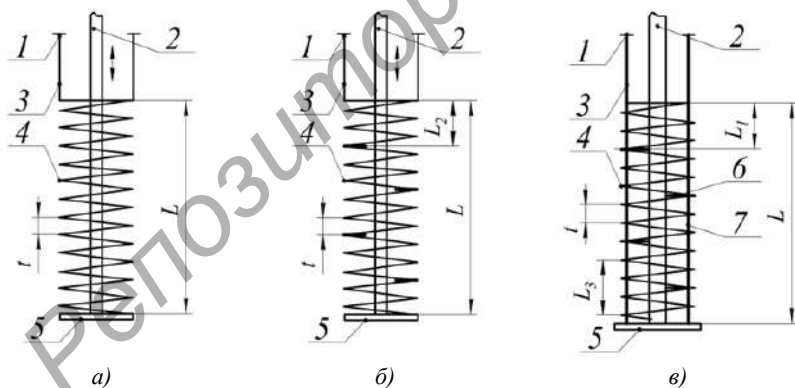
Рисунок 6.16 — Принцип действия пружинного виброизлучателя колебаний



Рисунок 6.17 — Характер излучения колебаний

Для передачи внешних воздействий от приводного электродвигателя на рабочие витки пружинного виброуплотнителя возможны различные варианты, в частности, приведение их в колебания непосредственно через свободный конец пружины посредством планок на неподвижном штоке при дополнительном защемлении витков излучателя. Примеры реализации этих вариантов показаны на рисунке 6.18.

При таком исполнении по первому варианту (см. рисунок 6.18, а) амплитуда колебаний витков равна перемещению штока, деленному на число рабочих витков, по второму варианту (см. рисунок 6.18, б) амплитуда колебаний витков определяется числом витков на отдельных частях пружины между соседними планками, соотнесенными на ход подвижного штока, а по третьему варианту (см. рисунок 6.18, в) — то же самое, но с увеличением амплитуды колебаний в число раз, равное числу отрезков пружины между планками на удлинителе держателя. В идеальных условиях амплитуда колебаний отдельных витков пружины в последнем случае может быть равна перемещению подвижного штока.



а — привод через свободный конец пружины; б — привод от планок подвижного штока; в — привод от планок подвижного штока при дополнительном защемлении витков излучателя

1 — корпус установки; 2 — шток; 3 — держатель; 4 — витки пружины;  
5 — поперечина; 6 — планка на штоке; 7 — удлинитель держателя

Рисунок 6.18 — Варианты сообщения вибрационных колебаний пружинному излучателю

Необходимость такого многообразия выполнения механизмов колебаний витков пружинного излучателя обусловлена различными требованиями к параметрам вибрации, в том числе амплитуде, частоте, как производной от их перемещения, сопротивления бетонной смеси, ее крупности и др. [162]. Не стоит забывать и машинные способы уплотнения больших массивов бетонной смеси. В этом случае возникает необходимость разработки виброуплотнителей с несколькими кассетами рабочих органов [71].

В случае работы пружинного уплотнителя по методу сжатия витков эффект вибрации, обеспечиваемый подтягиванием свободного конца пружины с помощью тягового элемента, помещенного внутри пружины и связанного вторым концом с эксцентриковым приводом. Изменять параметры вибрации при этом можно так, как это показано на рисунке 6.18, но следует иметь в виду, что условия силового нагружения пружинных рабочих органов лучше из конструктивных соображений при их сжатии. Конструктивное решение пружинного виброуплотнителя с приводом посредством использования пружины сжатия приведено на рисунке 6.19 в виде кинематической схемы.

В самом простом исполнении (см. рисунок 6.19) виброуплотнитель содержит смонтированный на приводном валу кривошип  $1$ , который с помощью шатуна  $3$ , установленного в шарнире  $2$ , соединен посредством поперечины  $5$  со свободным концом пружинного виброуплотнителя, состоящего из сопряженных между собой пружин  $6, 7$ . Второй конец пружинного рабочего органа упирается в стойку  $4$ , а шатун  $3$  свободно проходит через зону взаимного перекрытия, образованную пружинами  $6, 7$ .

Описанный механизм функционирует таким образом. При вращении кривошипа  $1$  шатун  $3$  приводится в возвратно-поступательные перемещения и с помощью поперечины  $5$  осуществляет периодические сжатия пружинного рабочего органа, который с такой же частотой за счет собственных внутренних

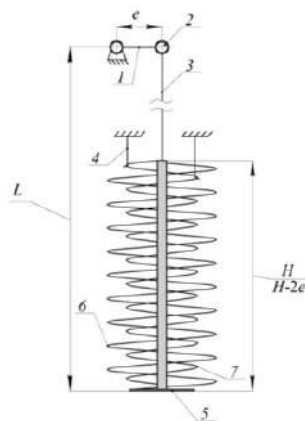
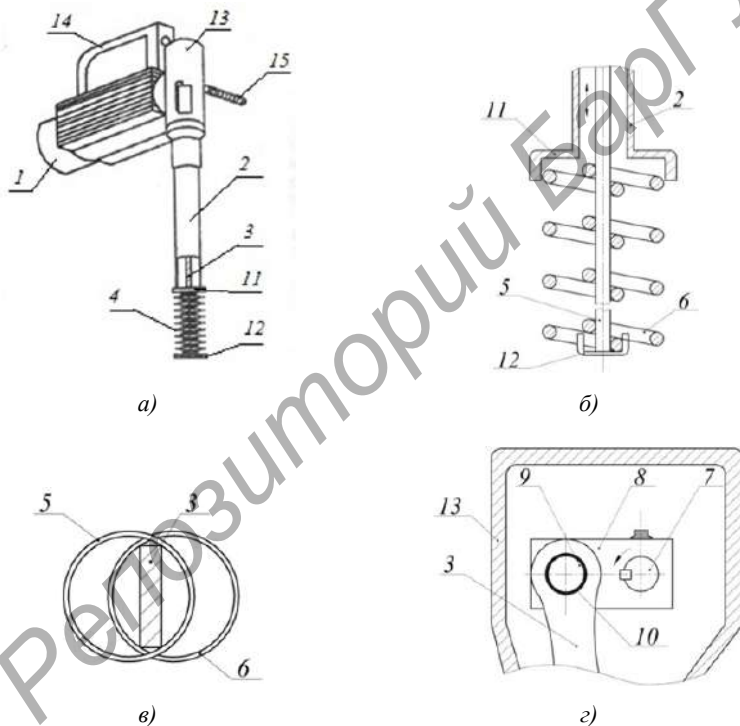


Рисунок 6.19 — Кинематическая схема пружинного виброуплотнителя на основе пружины сжатия

сил упругости возвращается в исходное положение. Выполненный таким образом генератор колебаний погружается в бетонную смесь в целях ее последующего уплотнения.

На основе разработанного вибрационного механизма спроектируем технологический аппарат для проведения его полномасштабных натурных испытаний и создания в последующем пружинного виброуплотнителя промышленного назначения. Конструкция такого оборудования представлена на рисунке 6.20.



*а* — общий вид пружинного виброуплотнителя; *б* — вариант монтажа пружинных излучателей колебаний; *в* — поперечный разрез составного виброизлучателя колебаний из двух помещенных друг в друга пружин; *г* — пример установки шатуна на оси кривошипа

Рисунок 6.20 — Конструкция пружинного виброуплотнителя с двумя совмещенными виброизлучателями

Пружинный виброуплотнитель пружинных смесей содержит малогабаритный механизированный привод 1, связанный с тяговым элементом 3, размещенным внутри полого кронштейна 2 и смонтированного на его свободном конце пружинного виброизлучателя 4, выполненного из двух цилиндрических пружин 5, 6. Для сообщения возвратно-поступательных перемещений тяговому элементу 3 служат приводной вал 7, кривошип 8 с эксцентриковым пальцем 9, на который он подвешивается с помощью втулки 10. Тяговый элемент 3, который в зоне цилиндрических пружин 5, 6 входит в зону перекрытия, которое они образуют между собой, целесообразно выполнять в виде полосы для придания всей конструкции рабочего оборудования большей устойчивости и увеличения излучающей виброколебания поверхности.

Смонтированные на тяговом элементе 3 посредством кронштейна 11 и поперечины 12 цилиндрические пружины 5, 6 образуют единый рабочий орган 4, который имеет некоторое предварительное поджатие витков для обеспечения устойчивого положения. Полный кронштейн 2 жестко связан с корпусом 13, который является основой всей конструкции. Для удержания оператором на весу виброуплотнитель снабжен рукоятками 14, 15.

Пружинный виброуплотнитель бетонных смесей работает следующим образом. Включается механизированный привод 1 и через приводной вал 7, кривошип 8, эксцентриковый палец 9 и втулку 10 сообщает возвратно-поступательные перемещения тяговому элементу 3, от которого через поперечину 12 на его нижнем конце силовые воздействия передаются цилиндрическим пружинам 5, 6. После вывода виброуплотнителя на устойчивый режим колебаний оператор, удерживающий его с помощью рукояток 14, 15, погружает виброуплотнитель в уплотняемую бетонную смесь и производит ее уплотнение, осуществляя перемещения по всему рабочему объему опалубки.

Уплотнение бетонной смеси может осуществляться различными приемами. При большом насыщении объема арматурой используется метод штыкования, выполняемый последовательным погружением вибрирующих пружин в уплотняемую смесь, подъема и перестановки на следующую позицию уплотнения. В этом случае имеется возможность устанавливать вибронаконечник под некоторым углом к вертикали, а также поворачивать в различных направлениях, что увеличивает объем уплотнения за один цикл установки.

При малой насыщенности объема арматурной, наиболее эффективно уплотнение методом протяжки, суть которого заключается в погружении излучателя на рабочую глубину и непрерывные перемещения его по мере уплотнения вдоль и поперек формы. Это невозможно для существующих глубинных уплотнителей, а для новой конструкции реально потому, что зазоры между витками позволяют перемещать пружинные рабочие органы через слой материала в горизонтальной плоскости. Такая способность пружинных виброизлучателей обусловлена созданием на витках пружин интенсивных колебаний, в том числе осевых, радиальных и изгибных. Это обеспечивает тиксотропное разжижение бетонной смеси, в которой рабочая часть уплотнителя перемещается без существенных усилий. Это дополнительно облегчает работу оператора и, что особенно важно, повышает производительность, так как значительно сокращает время на холостые действия и перестановку вибронаконечника из одного рабочего положения в другое.

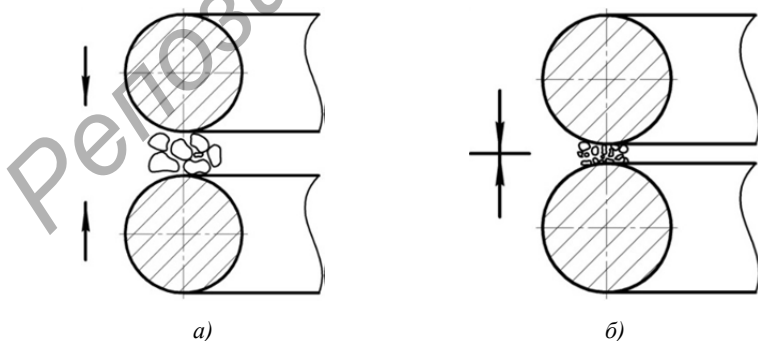
Важно отметить, что рабочие витки пружин 5, 6, погруженные в бетонную смесь и находящиеся в близком к вертикальному положению, совершают сложные поличастотные колебания, причем наибольшую амплитуду при заданной частоте имеют вынужденные осевые колебания витков, обеспечиваемые приводным механизмом. Генерируемые при работе виброизлучателя собственные колебания витков значительно меньше по амплитуде и больше по частоте, чем вынужденные. Совокупность перечисленных видов колебаний способствует эффективному уплотнению разнофракционных компонентов бетонной смеси [16; 219].

Характер механического действия пружинного виброизлучателя на компоненты бетонной смеси складывается из отдельных составляющих. Наибольшее количество элементарных объемов уплотняемой массы подвергается импульсному высокоскоростному ( $V = 1,5 \dots 2,5$  м/с) нагружению в межвитковых зонах с максимальными зазорами между ними. В этих условиях происходит интенсивное перемешивание на микроуровне и дезагрегация флокул и агрегатов цемента и других мелких частиц. Более интенсивен процесс воздействия на частицы бетонной смеси в зонах вхождения витков пружин друг в друга, где дополнительно осуществляется и некоторый помол, в том числе и таких достаточно прочных минералов, как кварцевый песок. В первом приближении этот про-

цесс изображен на рисунке 6.21, где в сечении показаны обращенные навстречу друг другу смежные витки пружин виброизлучателя.

Перечисленные процессы сопровождаются тиксотропным разжижением значительного объема бетонной смеси, в том числе и на достаточно большом расстоянии от пружинных излучателей, что в совокупности обеспечивает не только хорошее уплотнение, но и дополнительную обработку поверхности исходных компонентов непосредственно перед реакцией гидратации цемента в уплотненном массиве.

Рассматривая процесс активации компонентов бетонной смеси с помощью пружинного излучателя колебаний на основе математической модели, учитывающей все виды внешних воздействий на эту динамическую систему, следует выделить особый механизм нагружения обрабатываемой массы, который заключается в том, что периодически сближающиеся между собой витки рабочего органа создают в объемах смеси значительные сжимающе-сдвиговые напряжения. Это позволяет, во-первых, произвести дополнительное диспергирование некоторого количества цемента, во-вторых, втереть значительную часть цемента в поверхность минеральных частиц и вытеснить из нее мелкие пузырьки воздуха, в-третьих, образовать более однородную и плотную структуру бетонного камня. Общим итогом этой обработки является увеличение активной поверхности взаимодействия между собой всех компонентов бетонной смеси и, как следствие, улучшение качества бетонных изделий.



*a* — витки с максимальным зазором; *б* — витки с минимальным зазором

Рисунок 6.21 — Механизм активационного воздействия элементов виброизлучателя на компоненты бетонной смеси

*Результаты экспериментальных исследований виброуплотнителей бетонных смесей с пружинными излучателями колебаний.* При проведении экспериментальных исследований использовались различные конструкции пружинных виброуплотнителей. На первом этапе был проведен цикл поисковых испытаний на экспериментальном образце устройства. В качестве привода применили электрический перфоратор мощностью 780 Вт с амплитудой колебаний 5 мм на 20 рабочих витках пружины растяжения с наружным диаметром 50 мм и длиной 300 мм. Частота колебаний достигала 150 Гц. Общий вид экспериментального образца уплотнителя и комплект рабочего оборудования к нему приведены на рисунках 6.22 и 6.23.

Рабочий процесс виброуплотнителя с приводом от перфоратора осуществляется следующим образом. Включается привод и через подвижной шток посредством планки приводит в интенсивные колебательные движения пружину излучателя, который погружается в уплотняемую смесь и производит ее интенсивную обработку.



Рисунок 6.22 — Общий вид экспериментального пружинного виброуплотнителя



Рисунок 6.23 — Комплект рабочего оборудования к экспериментальному образцу виброуплотнителя

Излучатель в процессе работы располагается в положении, близком к вертикальному (см. рисунок 6.23), при этом способен без особых затруднений перемещаться вдоль уплотняемой поверхности, т. е. работать по методу протяжки.

Технологические испытания проводились на бетонных смесях с крупностью заполнителя до 20 мм и осадке конуса 30...70 мм. Поведение рабочего органа, который погружался в смесь в положении, близком к вертикальному, по сравнению с традиционными глубинными вибраторами с цилиндрическими вибронаконечниками, отличается целым рядом особенностей. Во-первых, такой виброизлучатель легче погружается в смесь и легче из нее выходит, во-вторых, наличие механизма уплотнения, совпадающего с вектором гравитации, приводит к подбиванию (уплотнению) смеси под торец рабочего органа и его постепенному вытеснению вверх, что предопределяет соответствующее управление его перемещением, в-третьих, возможно перемещение пружинного излучателя «сквозь» слой материала вдоль фермы со смесью, в-четвертых, его выглубление при быстром подъеме приводит к некоторому разрыхлению верхнего слоя, что легко исключается наклоном излучателя при его извлечении из смеси.

Установлено, что пружинный виброуплотнитель позволяет эффективно уплотнять практически все виды бетонных смесей независимо от их жесткости, гранулометрического состава, высоты уплотняемого слоя. При этом по сравнению с контрольными образцами, уплотненными на стандартных вибраторах, плотность массива, обработанного пружинными агрегатами, повышается не менее чем на  $50 \text{ кг} / \text{м}^3$ , что явно свидетельствует о более высоком качестве уплотнения и возможном эффекте механоактивации.

Вместе с тем было отмечено, что при отдельных частотах колебаний нарушается устойчивость пружинного рабочего органа в радиальном направлении как от резонанса, так и от недостаточной статической жесткости единичной пружины. Кроме того, собственно электрический перфоратор не подходит как надежный и эффективный привод для устройств подобного типа, что в итоге предопределило необходимость создания специального пружинного виброуплотнителя с двумя совмещенными пружинами в качестве излучателя виброколебаний.

Анализ предшествующих поисковых исследований пружинного способа уплотнения бетонных смесей показал, во-первых, что он

является патентно чистым и не имеет технических аналогов, во-вторых, полученные результаты позволяют рассматривать его как перспективное научно-техническое направление в области дальнейшего совершенствования технологии бетонных работ при монолитном строительстве. В рамках этого направления спроектирован и изготовлен опытный образец пружинного виброуплотнителя, который изначально предназначен для проведения целой гаммы технологических испытаний на бетонных смесях действующих предприятий. Изготовленный аппарат полностью соответствует по конструкции схемам, приведенным на рисунках 6.19 и 6.20. Его общий вид представлен на рисунке 6.24, комплект основных узлов и агрегатов — на рисунке 6.25, а техническая характеристика — в таблице 6.4.



Рисунок 6.24 — Общий вид опытного образца пружинного виброуплотнителя

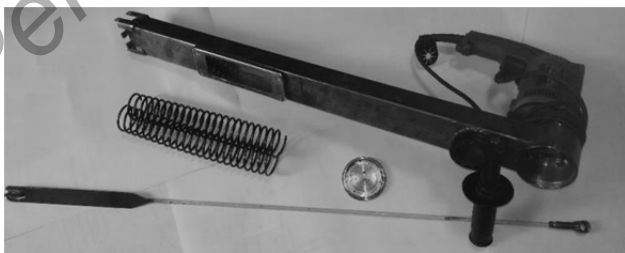
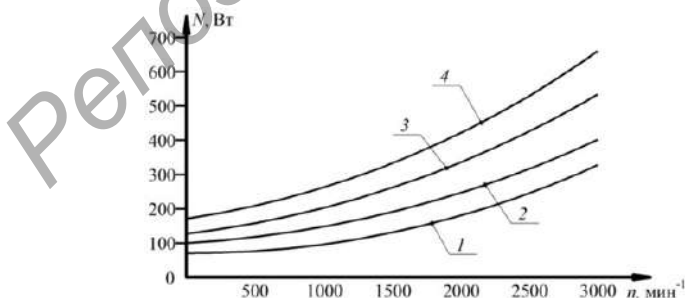


Рисунок 6.25 — Комплект основных узлов и агрегатов опытного образца пружинного виброуплотнителя

Т а б л и ц а 6.4 — Техническая характеристика опытного образца пружинного виброуплотнителя (тип двигателя — электродрель Makita HP1630)

Наименование параметра	Значение
Мощность электродвигателя, Вт	710
Частота вращения вала привода, об. / мин	0...3 200
Количество пружин, шт.	2
Длина пружин, мм	290
Шаг навивки, мм	13
Диаметр сечения витка, мм	4 / 4,5
Наружный диаметр пружины, мм	50
Величина эксцентриситета кривошипа, мм	13 / 16 / 19 / 22
Длина шатуна, мм	960
Габаритные размеры, мм:	
длина	420
ширина	215
высота	1 080
Масса, кг	6,1

На первом этапе экспериментальных исследований пружинного виброуплотнителя была проведена нагрузочная способность устройства, для чего проведены испытания по его работе в бетонной смеси с крупностью заполнителя 10...20 мм и осадкой корпуса 3...5 мм с погружением пружинного виброизлучателя на полную длину. Исследовалось влияние частоты колебаний виброизлучателя на потребляемую мощность для различных значений величины эксцентриситета кривошипа. Результаты испытаний представлены в графической форме на рисунке 6.26.



1 — эксцентриситет 13 мм; 2 — эксцентриситет 16 мм;  
3 — эксцентриситет 19 мм; 4 — эксцентриситет 22 мм

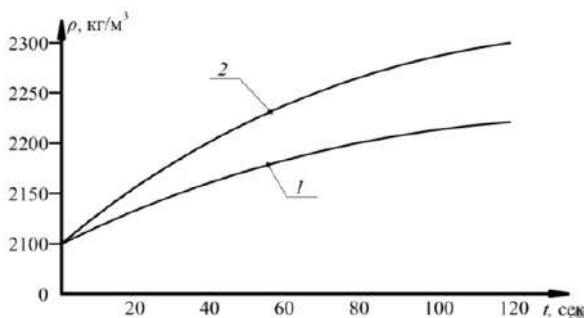
Рисунок 6.26 — Влияние частоты колебаний виброизлучателя на потребляемую мощность

На основании этих испытаний можно констатировать ряд заключений в работе пружинного виброгенератора колебаний. Во-первых, четко прослеживается влияние частоты и амплитуда колебаний шатуна на потребляемую электроприводом мощность, во-вторых, что важно для конкретной конструкции, мощности двигателя оказалось достаточно для всех режимов работы при условии полного погружения виброизлучателя колебаний в бетонную смесь, в-третьих, помещение шатуна непосредственно в зону перекрытия цилиндрических пружин обеспечивает их требуемую устойчивость и ограничивает резонансные явления, которые проявляются в холостом режиме работы. Выявлены две зоны резонансных частот, но кроме визуального наблюдения они не исследовались. В будущем планируется использовать явления резонанса для управления процессом уплотнения.

Следует заметить, что, как это отмечается и при работе пружинных мельниц, при отсутствии обрабатываемого материала вибрация пружин существенно возрастает, а потребляемая мощность при форсированных параметрах вибрации составляет более 50 % мощности, которая расходуется в работе с уплотняемым материалом. Способность виброуплотнителя работать по методу «протяжки» подтвердилась в полной мере, причем для этого не требуется прилагать особых усилий, а оператору перемещать пружинный виброуплотнитель проще всего на «себя» при установке его под углом  $60 \dots 75^\circ$  к горизонту.

Далее для исследования конкретных технологических возможностей пружинного виброуплотнителя были проведены испытания по влиянию времени виброобработки на плотность  $\rho$  уплотненного бетонного массива. Для этого приготовленную бетонную смесь по аналогии с предшествующим опытом уплотняли в небольшом объеме, а из-за ограничения по количеству опытов и их трудоемкости исследовались два режима работы виброуплотнителя. Первый: частота колебаний шатуна  $n = 40$  Гц, амплитуда колебаний  $A = 26$  мм; второй:  $n = 40$  Гц,  $A = 38$  мм. Результаты испытаний показаны на рисунке 6.27.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что уплотнение бетонной смеси в пружинных виброуплотнителях приводит к значительному повышению плотности бетона, следовательно, к увеличению его прочности. Прослеживается хорошая корреляция между параметрами вибрации и временем обработки бетонной смеси. При этом после 120 с вибрирования прирост плотности бетонного массива прекращается.



1 — частота колебаний  $n = 40$  Гц, амплитуда колебаний  $A = 26$  мм;  
 2 — частота колебаний  $n = 40$  Гц, амплитуда колебаний  $A = 38$  мм  
 Рисунок 6.27 — Влияние времени обработки бетонной смеси на плотность уплотненного бетона

Максимальное увеличение плотности бетона на  $100 \dots 200$  кг / м<sup>3</sup> по сравнению с контрольными образцами, т. е. полученными при ручном уплотнении, являются ценной информацией, которая показывает высокую эффективность работы пружинного виброуплотнителя и вызывает необходимость проведения дополнительных исследований по установлению влияния параметров вибрации на показатели качества получаемого бетона.

В качестве примера рассмотрим влияние частоты колебаний шатуна (пружинных излучателей) на прочность образцов затвердевшей бетонной смеси. Амплитуды колебаний, как и в предыдущих опытах, приняты равными 26 и 38 мм, что в пересчете на колебания отдельных витков дает значения 1,18 и 1,73 мм.

Исследуемая бетонная смесь приготавливалась на гранитном щебне крупностью 10...20 мм, кварцевом песке с модулем крупности  $M_{кр} = 1,58$  мм и портландцементе Кричевского цементного завода марки М500. Приготавливалась бетонная смесь с  $B / Ц = 0,4$  с осадкой конуса 30...50 мм. После уплотнения в течение 30 с и стадии затвердевания получали образцы — кубы с длиной ребра 100 мм, которые после набора прочности подвергались испытаниям на сжатие. Результаты испытаний приведены на рисунке 6.28.

В пределах возможных для реализации частот вращения приводного звена пружинного виброуплотнителя установлено, что прочность образцов бетона повышается по сравнению с контрольными образцами в диапазоне частот колебаний 25...50 Гц на 5...14 % при амплитуде колебаний  $A = 26$  мм и на 15...35 % при амплитуде колебаний  $A = 38$  мм.

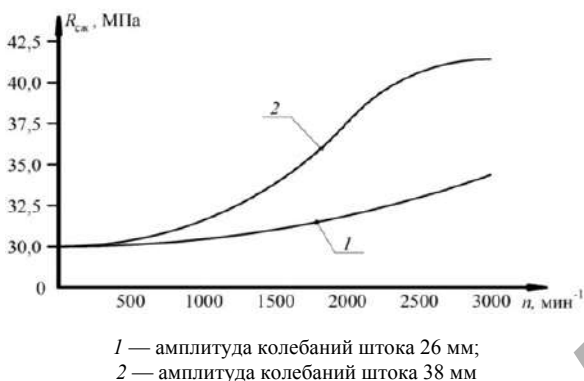


Рисунок 6.28 — Влияние частоты колебаний пружинного виброуплотнителя на прочность бетона

Увеличение амплитуды колебаний способствует передаче большего количества энергии в уплотняемую среду, что активизирует контактные взаимодействия на поверхности исходных компонентов, приводит к дезагрегации цемента и лучшему удалению воздуха с внешних слоев минеральных частиц.

Проведенные исследования пружинного способа уплотнения бетонных смесей охватывают только минимальную, необходимую для понимания основных процессов часть, которая показывает несомненную перспективность направления и его значимость для практического использования. Безусловно, здесь требуется выполнение широкого спектра исследований по изучению влияния геометрических, кинематических и энергетических параметров пружинных виброуплотнителей на их технологическую и экономическую эффективность, эксплуатационную надежность, эргономичность и ряд других показателей их работы.

В данной работе не рассмотрены технические решения других уплотнителей на основе упругих элементов, например, синусоидальных спиралей, пластин, оболочек и др. К их более детальной оценке целесообразно вернуться после соответствующих исследований пружинного способа уплотнения как обладающего необходимой функциональной полнотой этого направления проектирования оборудования для уплотнения бетонных смесей.

## 7 ИГЛОФРЕЗЕРНЫЕ АППАРАТЫ МНОГОЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ

### 7.1 Обоснование метода иглофрезерной дизинтеграторной переработки материалов

Одним из направлений развития агрегатов для помола сложных по составу, свойствам и реологическому поведению материалов может быть использование в них иглофрезерных рабочих органов, наборов или отдельных стержневых элементов [74], которые в силу особенностей конструктивного исполнения обеспечивают новые механизмы воздействия на перерабатываемую среду.

Основной прогресс в области тонкого и особенно сверхтонкого измельчения связан, по нашему мнению, с выполнением следующих условий [74; 161]:

- минимизацией размера мелющих тел;
- максимальным увеличением числа единичных воздействий на частицы обрабатываемого материала;
- максимальным увеличением энергонапряженности рабочего процесса;
- реализацией механизма разрушения по методу индивидуального зерна;
- оптимизацией вида прилагаемых внешних воздействий с учетом свойств перерабатываемого материала.

Это, конечно, далеко не полный перечень требований, необходимых для оптимизации процессов проведения дезинтеграторных технологий. Очень важно объединить их в одном агрегате, имеющем простую конструкцию, высокую износостойкость, надежность в работе и удобство в обслуживании.

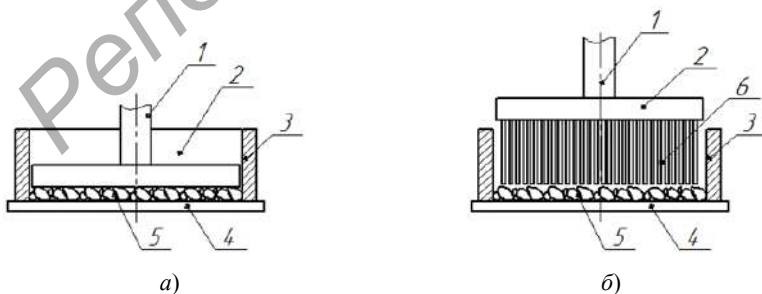
Одним из возможных вариантов технического решения некоторых проблем измельчения механическим способом может быть использование в качестве измельчающих элементов упругих стержней. Конструктивно штифтовые или иглофрезерные механизмы разрушения материала представляют собой наборы стержневых элементов, закрепленных одним концом в держателе, а торцом свободного конца производящие обработку материала. Интенсив-

ность такого воздействия определяется целым рядом факторов, но самым значимым из них является энергосиловой [221].

Из всего многообразия наборов стержневых элементов, образующих щетки различных конструкций, выберем три: цилиндрическую, кольцевую и плоскую прямоугольную.

Для подтверждения возможности интенсификации процессов измельчения посредством стержневых элементов были проведены необходимые экспериментальные исследования на моделях. Установлено, что для единичных актов измельчения параллельно уложенными цилиндрическими стержнями наблюдается значительное увеличение выхода мелких классов, т. е. происходит более эффективное разрушение, чем при раздавливании материала между плоскими параллельными поверхностями [218]. В предлагаемых вариантах измельчения за основу принят вариант, когда стержни воздействуют на материал своими торцевыми поверхностями, что связано с необходимостью многократного увеличения контактных напряжений в материале.

Для экспериментального подтверждения преимуществ стержневого способа измельчения выполнены поисковые испытания помола материала за счёт раздавливающего воздействия плоской поверхностью и набором параллельно установленных стержней, совершающих осевое сжатие. Разрушению подвергались различные материалы исходной крупностью от 0,5 до 5 мм, укладываемые в форму в один слой для исключения влияния дополнительных факторов на процесс разрушения (рисунок 7.1).



а — разрушение плоскими поверхностями; б — разрушение стержневыми элементами

Рисунок 7.1 — Варианты элементарных актов разрушения

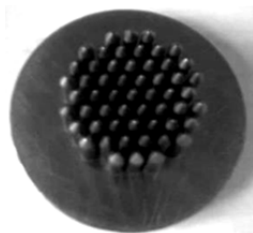


Рисунок 7.2 — Оснастка для проведения технологических испытаний

В конструкции приведенных модельных устройств позициями обозначены: 1 — пуансон, 2 — планшайба, 3 — оправка, 4 — основание, 5 — частицы измельчаемого материала, 6 — стержневые элементы. Оснастка для проведения технологических испытаний изображена на рисунке 7.2.

Эффективность нового механизма измельчения покажем на примере разрушения частиц кварцевого песка. Для его измельчения использовали оснастку с диаметром поверхности рабочей зоны 30 мм и плотности оснащения стержневыми элементами рабочей поверхности около 66 %. Испытания проводились на гидравлическом прессе МС-500 при усилии сжатия 100 кН. На рабочую поверхность ровным слоем насыпали кварцевый песок фракций 0,14...0,63 мм, 0,63...1,25 мм и 1,25...2,5 мм в один слой толщины на максимальной крупности частиц.

Количество актов разрушения для каждого случая выбиралось из необходимости получения суммарной пробы 100 г для гранулометрического анализа. Полученные результаты представлены в таблице 7.1. Результаты в скобках относятся к разрушению частиц между плоскими поверхностями.

Т а б л и ц а 7.1 — Результаты измельчения песка при различных способах нагружения

Крупность частиц измельченного материала, %	Крупность частиц исходного материала		
	0,14...0,63	0,63...1,25	1,25...2,5
Менее 0,08	24,5 (16,2)	20,8 (14,1)	16,3 (10,4)
0,08...0,14	33,8 (30,5)	27,4 (30,1)	21,8 (27,7)
0,14...0,315	22,5 (25,0)	24,0 (27,2)	24,5 (30,1)
0,315...0,63	19,2 (28,3)	21,8 (20,9)	27,4 (22,6)
0,63...1,25	—	4,5 (5,3)	5,2 (6,2)
1,25...2,5	—	1,5 (2,4)	1,8 (3,0)

Анализ полученных результатов убедительно показывает, что эффект разрушения частиц кварцевого песка лучше торцами стержней, чем плоскими поверхностями. Особенно это заметно для мелких фракций, где их выход возрастает в 1,5 и более раза. Это можно объяснить повышенными контактными напряжениями, которые создаются на торцах стержневых элементов. Отсюда можно сделать главный вывод, что технологическая эффективность стержневого (игольчатого) способа измельчения значительно выше традиционного, осуществляемого между рабочими органами с повышенной поверхностью воздействия на измельчаемый материал.

Исходя из проведенных исследований, можно также предположить, что измельчение материала консольными концами стержневых или игольчатых элементов, собранных в пакеты, щетки или жгуты, будет эффективно и при других видах воздействия на материал, в том числе при истирании, свободном и стесненном ударах, сдвиге и виброударном нагружении. По нашему мнению, эти механизмы будут наиболее эффективны для переработки материалов органического происхождения.

## **7.2 Разработка технологических аппаратов с иглофрезерными рабочими органами**

Ближайшими конструктивными аналогами, которые могут служить основой для проектирования стержневых аппаратов, являются широко применяемые в технике щетки, скребки, гребни, иглофрезы и другие инструменты. Их технологические функции состоят, прежде всего, в реализации сдвиговых воздействий на обрабатываемые поверхности для их очистки, снятия поверхностных слоев материала или финишной обработки.

По имеющейся информации [108; 144] использование наборов стержневых элементов для создания измельчительных машин промышленного назначения неизвестно.

Из всего многообразия известных в технике наборов стержневых элементов, образующих иглофрезы различных конструкций, можно выделить наиболее распространенные (рисунок 7.3): дисковые, цилиндрические, плоские, пальцевые и др.

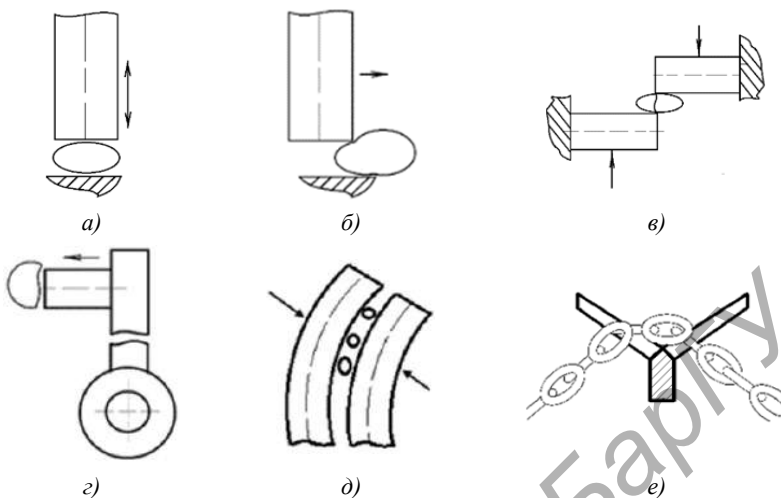


Рисунок 7.3 — Разновидности иглофрезерных элементов

Для подтверждения возможности интенсификации процессов измельчения посредством стержневых элементов были проведены необходимые экспериментальные исследования на моделях. Установлено, что для единичных актов измельчения при использовании набора параллельных стержней наблюдается значительное увеличение выхода мелких классов, т. е. происходит более эффективное разрушение, чем при раздавливании материала между плоскими параллельными поверхностями. В предлагаемых вариантах измельчения за основу приняты решения, когда стержни воздействуют на материал своими торцевыми поверхностями, что связано с необходимостью многократного увеличения контактных напряжений в материале [147].

Проектирование стержневых аппаратов требует учета особенностей поведения рабочих элементов в зависимости от свойств перерабатываемых материалов и решения конкретных технологических задач. Используя подход аналогии, учитывающий предшествующий опыт создания и эксплуатации помольного оборудования, представим базовые варианты актов стержневого измельчения (рисунок 7.4).

Представленные варианты разрушения необходимо правильно сочетать с конкретной конструкцией иглофрезы, условиями переработки материала, видом приводного механизма и другими исходными условиями их работы.



*a* — ударно-раздавляющее разрушение; *б* — истирание; *в* — срез; *г* — свободный удар; *д* — сжатие по образующим стержней; *е* — ударно-режущее воздействие с установкой иглофрез на гибком цепном подвесе

Рисунок 7.4 — Базовые варианты разрушения частиц материала иглофрезами

С учетом вышеуказанного представим варианты схем единичных актов иглофрезерного измельчения (рисунок 7.5).

Для удобства использования и расширения охвата конструктивного исполнения механизмы стержневого измельчения по видам воздействия разделены на пять групп: торцевые импульсные, срезывающе-сдвиговые, истирающие, по торцевым поверхностям высокоскоростные удары и истирающие по образующим стержней. Механизмы стержневого измельчения определяются их конструктивным исполнением. Рассмотрим более подробно каждый из них.

**Схема 1.** Параллельные между собой стержни своими торцами периодически совершают воздействия на частицы материала, находящегося на опорной поверхности. Конструктивно этот вариант представляет собой плоскую иглофрезу, связанную с приводом возвратно-поступательного перемещения. Обладает простотой исполнения, но характеризуется высокими динамическими нагрузками. При этом достигается очень высокий уровень энергонапряженности рабочего процесса, что позволяет производить обработку продуктов без их ограничения по прочности и абразивности.

Торцевое импульсное воздействие

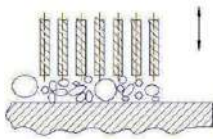


Схема 1



Схема 2

Срезывающе-сдвиговое нагружение

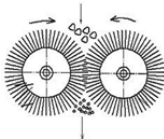


Схема 3

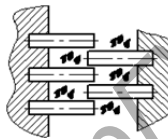


Схема 4

Торцевое истирание



Схема 5

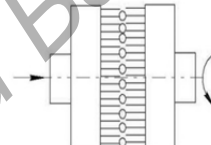


Схема 6

Высокоскоростное торцевое ударное воздействие



Схема 7

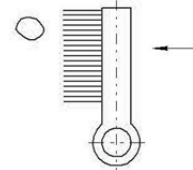


Схема 8

Истирание по образующим стержней

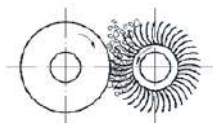


Схема 9

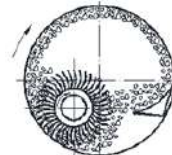


Схема 10

Рисунок 7.5 — Варианты схем единичных актов иглофрезерного измельчения

**Схема 2.** Схожий со схемой 1 механизм разрушения. Отличается в части исполнения набора стержневых элементов, выполняемого в форме цилиндрической иглофрезы, что изменяет картину разрушения материала, так как при этом чистое сжатие заменяется преимущественно сжатием со сдвигом. В целом параметры единичных актов разрушения мало отличаются от схемы 1.

**Схема 3.** Стержни двух параллельных между собой цилиндрических иглофрез, в зонах, их образующих, входят друг в друга и за счет синхронного вращения производят комплексное воздействие на частицы материала способом среза, истирания, раздавливания, ударов. Реализация этого механизма разрушения отличается простотой, возможностью работы по сухому или мокрому способу и высокой удельной энергонапряженностью.

**Схема 4.** Консольные части стержневых элементов плоских и параллельных между собой иглофрез совершают возвратно-поступательные перемещения друг относительно друга с преобладающим срезывающе-сдвиговым нагружением. Возможно применение при обработке органического сырья и малоабразивных минералов.

**Схема 5.** Стержневые элементы цилиндрической иглофрезы при ее вращении захватывают куски исходного материала и протягивают его между своими торцами и неподвижным корпусом, где и производится интенсивное разрушение истирающим воздействием. В определенном смысле это аналог процесса иглофрезерования.

**Схема 6.** Разрушение материала осуществляется между двумя дисками, оснащенными стержнями, торцы которых обращены навстречу друг другу. По меньшей мере один из дисков является подвижным. Центробежными силами сырьевой материал отбрасывается к периферии и, проходя между торцами движущихся навстречу друг другу стержней, интенсивно измельчается. Применение такого способа диспергирования особенно эффективно для органических продуктов, малоабразивных суспензий, эмульсий и приготовления однородных композиций.

**Схема 7.** Высокоскоростной свободный удар производится стержнями цилиндрической иглофрезы. В процессе ее взаимодействия с частицами обрабатываемого материала происходят множественные сколы и срезы микрообъемов с более крупных кусков или агрегатов. Реализация этой схемы представляется перспективной для переработки органических продуктов, домола малоабразивных минералов и приготовления различных смесевых составов.

**Схема 8.** Рабочий орган такого типа можно использовать в молотковых дробилках для осуществления тонкого дробления или грубого помола минерального сырья по сухому способу. Наличие множества стержневых элементов в составе предлагаемого била позволяет увеличить число зон разрушения и существенно интенсифицировать рабочий процесс.

**Схема 9.** Изогнутые стержни упираются своими концами в опорную поверхность второго элемента, например вала, деформируются и при этом разрушают попадающий между ними зернистый материал путем раздавливания частиц между своими боковыми поверхностями.

**Схема 10.** Отличается от схемы 9 тем, что опорная поверхность выполнена в виде охватывающего иглофрез барабана. Это улучшает условия захвата частиц материала и позволяет производить их многократную обработку, соответственно, осуществлять тонкий помол.

В качестве материала для изготовления стержневых элементов иглофрез рекомендуется использовать стальную проволоку круглого сечения по ГОСТ 2333-80 диаметром от 0,1 до 10,0 мм. Для этих целей подходит проволока стальная углеродистая пружинная по ГОСТ 9389-75. Для создания крупных помольных машин в качестве стержневых элементов для рабочих органов типа иглофрез вполне применимы отрезки канатов, которые в полной мере отвечают изложенным ранее требованиям.

В первом приближении с достаточной степенью точности рациональную область технологического использования измельчителей с иглофрезерными рабочими органами можно оценить на основе анализа основных видов разрушения материала стержневыми элементами.

По нашему мнению, конструкции, соответствующие вариантам разрушения *a*, *д* (см. рисунок 7.4), могут быть использованы для измельчения твердых и абразивных материалов преимущественно минерального происхождения. С их помощью также целесообразно перерабатывать многие техногенные продукты (золы, шлаки, композиты), производить селективное измельчение, диспергировать сыпучие и жидкотекучие композиции, осуществлять механоактивацию многих природных и техногенных материалов.

Реализация измельчения путем истирания (см. рисунок 7.4, *б*) позволяет эффективно перерабатывать материалы средней и малой прочности как природного, так и техногенного происхождения. Наличие множества режущих кромок создает необходимые усло-

вия образования большого количества преимущественно линейных дефектов на поверхности частиц трудноизмельчаемых материалов и ведет к последовательному их разрушению.

Измельчение способом среза (см. рисунок 7.4, в) по большинству признаков аналогично предшествующей конструкции, но отличается более высокой интенсивностью процесса, что объясняется наличием рельефной второй опорной поверхности, а также возможным взаимным перемещением двух иглофрезерных частей конструкции, что позволяет эффективно измельчать волокнистые и неоднородные материалы: древесину, пластмассу, резиновую крошку, текстиль, макулатуру и др.

Свободный удар (см. рисунок 7.4, г) может найти применение в тех случаях, когда необходимо измельчать минеральные и органические материалы, совмещать между собой процессы помола и сушки, помола и смешивания, селективного измельчения, механоактивации. Таким способом можно получить более дисперсный продукт, так как развитая рельефная рабочая поверхность способствует концентрации локальных напряжений в частицах материала в момент их удара по стержням, торцы которых изменяют характер движения частиц по рабочей поверхности и исключают их вынос аэродинамическим потоком из рабочей зоны.

Для выбора эффективных вариантов технологического применения механизмов единичных актов иглофрезерного измельчения и снижения объемов поисковых исследований нами проведен отбор наиболее перспективных схем реализации процессов. Использован метод феноменологического анализа и аналогий. Исходными условиями при этом были приняты интенсивность процесса измельчения, простота изготовления нового оборудования, его высокая износостойкость, возможность создания аппаратов большого габаритного ряда и функциональных применений.

Руководствуясь перечисленными требованиями, в качестве базовых вариантов единичных актов иглофрезерного измельчения выбраны схемы 1, 3, 4, 7, 9 (см. рисунок 7.5), которые относятся к различным видам воздействия на перерабатываемые материалы. Каждый из них обладает индивидуальными возможностями, которые предполагают их использование для переработки соответствующих материалов.

На основе единичных актов стержневого измельчения разработан ряд конструкций измельчителей с иглофрезерными рабочими органами. Схемы некоторых из них представлены на рисунке 7.6.

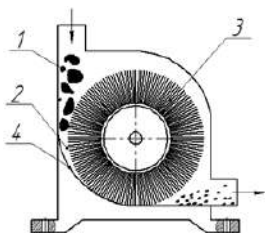


Схема 1

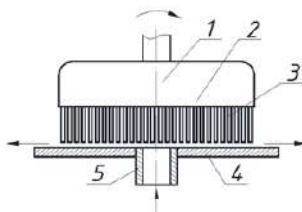


Схема 2

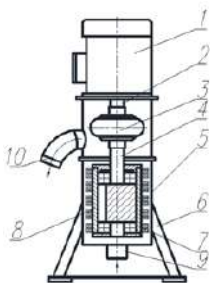


Схема 3

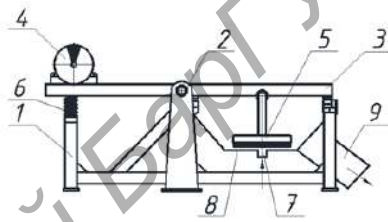


Схема 4

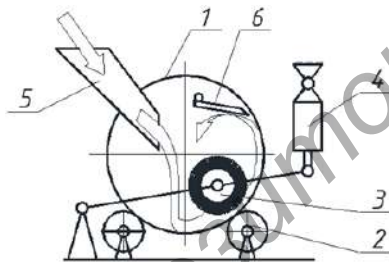


Схема 5

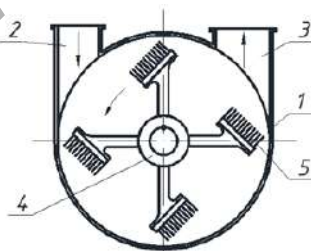


Схема 6

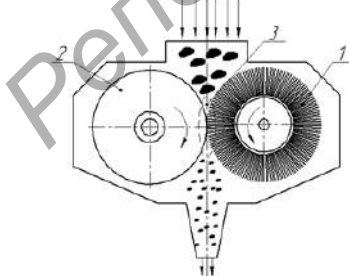


Схема 7

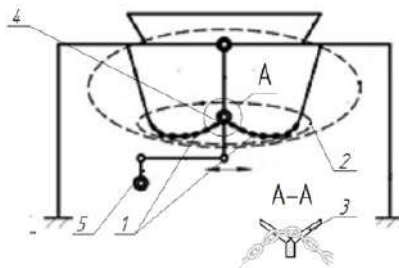


Схема 8

Рисунок 7.6 — Варианты конструкций измельчителей с иглофрезерными рабочими органами

**Схема 1.** Истиратель. Рабочий процесс в нем осуществляется за счет подачи частиц исходного продукта 1 в зазор 2 между игольчатым ротором 3 и охватывающим его корпусом 4. При этом механизм разрушения — чистое истирание, что предполагает его использование для обработки малоабразивных и небольших по крупности частиц материала, например, резины, целлюлозы, пластика и т. д.

**Схема 2.** Измельчитель истирающего действия с торцевыми стержневыми элементами. Устройство включает в себя приводной вал 1, планшайбу 2 с игольчатыми элементами 3, опорную плиту 4 и патрубок 5 для подачи исходного материала. Измельчитель может работать по сухому или мокрому способу. При этом сырьевой материал через патрубок 5 поступает в рабочую зону между торцами элементов 4 и опорной плитой. Материал измельчается способом сдвига, среза или истирания. Рабочий процесс может производиться как с зазором, так и с контактом между собой торцов элементов 3 и плиты 4. Обрабатываемый продукт под действием центробежных сил движется от центра рабочего органа к его периферии.

**Схема 3.** Вибрационная мельница. Содержит приводной электродвигатель 1, вал 2 которого через эластичную муфту 3 связан с валом 4 дебалансного вибратора 5. Внешняя поверхность последнего снабжена секциями 6 иглофрезерных элементов, которые с зазором расположены в рабочей камере 7, установленной на раме 8. Рама снабжена патрубками для загрузки 9 и выгрузки 10 материала. Мельница предназначена для мокрого измельчения способом торцевых соударений стержневых элементов секций 6 и стенкой рабочей камеры 7, создаваемых дебалансным вибратором 5.

**Схема 4.** Мельница виброударного действия. Установка работает по принципу высокочастотных центральных ударов. Для этого на раме 1 с помощью оси 2 смонтировано коромысло 3, на одной консоли которого закреплен вибратор 4, а на другой — игольчатый рабочий орган 5. Для управления работой ударного механизма предусмотрена возвратная пружина 6. Разрушение материала происходит торцами стержней рабочего органа 6 на опорной плите 7. Исходный материал подается в рабочие зоны через патрубок 8, а для выгрузки измельченного продукта, обрабатываемого по мокрому способу, служит лоток 9.

**Схема 5.** Барабанно-валковая мельница. Основу мельницы составляет вращающийся горизонтальный барабан 1, опирающийся

на ролики 2, внутри которого смонтирован цилиндрический игольчатый рабочий валок 3. Для создания необходимых условий измельчения валок 3 с помощью прижимного устройства 4 торцами своих стержней сжимает частицы материала, движущиеся на внутренней поверхности барабана 1 и разрушает их. Загрузка сырьевого материала осуществляется посредством патрубка 5, а для устранения его налипания на стенки барабана служит скребок 6.

**Схема 6.** Дробилка ударного действия. В рабочей камере 1, содержащей патрубки 2, 3 для загрузки и выгрузки материала, вращается ротор 4 с рабочими органами 5, выполненными в виде прямоугольных щеток. Измельчение в дробилке осуществляется по методу свободного удара свободными концами стержневых элементов, что позволяет кардинально изменить механизмы единичных актов воздействия на частицы материала и интенсифицировать процесс их разрушения.

**Схема 7.** Валковый измельчитель. Конструкция состоит из двух встречно вращающихся валков, один из которых выполнен из набора цилиндрических щеток 1, торцы проволок которых упираются в поверхность гладкого валка 2, в контактных зонах 3 происходит процесс измельчения. Конструкция обеспечивает достаточно эффективный домол различных продуктов, в том числе цементных, извести, мела, а также механоактивацию как отдельных компонентов, так и их композиции.

**Схема 8.** Цепной агрегат с иглофрезерными рабочими элементами. Основу конструкции составляют полотна цепных завес 1, которые образуют двухлотковую рабочую камеру 2 и оснащены активизаторами процесса в виде зубьев-стержней 3. Подвешенные на подвижной штанге 4 цепные завесы под действием кривошипно-шатунного привода 5 совершают колебательные перемещения с большими амплитудами, что обеспечивает высокую интенсивность процесса измельчения.

Конструктивно-технологическое использование измельчителей с иглофрезерными рабочими органами, характеризующимися развитой поверхностью воздействия на измельчаемые материалы, открывает дополнительные возможности в создании новых конструкций агрегатов для комплексной переработки техногенных материалов анизотропной структуры.

Для подтверждения возможности интенсификации процессов измельчения посредством стержневых элементов целесообразно провести необходимые экспериментальные и теоретические исследования.

За основу их выполнения приняты варианты, когда стержни воздействуют на расположенный на жестком основании материал своими торцевыми поверхностями путем истирания, среза и удара, что связано с необходимостью многократного увеличения контактных напряжений и интенсификации процесса измельчения.

Обоснование выбора технологических агрегатов, в которых можно использовать модули для измельчения на основе иглофрезерных рабочих органов, будет выполнено путем анализа концептуальных принципов развития и проектирования роторно-центробежных агрегатов комбинированного воздействия на материал.

### **7.3 Исследование деформаций и напряжений стержня, который движется в поле центробежных сил**

Необходимость исследования напряжённо-деформированного состояния стержня возникла в связи с разработкой перспективных измельчительных машин, основным рабочим органом которых является ротор с закрепленными на его внешней поверхности радиальными прутковыми элементами в виде щётки. Каждый такой элемент рассматривается как стержень, который находится под воздействием центробежных сил (сил инерции) и сил тяжести. На первом этапе исследований не учитываем дополнительные силы взаимодействия с измельчаемым материалом, которые возникают в рабочей зоне измельчительной машины. Конструкция измельчительных машин описанного типа, некоторые параметры и расчеты их рабочих органов опубликованы в ряде публикаций [161; 171; 186].

На рисунке 7.7 прутковый элемент  $AB$  закреплен на поверхности диска радиуса  $r_0$ , который вращается с постоянной угловой скоростью  $\omega$  вокруг оси  $O$ . Далее прутковый элемент будем рассматривать как стержень, который при постоянной  $\omega = \text{const}$ , не в пределах рабочей зоны измельчительной машины работает на растяжение и изгиб. Длину стержня, его диаметр и массу обозначаем соответствующими буквами  $l$ ,  $d$  и  $m_{\text{ст}}$ . Погонная масса  $m$  определяется по формуле  $m = m_{\text{ст}} / l$ . Рассмотрим элементарный

участок стержня длиной  $d\zeta$  на расстоянии  $\zeta$  от заделки  $A$ . Его масса равна  $md\zeta$ , а ускорение  $a = \rho\omega^2$ , где  $\rho = r_0 + \zeta$ ; тогда  $a = (r_0 + \zeta)\omega^2$ . Сила инерции участка  $d\zeta$   $q_i = mad\zeta$ , или по формуле

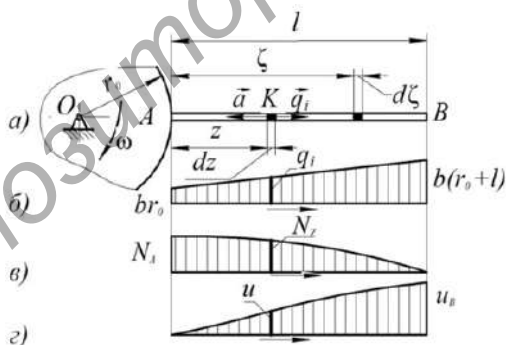
$$q_i = (br_0 + b\zeta)d\zeta, \quad (7.1)$$

где  $b = m\omega^2$ .

Равнодействующая сила инерции стержня

$$Q_i = b \int_0^l (r_0 + \zeta) d\zeta = b(r_0\zeta + \zeta^2 / 2) \Big|_0^l = b(r_0l + l^2 / 2) = \\ = b(r_0 + l / 2) = (r_0 + l / 2)m_{\text{ст}}\omega^2.$$

Определим нормальную силу  $N_z$  в произвольном сечении  $K$ , заданной координатой  $z$ . Она равна сумме всех сил  $q_i$ , что действуют слева от сечения  $K$ , это значит на участок  $KB$  согласно выражению (7.1):  $N_i = \int_z^l q_i = \int_z^l (br_0 + b\zeta) d\zeta = b \int_z^l (r_0 + \zeta) d\zeta = b(r_0\zeta + \zeta^2 / 2) \Big|_z^l$ .



$a$  — прутковый элемент  $AB$  под действием центробежной силы  $q_i$ ;  $b$  — эпюра центробежной силы;  $c$  — эпюра нормальных сил;  $d$  — эпюра перемещений

Рисунок 7.7 — Расчетная схема роторно-измельчительной машины

Окончательно

$$N_z = b \left[ r_0(l-z) + (l^2 - z^2) / 2 \right]. \quad (7.2)$$

Максимальная нормальная сила возникает в месте заделки. В заделке  $A$  при  $z = 0$

$$N_{\max} = N_A = (r_0 + l/2)m_{\text{ст}}\omega^2. \quad (7.3)$$

Как видим,  $N_{\max} = Q_i$ . Сила тяжести  $P$  равномерно распределена по его длине  $l$ . Тем самым производит распределенную (погонную) нагрузку постоянной интенсивности  $p = P/l$ . Её направление относительно стержня изменяется при его повороте. На рисунке 7.8 стержень  $AB$  повернут относительно горизонтали на угол  $\varphi$ . Рассмотрим элемент стержня одинаковой длины, что расположен на расстоянии  $z$  от заделки  $A$ . При этом его масса  $m = m_{\text{ст}}/l$ , а сила тяжести  $p = mg$  ( $g$  — ускорение свободного падения). Разложим вектор  $p$  на компоненты  $p'$  и  $p''$  поперек и вдоль оси стержня (рисунок 7.8):  $p' = p \cos \varphi$ ,  $p'' = p \sin \varphi$ . Равнодействующая нагрузка  $p''$ , которая приложена к участку  $KB$ , получая нормальную силу  $N_K$  в сечении с координатой  $z = AK$ :  $N_K = (l-z)p''$  или

$$N_K = (l-z)mg \sin \varphi. \quad (7.4)$$

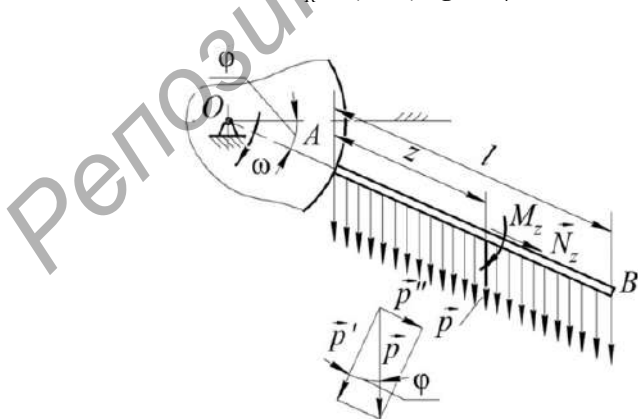


Рисунок 7.8 — Прутковый элемент  $AB$  под действием силы тяжести

Равнодействующая нагрузка  $p'$  на участке  $KB$  равна  $(l-z)p'$ . Её произведение на плечо  $KB/2$  создаст изгибающий момент в сечении  $K$ :  $M_Z = (l-z)^2 p' / 2$ . Наибольшее значение момента  $M_Z$  достигается в сечении  $z = 0$ :

$$M_{\max} = M_A = l^2 p \cos \varphi / 2. \quad (7.5)$$

Переходим к определению перемещений и сечений стержня. Информация об их величине необходима для регулирования зазора между ротором со стержневыми элементами и подвижной (для настройки) щеклой, по цилиндрической поверхности которой скользят измельчаемые фракции. Анализируя рисунок 7.9, можно заметить, что перемещение произвольного сечения  $K$  стержня  $AB$  равно удлинению его участка  $AK$ . Последнее определим при постановке в закон Гука. Для этого на участке  $AK$  на расстоянии  $\zeta$  от заделки  $A$  выделим элемент  $d\zeta$ . Его удлинение под действием нормальной силы  $N_\zeta$  равно:  $\Delta(d\zeta) = N_\zeta d\zeta / EF$ , где  $E$  — модуль упругости при растяжении-сжатии, МПа;  $EF$  — жесткость стержня при растяжении-сжатии.

Силу  $N_\zeta$  принимаем исходя из формулы (7.2) при  $z = \zeta$ . Удлинение всего участка  $AK = z$  равно:

$$u = \int_0^z N_\zeta d\zeta / EF = (bEF) \int_0^z \left[ (r_0 + l/2) - r\zeta - \zeta^2 / 2 \right] d\zeta = (bEF) \times \\ \times \left[ (r_0 + l/2)l\zeta - r_0\zeta^2 - \zeta^3 / 6 \right] \Big|_0^z.$$

Окончательно

$$u = \left[ (r_0 + l/2)lz - r_0z^2 - z^3 / 6 \right] m_{\text{ст}} \omega^2 / EF. \quad (7.6)$$

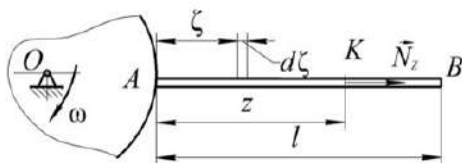


Рисунок 7.9 — Схема для вычисления перемещений сечений стержня

Удлинение стержня, равное перемещению  $u_B$  его конца  $B$ , определим по формуле (7.6) при  $z = l$ :

$$u_B = (3r_0 + 2l)lm_{\text{ст}}\omega^2 / 6EF. \quad (7.7)$$

Как видим, удлинение стержня  $u_B$  пропорционально его массе, квадрату длины  $l$  и угловой скорости  $\omega$ . Перемещения сечений стержня под действием сил тяжести определяются аналогично. Нормальная сила принимается исходя из формулы (7.4). Полученный результат с учётом знаков суммируется с предыдущим.

Далее рассмотрим методику определения механических напряжений. В произвольном сечении  $z$  стержня (см. рисунок 7.9) нормальное напряжение высчитывается по формуле  $\sigma_z = N_z / F$ , где  $N_z$  принимается по формуле (7.2);  $F = \pi d^2 / 4$  — площадь поперечного сечения. Самым напряжённым сечением стержня является его заделка  $A$ . Напряжение в сечении  $A$

$$\sigma_A = 4(r_0 + l/2)m_{\text{ст}}\omega^2 / \pi d^2. \quad (7.8)$$

В данном случае взята в расчет сила инерции  $Q_i = N_A$  (7.3). Вторая составляющая напряжения  $\sigma_A$  определяется при подстановке в формулу (7.4) при  $z = 0$ . Третья составляющая  $\sigma_A''$  возникает под действием изгибающего момента (7.5). Она переменная по высоте сечения стержня. Наибольшее значение  $\sigma_A''$  определяется по формуле  $\sigma_A'' = M_A / W$ , где  $W = \pi d^3 / 32$  — момент сопротивления. Заметим, что переменные во времени напряжения  $\sigma_A'$ ,  $\sigma_A''$  вызваны силами тяжести, соотносятся по величине с напряжением  $\sigma_A$ , как сила тяжести  $P = m_{\text{ст}}g$  стержня с его силой инерции  $Q_i = m_{\text{ст}}a_c$  или как ускорения  $g$  и  $a_c = r_c\omega^2$ . Анализ ускорений показывает, что  $g \ll a_c$ . Это позволяет, учитывая реальные значения  $\omega$ , игнорировать напряжения  $\sigma_A'$ ,  $\sigma_A''$  при исследовании напряжённо-деформационного состояния элемента  $AB$ . Однако небольшие по значениям  $\sigma_A'$ ,  $\sigma_A''$  могут быть опасными для прочности стержней, так как в отличие от статических напряжений  $\sigma_A$  являются циклическими (динамическими) — изменяются по значению и знаку в соответствии с гармоничными законами. При этом количество циклов в минуту равно частоте вращения ротора. А циклические нагрузки, как из-

вестно из курса сопротивления материалов [253], вызывают усталость и разрушение материала.

Таким образом, предложена методика исследования напряжённо-деформационного состояния пруткового рабочего элемента измельчительной машины. Показано, что с учетом сил тяжести напряжения и деформации носят циклический характер с асимметрическими циклами и малыми амплитудами колебания. При увеличении частоты вращения ротора влияние сил тяжести уменьшается [90].

#### 7.4 Методика определения силы динамического взаимодействия пруткового стержня с материальной точкой

На рисунке 7.10 схематически показан фрагмент ротора с закреплённым на его поверхности элементом  $AB$  щётки. Ротор вращается с угловой скоростью  $\omega$  вокруг оси  $O$ . Элемент  $AB$ , двигаясь на большой скорости, наносит удар по неподвижной частице  $D$ , что находится на поверхности, и разрушает её (или истирает в порошок). Цилиндрическая поверхность  $S$  так же может быть сконструирована в виде щётки с короткими прутками. В представленной расчетной схеме прутковый элемент моделируется упругим стержнем (консолью), жестко закрепленным концом  $A$  на диске, а частичка  $D$  рассматривается как материальная точка. Для простоты изучения взаимодействия консоли  $AB$  с телом  $D$  используем известный с теории механизмов и машин метод обратного хода (или метод остановки). Для этого мы даем всей механической системе вместе с поверхностью  $S$  мнимое обратное вращение с угловой скоростью  $(-\omega)$ .

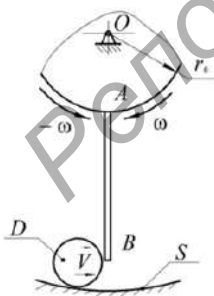


Рисунок 7.10 — Фрагмент ротора с ударным прутковым элементом  $AB$

Тогда ротор с элементом  $AB$  «останавливается», частичка  $D$  будет двигаться со скоростью  $V$ , равной начальной скорости конца  $B$  консоли:  $V = V_B = (r_0 + l)\omega$ , где  $l$  — длина консоли. Для выведения формул используем источники [253; 258].

Исследуем упругие свойства консольного стержня под действием сосредоточенной силы  $P$  на его конце. Повернем стержень в горизонтальное положение, как показано на рисунке 7.11.

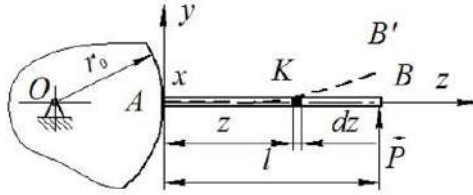


Рисунок 7.11 — Упругий стержень (консоль) под действием силы  $P$

Начало координат совмещаем с пунктом  $A$ . Ось  $Ax$  перпендикулярна к плоскости рисунка. Деформации изгиба консоли считаем незначительными. Тогда уравнение ее изогнутой оси записывается в виде

$$y'' = M / EJ_x. \quad (7.9)$$

Штрих над буквой  $y$  обозначает вторую производную в координате  $z$ ;  $M = P(l - z)$  — момент силы  $P$  относительно произвольной точки  $K$ ;  $J_x$  — осевой момент инерции сечения стержня;  $EJ_x$  — жесткость стержня при изгибе. Перепишем уравнение (7.9) в виде  $y'' = c_0(l - z)$  или  $d(y') = c_0(l - z)$ .

Следовательно,  $d(y') = c_0(l - z)dz$  и  $y' = c_0 \int (l - z)dz = c_0(lz - z^2 / 2 + C_1)$ , где  $c_0 = P / EJ_x$ . Аналогично определяем  $y = c_0(lz^2 / 2 - z^3 / 6 + C_1z + C_2z)$ . Далее учитываем начальные условия в заделке  $A$ : при  $z = 0$ ,  $y = 0$ ,  $y' = 0$ . Подставляя их в записанные выше равенства, находим:  $C_1 = C_2 = 0$ . Получим уравнение согнутой оси (на рисунке 7.11 она показана пунктиром):

$$y = c_0(lz^2 / 2 - z^3 / 6). \quad (7.10)$$

Наибольшее перемещение получается на конце стержня  $B$  при  $z = l$ :  $y_{\max} = P l^3 / 3EJ_x$ . Отсюда при значении  $y_{\max} = 1$  определяем жесткость консоли, нагруженной сосредоточенной силой на конце  $B$ :  $c = P' = 3EJ_x / l^3$ .

Представим, что сила возникла во время удара по концу консоли телом  $D$  массы  $m_D$ , которое в момент удара имела скорость

$V = V_B$ . Допустим, что упругая линия консоли, поворачиваясь под воздействием тела  $D$ , сохраняет значения формулы (7.9). Определим, с какой скоростью движется произвольная точка  $K$  консоли. Учитывая, что скорость её пунктов пропорциональна их перемещениям  $y$ , получаем:  $V_K / y_K = V_B / y_B$ ; отсюда  $V_K = (V_B / y_B) y_K$ , где  $y_B = y_{\max}$ ;  $y_K$  определяем по формуле (7.10) при  $z = z_K$ . Тогда

$$V_K = \left(3V_B / l^3\right) \left(lz_K^2 / 2 - z_K^3 / 6\right). \quad (7.11)$$

Определим кинетическую энергию  $dT$  элемента  $dz$  консоли, которая соответствует скорости  $V_K$ . Обозначим комбинацию  $(3V/l^3)$  через  $c_1$ , а массу стержня через  $m_{\text{ст}}$ ; его рабочая масса  $m$  определяется по формуле  $m = m_{\text{ст}} / l$ . Масса  $m_z$  элемента  $dz$  равна:  $m_z = mdz$ . Получили:  $dT = m_z V_K^2 / 2$ . Кинетическая энергия всей консоли с учетом выражения (7.11) равна:

$$\begin{aligned} T &= \int_0^l dT = (m_{\text{ст}} c_1^2 / 2l) \int_0^l (lz_K^2 / 2 - z_K^3 / 6) dz_K = c_2 \int_0^l (l^2 z_K^4 / 4 - z_K^5 / 6 + \\ &+ z_K^6 / 36) dz_K = c_2 (l^2 z_K^5 / 20 - lz_K^6 / 36 + z_K^7 / 252) \Big|_0^l = \\ &= c_2 (l^7 / 20 - l^7 / 36 + l^7 / 252), \end{aligned}$$

где  $c_2 = m_{\text{ст}} c_1^2 / 2l = 9m_{\text{ст}} V_B^2 / 2l^7$ .

Окончательно определяем:  $T = 0,236(m_{\text{ст}} V_B^2 / 2)$  или сокращенно:

$$T = kT_B \quad (7.12)$$

где  $T$  — кинетическая энергия консоли с массой  $m = m_{\text{ст}} / l$ , равномерно распределенной по ее длине;

$k$  — коэффициент приведения распределенной массы  $m$  к концу  $B$ ,  $k = 0,236$ ;

$T_B$  — кинетическая энергия невесомого стержня, масса которого сосредоточена на его конце  $B$ .

В дальнейших расчетах мы будем использовать приведенную массу стержня  $m_B = km_{\text{ст}}$  и упрощенную модель взаимодействия

материальной точки  $D$  со стержнем. В ней стержень заменен материальной точкой  $B$  массой  $m_B$  на пружине жесткости  $c$  (рисунок 7.12). Пружина имитирует невесомый стержень. Считаем, что материальная точка  $D$ , движущаяся со скоростью  $V = V_B$ , достигает точки  $B$  и затем начинает двигаться вместе с ней с новой начальной скоростью  $V_0$ . Для определения скорости используем теорему об изменении величины движения механической системы:  $Q_{1y} - Q_{0y} = \sum S_{iy}^e + \sum S_{iy}^i$ , где  $Q_{0y} = m_D V_B$ ,  $Q_{1y} = (m_D + m_B) V_0$  — проекции на ось в величинах движения системы по точкам столкновения и после нее;  $\sum S_{iy}^e, \sum S_{iy}^i$  — проекции на ось в сумме импульсов внешних и внутренних сил.

При условии  $\sum S_{iy}^e = \sum S_{iy}^i = 0$  имеет место закон сохранения количества движения системы:  $Q_{1y} = Q_{0y}$  или  $(m_D + m_B) V_0 = m_D V_B$ , отсюда

$$V_0 = [m_D / (m_D + m_B)] V_B. \quad (7.13)$$

Переходим к расчету силы взаимодействия системы тел  $D$  и  $B$  с пружиной, т. е. с консолью. Применим теорему об изменении кинетической энергии:

$$T_1 - T_0 = \sum A_i, \quad (7.14)$$

где  $T_1, T_0$  — кинетическая энергия в начале и в конце совместного движения системы (когда она остановилась), при этом  $T_0 = T_D + T_B = (m_D + m_B) V_0^2 / 2$ ,  $T_1 = 0$ . При расчете суммы работ  $\sum A_i$  игнорируем силу тяжести, берем в расчет только переменную силу упругости пружины, которая в момент окончания достигает наибольшего значения  $P_{\max}$ .

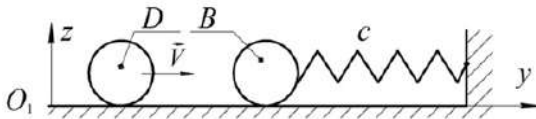


Рисунок 7.12 — Упрощенная модель взаимодействия частицы  $D$  со стержнем  $AB$

Его работа равна  $(-P_{\max}^2 / 2c)$ . Тогда уравнение (7.14) принимает вид  $(m_D + m_B)V_0^2 / 2 = P_{\max}^2 / 2c$ . Отсюда  $P_{\max} = V_0 \sqrt{c(m_D + m_B)}$  или с учетом (7.13)

$$P_{\max} = \gamma_m \sqrt{m_D c V_B}, \quad (7.15)$$

где  $\gamma_m = \sqrt{m_D / (m_D + m_B)}$ . Напомним, что в формуле (7.15)  $P_{\max}$  — это сила взаимодействия системы тел  $B, D$  с пружиной, и нас интересует внутренняя сила, возникающая между телами  $B, D$ . При этом тело  $D$  разрушается. Для определения силы  $P_D^{\max}$  используют метод кинестатики по принципу Даламбера. Выделим в механической системе в момент ее остановки в крайнем правом положении тело  $B$  (рисунок 7.13). На него действуют силы:  $P_D^{\max}$ ,  $P_{\max}$  — давление тела и реакция пружины соответственно;  $Q_{Bi} = m_B a_B$  — сила инерции. Силу тяжести и реакцию плоскости, как уравновешенные, не учитываем. Ускорение  $a_B = P_{\max} / (m_D + m_B)$ .

Записываем условие равновесия тела  $B$ :  $\sum Y_i = P_D^{\max} - P_{\max} + Q_{Bi} = 0$ .

Отсюда  $P_D^{\max} = P_{\max} - Q_{Bi} = [1 - m_B / (m_D + m_B)] P_{\max}$ .

Окончательно с учетом (7.15) получаем:

$$P_D^{\max} = \gamma_m \gamma'_m \sqrt{m_D c V_B}, \quad (7.16)$$

где  $\gamma'_m = 1 - m_B / (m_D + m_B)$ . На рисунке 7.11 сила  $P_D^{\max}$  приложена к телу  $B$  (действует на консоль). Такая же сила со стороны консоли воздействует на частицу  $D$ . Силе  $P_{\max}$  соответствует

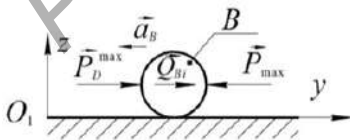


Рисунок 7.13 — Равновесие материальной точки  $B$  по методу кинестатики

перемещение конца  $B$  консоли  $f_{\max}$ . Чтобы ее определить, учтем зависимость  $P_{\max} = c f_{\max}$ . Тогда правая часть равенности (7.14) принимает вид

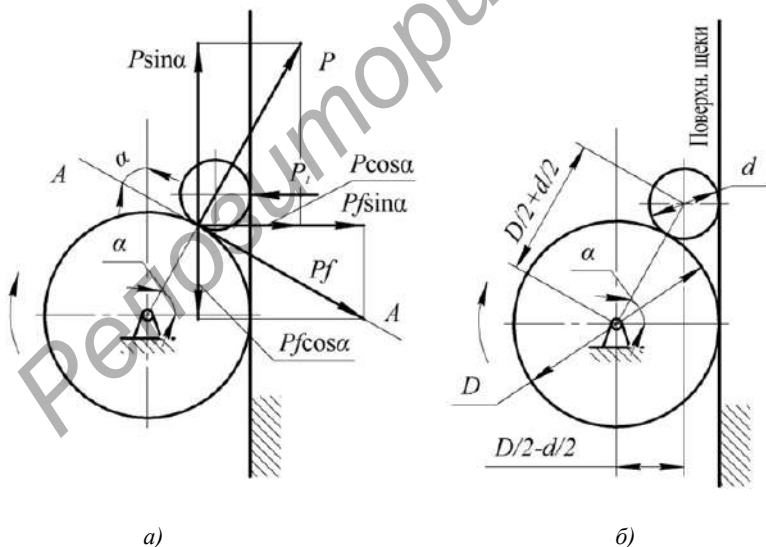
$\sum A_i = -c f_{\max}^2 / 2$ . Повторяя те же

действия, что и при определении  $P_{\max}$ , получаем:  $f_{\max} = \gamma_m \sqrt{m_D / c V_B}$ .

В соответствии с данной методикой можно определять силу, что возникает в момент удара пруткового элемента ротора по измельчаемой частице. Информация о прочности измельчаемых частиц и установленные факторы, что определяют величину силу взаимодействия  $P_D^{\max}$ , позволяют рационально выбирать геометрические, кинематические и инерционные параметры проектируемых роторов измельчительных машин [90].

### 7.5 Расчет основных параметров измельчителей с иглофрезерными рабочими органами

Одним из основных параметров является угол захвата — угол между касательной  $AA$  (рисунок 7.14, *a*) к поверхности цилиндрической щётки в точке касания с куском материала и плоскостью щеки, который для надёжной работы не должен превышать определенной величины.



*a* — определение угла захвата; *б* — определение соотношения между диаметрами рабочего органа и измельчаемого материала

Рисунок 7.14 — Расчетные схемы

Как следует из рассмотрения схемы на рисунке 7.14, *a*, захват щёткой куска материала возможен при условии

$$P \sin \alpha \leq fP_1 + fP \cos \alpha, \quad (7.17)$$

где  $P$  — сила давления прутка на кусок материала, направленная перпендикулярно к касательной;

$f$  — коэффициент трения куска материала о рабочие поверхности;

$P_1$  — сила реакции от действия силы  $P$ , приложенная в точке касания куска материала с поверхностью щёки перпендикулярно к данной поверхности.

Исходя из условия равновесия куска, при проектировании всех действующих на него сил на горизонтальную ось получим:  $P_1 - P \cos \alpha - fP \sin \alpha = 0$  или  $P_1 = P (\cos \alpha - f \sin \alpha)$ .

Подставив в уравнение (7.17) значение  $P_1$ , получим:

$$P \sin \alpha \leq fP (\cos \alpha - f \sin \alpha) + fP \cos \alpha. \quad (7.18)$$

Разделив обе части уравнения (7.18) на  $P \cos \alpha$ , будем иметь:

$$\operatorname{tg} \alpha \leq 2f + f^2 \operatorname{tg} \alpha \quad \text{или} \quad \operatorname{tg} \alpha \leq \frac{2f}{1 - f^2}.$$

Так как  $f = \operatorname{tg} \varphi$ , где  $\varphi$  — угол трения, тогда  $\operatorname{tg} \alpha \leq 2\varphi$ .

Отсюда следует вывод, что у измельчителя данного вида, как и у иных дробильных машин [42], угол захвата не должен превышать двойного угла трения.

Для определения соотношения между диаметрами поступающего куска  $d$  и диаметром щётки воспользуемся схемой, представленной на рисунке 7.14, *б*. Исходя из данного рисунка, получим

$$\text{равенство} \left( \frac{D}{2} + \frac{d}{2} \right) \cos \alpha = \frac{D}{2} - \frac{d}{2}, \quad \text{отсюда} \quad \frac{D}{d} = \frac{1 + \cos \alpha}{1 - \cos \alpha}.$$

При определении соотношения  $D/d$  для валковых дробилок было принято, что при измельчении прочных пород  $\varphi = 16^\circ 40'$ , для влажных глин  $\varphi = 24^\circ 20'$  [42]. Игольчатые измельчители применимы для измельчения непрочных пород (гипс, графит, мел и др.) с коэффициентом трения не менее 0,45. Следовательно, угол трения при данном значении не менее  $\varphi = 24^\circ$ . Воспользовавшись

полученными значениями, получим:  $\frac{D}{d} = 5$ , где  $D = D_{\text{ш}}$  — диаметр однорядной цилиндрической щётки, м;  $d$  — максимальный диаметр поступающего куска материала, м.

Для надежной работы профессор М. Я. Сапожников рекомендует найденные соотношения увеличить на 10...20 %.

Для определения производительности принята схема процесса разгрузки материала из камеры дробления (рисунок 7.15).

В камере дробления над ротором постоянно находится масса измельчаемого материала, которая под действием гравитационных сил с некоторой скоростью опускается на ротор. Последний при каждом проходе прутка, подобно фрезе, срезает стружку объемом  $V = d_{\text{пр}} h A$ , где  $d_{\text{пр}}$  — диаметр прутка, м;  $h$  — толщина стружки, определяемая как усредненное значение уменьшения свободно падающего куска измельчаемого материала от максимально возможного до минимального в период нахождения в рабочей камере, м;  $A$  — длина хорды длины ротора, соприкасающейся с материалом, м.

Отсюда производительность в единицу времени  $Q = d_{\text{пр}} h A n z k \mu$ , где  $n$  — число оборотов ротора в единицу времени, об. / мин;  $z$  — число рядов однорядных цилиндрических щёток;  $k$  — число прутков, находящихся в рабочей зоне одной цилиндрической щетки;  $\mu$  — коэффициент, учитывающий разрыхление материала и равный по опытным данным  $\mu = 0,4 \dots 0,45$  [115].

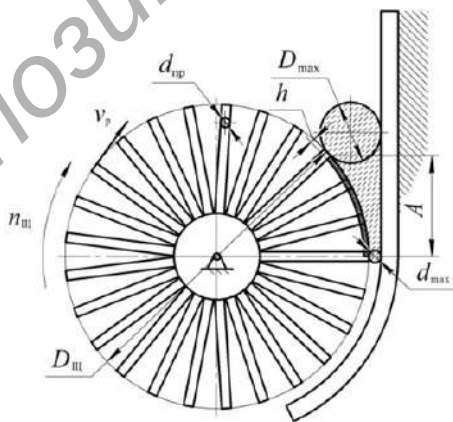


Рисунок 7.15 — Расчетная схема производительности

Для определения необходимой мощности при расчете условия разрушения частицы материала исходим из того положения в сопротивлении материалов, которое гласит, что внешняя сила, приходящаяся на каждый элемент, равна частному от деления общей внешней силы на число элементов.

Разрушение твердых частиц производится цилиндрическим щеточным рабочим органом в динамическом режиме и во многом определяется их размерами.

Допустим также, что боковой раздвижки соседних проволочек не происходит, так как, во-первых, соседние проволочки от действия других частиц материала «сдвигают» их в противоположном направлении, а центробежные силы от вращения иглофрезерного рабочего органа только повышают устойчивость проволочных элементов и увеличивают их изгибную жесткость.

При учете взаимной работы проволочек считаем, что каждый последующий по фронту движения ряд проволочек разрушает свое количество частиц и с соседними рядами не взаимодействует.

Определяем необходимую мощность, возникающую в процессе измельчения, по формуле  $N_p = P_{\sum \max}^D v_p$ , где  $P_{\sum \max}^D$  — общая внешняя сила, Н;  $v_p$  — скорость удара, принимается равной окружной скорости ротора, м/с, рекомендованные значения 40...60 м/с [220].

Общая внешняя сила  $P_{\sum \max}^D$  определяется с учетом (7.16) по формуле  $P_{\sum \max}^D = P_{\max}^D kz$ , где  $k$  — число прутков, находящихся в рабочей зоне одной цилиндрической щетки;  $z$  — число рядов однорядных цилиндрических щёток.

Окружная скорость  $v_p = \frac{\pi D_{\text{щ}} n_{\text{щ}}}{60}$ , где  $D_{\text{щ}}$  — диаметр однорядной цилиндрической щётки, м;  $n_{\text{щ}}$  — число оборотов ротора в единицу времени.

Суммарная расчетная мощность двигателя, необходимая для вращения иглофрезерного рабочего органа измельчителя с учетом всех сил сопротивления, может быть определена по формуле

$$N = \frac{N_p + N_{тр}}{\eta}, \text{ где } N_p \text{ — мощность электродвигателя, Вт; } N_{тр} \text{ —}$$

мощность, необходимая на преодоление сил трения, Вт;  $\eta$  — КПД привода, который можно принимать равным  $\eta = 0,93 \dots 0,95$ .

При этом не учитываем мощность, растрачиваемую на преодоление аэродинамического сопротивления, считая её несущественной.

## 7.6 Экспериментальные исследования измельчителей с иглофрезерными рабочими органами

Для проведения измельчения материала по методу истирания (см. рисунок 7.5, схема 1) была изготовлена экспериментальная установка, рабочий орган которой приведен на рисунке 7.16, а общий вид — на рисунке 7.17. Диаметр такого рабочего органа равен 150 мм, ширина — 60 мм, мощность приводного электродвигателя  $N = 1,2$  кВт, а его частота вращения — 2 940 об. / мин.

Измельчению подвергались длинномерные куски резины с поперечным сечением  $20 \times 40$  мм, вырезанные из автомобильных шин, которые равномерно подавались через загрузочный патрубок и подвергались многочисленным микросрезам торцами проволоочных стержневых элементов рабочего органа. Результаты анализа дисперсного состава измельченного материала, проанализированного на лазерном гранулометре, приведены на рисунке 7.18.



Рисунок 7.16 — Иголфрезерный рабочий орган



Рисунок 7.17 — Общий вид иголфрезерного измельчителя

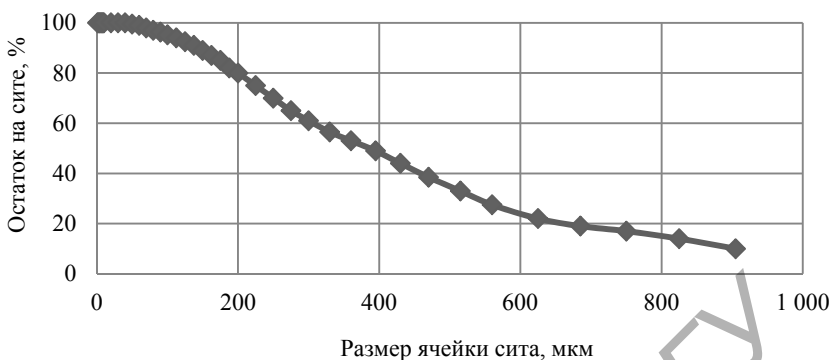


Рисунок 7.18 — Результаты анализа дисперсного состава измельченной резины

Полученные результаты свидетельствуют о высокой интенсивности процесса измельчения и возможности получения мелкодисперсных порошков резины, пластика и ряда композитов. Характер разрушения материала является комплексным процессом, сочетающим в себе истирание и микрорезание. Изначально на поверхности резины образуются мелкие борозды, размеры которых определяются диаметром проволочек щеточных элементов, которые последовательно наращиваются на следующих циклах проведения процесса измельчения. На основе использования данного механизма истирания возможно создание универсальных агрегатов для переработки анизотропных материалов в промышленных масштабах, например, для измельчения автомобильных шин. Для этого требуется в состав подобных агрегатов включать устройства для подачи исходного материала, специальные шпиндели с иглофрезерными рабочими органами, системы аспирации и т. д.

Исследование процессов ударного измельчения, соответствующего схеме 6 рисунка 7.5, проводилось на специальном стенде, общий вид которого приведен на рисунке 7.19. В качестве ударных органов использовались плоское и щеточное била (рисунок 7.20). При измельчении отсева ячеистого бетона крупностью 5...8 мм при скорости ударного воздействия 37,5 м/с установлено, что щеточное било позволяет увеличить выход мелкой фракции — 0,08 мм — в 3...4 раза. Результаты измельчения представлены на рисунке 7.21. Это можно рассматривать как предпосылки создания на этой основе молотковых мельниц с повышенной степенью измельчения.

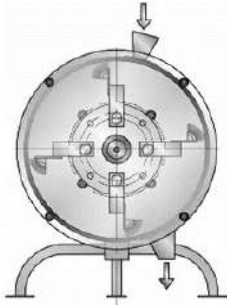


Рисунок 7.19 — Общий вид стенда для ударного измельчения

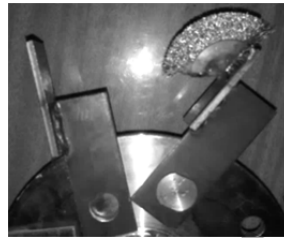


Рисунок 7.20 — Варианты конструкций плоского и щеточного бил

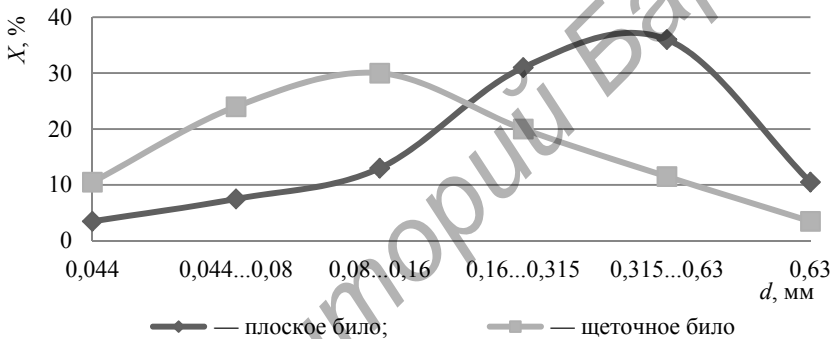


Рисунок 7.21 — Результаты ударного измельчения ячеистого бетона

Для проведения экспериментальных исследований разработан также опытный образец иглофрезерного валкового измельчителя, конструкция которого соответствует схеме 7 рисунка 7.5, а общий вид изображен на рисунке 7.22.

Конструкция содержит два цилиндрических валка, вращающихся навстречу друг другу. Один из них является щеточным. Передача крутящего момента привода посредством клиноременной передачи осуществляется на гладкий валок, который за счет сил трения, т. е. прижатия валков друг к другу, приводит в синхронное вращение щеточный валок. Стержни щеточного валка своими торцами интенсивно измельчают сыпучий материал, подаваемый в межвалковое пространство.



Рисунок 7.22 — Общий вид иглофрезерного валкового измельчителя

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. Механоактиватор валкового типа может также найти применение при домоле цемента, обработке лежалых цементов, а также придании порошковым продуктам хорошей сыпучести, увеличении их реакционной способности и дезагрегации.

Изготовленная конструкция рабочего вала включает в себя щетки, которые состоят из стального ворса с плотной упаковкой, диаметр цилиндрических щеток — 150 мм, ширина — 30 мм. Рабочий валок включает в себя две соединенные между собой щетки. Мощность приводного электродвигателя  $N = 1,5$  кВт.

В качестве измельчаемого материала использовалась сухая комовая глина, которая равномерно подавалась в рабочую зону иглофрезерного измельчителя. Результаты экспериментов, выполненные при различных частотах вращения валков, приведены на рисунках 7.23 и 7.24.

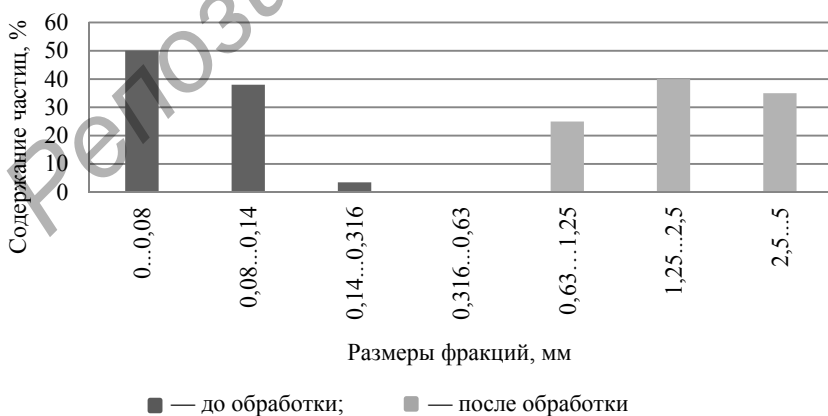


Рисунок 7.23 — Результаты измельчения глины,  $n = 2\ 920$  об. / мин

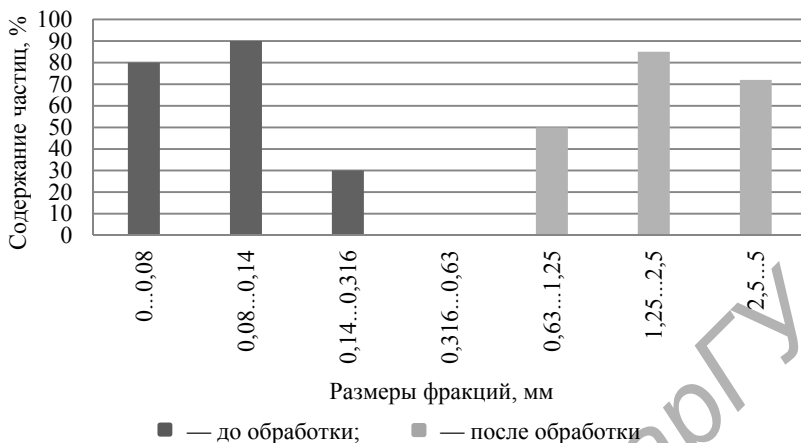


Рисунок 7.24 — Результаты измельчения глины,  $n = 1\ 440$  об./мин

Их анализ показывает, что иглофрезерное валковое измельчение характеризуется достаточно высокой интенсивностью процесса, которая возрастает с увеличением частоты вращения валков. При этом четко прослеживается закономерность увеличения не только выхода самой мелкой фракции, но и активного переход от более крупных к более мелким другим фракционным составом, но с сохранением некоторой пропорциональности между ними. Это свидетельствует о селективности и избирательности процесса помола, что может быть использовано для механоактивации строительных материалов и рудоподготовки в обогащительных процессах.

Анализ конструкций иглофрезерных измельчителей [186; 220], оценка возможных механизмов воздействия щеточных рабочих органов на обрабатываемые материалы, а также результаты их технологических испытаний показывают, что этот класс оборудования является особенно эффективным для измельчения анизотропных и сложных по составу и свойствам материалов.

Развитие иглофрезерных измельчителей должно идти по пути заимствования в качестве рабочих органов широко используемых в промышленности иглофрез и щеток различных конструкций, применяемых для упрочнения и зачистки поверхностей от ржавчины, окалина и заусенцев. При создании измельчительных агрегатов повышенной производительности потребуются изготовление специальных щеточных рабочих органов больших размеров.

Обобщённая оценка агрегатов с различным конструктивным исполнением иглофрезерных рабочих органов даёт основания полагать, что этот класс оборудования после выполнения необходимого цикла научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ может быть достаточно хорошей технической базой для создания принципиально новых измельчительных машин.

### **7.7 Создание иглофрезерных рабочих органов для технологических аппаратов промышленного назначения**

Иглофрезерные аппараты являются новым видом технологического оборудования для проведения процессов измельчения, смешивания и механоактивации [139; 148; 186]. Их основу составляют иглофрезерные рабочие органы, которые представляют собой наборы металлических стержневых элементов, собираемых в пакеты, щетки или жгуты, которые своими консольными частями воздействуют на частицы обрабатываемого материала [171; 220]. В зависимости от конструктивного исполнения приводного механизма иглофрезерные рабочие органы могут обеспечивать различные варианты нагружения частиц обрабатываемого материала [182; 221].

Технологические испытания иглофрезерных аппаратов [145; 148; 186] показали высокую эффективность при переработке различных материалов, но особую актуальность они имеют для дезинтеграторных технологий, где используются неоднородные и сложные по составу и свойствам материалы: мел, мергель и глина карьерной влажности, твердые бытовые отходы, резина, механоактивация композиций вязущих веществ и т. д. В качестве рабочих органов в экспериментальных образцах иглофрезерных установок использовались металлические щётки, конструкции которых функционально мало приспособлены для переработки таких материалов.

Проблема в данном случае заключается в том, что выпускаемые промышленностью щётки предназначены только для зачистки поверхности, удаления заусенцев, упрочнения наружного слоя и других подобных операций [31; 52; 86]. Такой инструмент имеет небольшие размеры, характеризуется низкой жесткостью и не обладает достаточной массой, необходимой на обеспечение наработки, связанной с износом. Эти и другие факторы не позволяют рассмат-

ривать проволочные щётки и иглофрезы в качестве готовых изделий для выполнения на их основе рабочего оборудования иглофрезерных измельчителей.

Для создания иглофрезерных измельчителей главной задачей является проектирование и изготовление рабочих органов — иглофрез или щёток различных конструкций. Заслуживает внимания многолетний опыт использования щёток или иглофрез для обработки поверхности материала [31; 52; 86]. Попытаемся в максимальной степени найти этому применение в иглофрезерных рабочих органах измельчителей.

Все виды проволочного инструмента разделяют по форме рабочей поверхности на цилиндрические, торцевые, ступенчатые, профилированные [86]. Основными конструктивными параметрами проволочных щёток и иглофрез является плотность ворса и его свободная длина, диаметр рабочей поверхности, диаметр единичных проволок, а также его обобщенный параметр — гибкость рабочей части, т. е. совокупная жесткость набора проволок, одновременно участвующих в рабочем процессе.

Из технологических параметров проволочных рабочих органов прежде всего следует выделить окружную скорость вращения и натяг, т. е. величину деформации рабочей поверхности, а из эксплуатационных — долговечность [31; 52; 86].

Для практического использования нас будут интересовать цилиндрические и торцевые иглофрезы, а также прямоугольные или профилированные (сегментные) щетки. Применительно к процессам измельчения эти рабочие органы должны претерпеть определенные изменения, которые на примере цилиндрических щеток мы постараемся сформировать в концентрированном виде и свести их в таблицу 7.2.

Для изготовления стержневых элементов используется проволока стальная углеродистая пружинная по ГОСТ 14959-79 марок 51ХФА, 60С2А, 65С2ВА, 70С3А с пределом прочности 1200...1300 МПа.

Предполагаемые параметры иглофрезерных рабочих органов для промышленных измельчителей основаны на экспертных оценках авторов и будут корректироваться в процессе их проектирования.

Т а б л и ц а 7.2 — Сравнительные характеристики проволочных рабочих органов для металлообработки и измельчения материалов

Параметр	Металлообработка	Измельчение
Плотность проволочного ворса	0,2...0,3 — щетки, 0,4...0,89 — иглофрезы	0,2...0,5
Диаметр единичных проволок, мм	0,1...1,0	0,4...3,0 (12)
Свободная длина проволочного ворса, мм	12...30 — щетки, 30...75 — иглофрезы	30...120 (300)
Диаметр рабочей поверхности, мм	50...400	200...400 (700...1 000)
Длина рабочей поверхности, мм	20...100 / 20...200	100...500 (3 000)
Натяг, мм	0,2...6,0	-6...3 (50)
Окружная скорость вращения, м / с	0,8...2,2 — иглофрезы, 10...60 — зачистка	3...60 (100)
Долговечность, ч	50...400	> 400

*Примечание.* Значение параметров в скобках относится к созданию прогнозируемых объектов.

В качестве объектов заимствования, например, у ведущих фирм-производителей «Осборн», «Лессман» (ФРГ), приняты геометрические параметры, принципы конструирования составных щёток и некоторые аспекты технологии изготовления. В определенной степени выбор параметров для рабочих органов иглофрезерных измельчителей нами учтён из эксплуатации чесальных и других машин, применяемых в легкой промышленности.

Опыт разработки и эксплуатации дорожных подметательных щёток для создания иглофрезерных рабочих органов возможен только в минимальной степени и обусловлен рядом факторов. Во-первых, они изготавливаются из неметаллических материалов (капрона) и имеют большую свободную длину проволочного ворса и его низкую плотность, обуславливающую его малую изгибную жесткость, во-вторых, условия работы не соответствуют требованиям разрушения материала и характеризуются очень низкой энергонапряженностью, в-третьих, геометрическую корреляцию метал-

лических щёток для измельчения и дорожных щёток нельзя рассматривать как тождественную.

Решение практических задач по созданию крупноразмерных иглофрезерных рабочих органов требует пересмотра как собственно их конструкции, так и технологии изготовления, что необходимо организовывать на специализированном производстве. Следует прогнозировать, что освоение производства крупных щёточных рабочих органов дает возможность улучшить целый ряд технологических пределов в производстве строительных материалов, например, приготовление высококачественной формовочной смеси для производства силикатного кирпича или получать альтернативное топливо путем переработки ТБО.

Создание новых конструкций иглофрезерных рабочих органов для технологических аппаратов промышленного назначения позволит не только сформировать новый класс оборудования, но и обеспечить отечественный приоритет на рынке его продаж.

Репозиторий ВАРНТ

## 8 ДРУГИЕ КОНСТРУКЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ АДАПТИВНОГО ДЕЙСТВИЯ

### 8.1 Аппараты на основе пружинных рабочих органов

*Пружинный насос-диспергатор.* Насос-диспергатор (рисунок 8.1) может быть использован для проведения процессов дезинтеграции частиц твердой фазы в жидкости с одновременным нагнетанием суспензии или шлама под некоторым давлением [106].

Насос-диспергатор содержит раму 1, на которой смонтирована тороидальная камера 2 и внутри которой установлен модуль для дезинтеграции, выполненный в виде винтовой пружины 3 прямоугольного или трапецеидального сечения витков, смонтированной посредством узлов крепления 4, 5 на пустотелом приводном валу 6 опоры 7 и оси 8 дополнительной опоры 9. На приводном валу 6 установлен шкив 10 с клиновым ремнем 11. Для ввода обрабатываемой жидкости в модуль дезинтеграции предусмотрен патрубок 12, неподвижно установленный внутри винтовой пружины 3 по всей длине ее изогнутой части и снабженный отверстиями 13 на его изогнутой части и заглушкой 14 на конце. На раме 1 патрубок 12 закреплен посредством кронштейна 15. Для отвода готового продукта из системы предусмотрен патрубок 16.

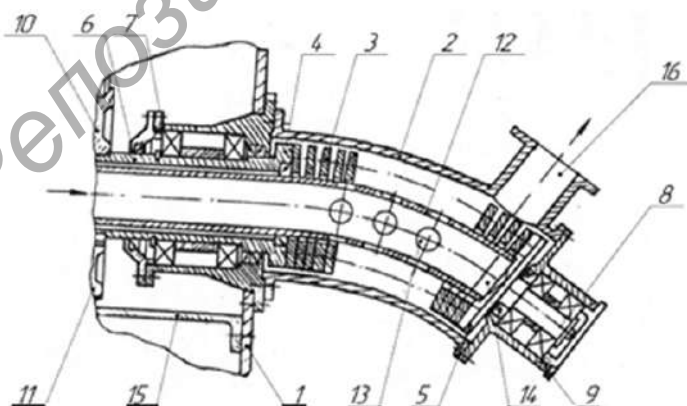


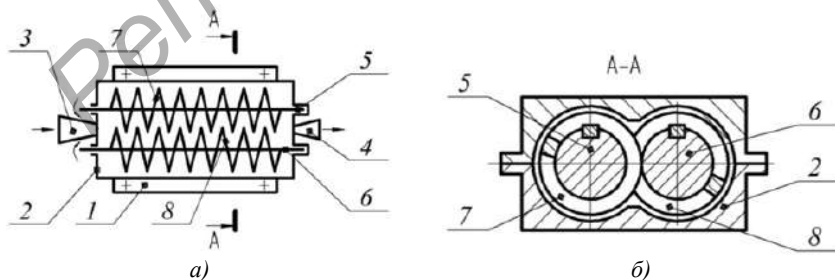
Рисунок 8.1 — Пружинный насос-диспергатор

Устройство работает следующим образом. От клинового ремня 11 крутящий момент передается на шкив 10 и далее через пустотелый вал 6 опоры 7 и узел крепления 4 на винтовую пружину 3. Винтовая пружина 3 вращается подобно гибкому валу и через отверстия 13 заполняется подлежащими обработке суспензией или шламом, что захватывается витками и транспортируется в кольцевом пространстве между тороидальной камерой 2 и патрубком 12, подвергаясь интенсивной дезинтеграции в зонах контакта витков пружины друг с другом. После завершения цикла обработки, многократно проходя через межвитковые зоны, суспензия вытесняется из модуля дезинтеграции через патрубок 16.

Модуль дезинтеграции, обладая насосным эффектом, позволяет исключить из системы насос и одновременно производить тонкий помол твердых частиц в суспензии.

*Пружинный смеситель-диспергатор.* Рассматриваемый смеситель-диспергатор [96] предназначен для эффективной обработки высоковязких продуктов путем непрерывного смешивания, диспергирования и создания напорного давления за счет образования клиновидных пространств между витками параллельных пружинных рабочих органов, образующих «зацепление» по длине их общей образующей. Сущность конструкции иллюстрируется рисунком 8.2 на котором представлено общее устройство такого аппарата (см. рисунок 8.2, а) и его поперечный разрез (см. рисунок 8.2, б).

Смеситель-диспергатор содержит раму 1, рабочую камеру 2 с люками 3 для загрузки и 4 для выгрузки и установленными в ней с возможностью вращения на валах 5, 6 винтовыми рабочими органами 7, 8. Для закрепления пружин на валах предусмотрены шпонки 9.



а — продольный разрез; б — поперечный разрез

Рисунок 8.2 — Пружинный смеситель-диспергатор

Работа аппарата осуществляется следующим образом. Валы 5 приводятся в синхронное вращение, через люк 3 непрерывно подаются подлежащие технологической обработке исходные компоненты, захватываются рабочими органами 7, 8 и перемещаются в направлении подъема их винтовой наливки. При этом за счет прижатия витков друг к другу в зонах их взаимного перекрытия реализуется эффективный механизм диспергирования и смешивания. Загруженный продукт многократно подвергается сжимающему и истирающему воздействию, последовательно перемещаясь к выгрузочному люку 4, из которого и выходит в виде готового для последующих стадий обработки материала. За счет сил упругости пружин витки постоянно примыкают друг к другу, что исключает влияние износа на процесс диспергирования.

Предварительные расчеты показывают, что предлагаемая конструкция может быть использована для диспергирования, механоактивации и размола различных материалов, находящихся в составе вязко-пластичных композиций. При этом частицы кускового материала могут иметь крупность до 10...15 мм и твердость до 5 единиц по шкале Мооса. Данный агрегат наиболее целесообразно применять для перетира и гомогенизации при производстве паст, шликеров, шпатлевок, замазков, герметиков и других подобных продуктов.

*Сушилка полочная пружинная.* В основу конструкции положен принцип организации внутреннего рецикла материала путем сортировки его в пружинных рабочих органах и отбором высушенной фракции как более мелкой по крупности, что исключает «засорение» ею рабочих пространств для последующей сушки более крупного продукта. Движущей силой процесса в части механики транспортирования является вибрация всей установки, а в части теплообмена — точный газовый агент, взаимодействующий с сырьем по методу противотока [108; 207].

Сушилка полочная пружинная, конструкция которой приведена на рисунке 8.3, включает в себя основание 1, виброопоры пружинного типа 2, на которые опирается коробчатая сушильная камера 3 с размещенным на ней

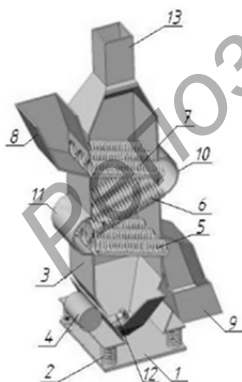


Рисунок 8.3 — Конструкция полочной сушилки с пружинными интенсификаторами

дебалансным вибратором 4 и наклонно смонтированными внутри нее секциями из наборов пружинных интенсификаторов 5, 6, 7 процесса сушки. Сушильная камера 3 снабжена также загрузочным 8 и разгрузочным 9 патрубками, а секции, состоящие из набора пружинных интенсификаторов, образуют зигзагообразную линию и в местах схождения между собой снабжены пересыпными устройствами 10, 11, расположенными с внешних сторон сушильной камеры. Для подачи газового сушильного агента в нижней камере выполнено устройство 12, а удаление отработанного сушильного агента в верхней части камеры осуществляется через патрубок 13.

Процесс сушки материала осуществляется следующим образом. Включается вибратор 4 и приводит в вертикальные колебания сушильную камеру 3, которая в своей нижней части опирается на виброопоры 2. Через устройство 12 в нижнюю часть сушильной камеры 3 подается газовый сушильный агент с температурой 400...600 °С, а через загрузочный патрубок 8 непрерывно подается влажный продукт и поступает во внутреннюю полость верхней секции пружинных интенсификаторов 7. За счет наклонной установки пружинных интенсификаторов и их вибрации исходный материал продвигается внутри полостей секций 7, 6, 5 пружин, пересыпаясь по мере продвижения вниз в пересыпных устройствах 10, 11. В процессе движения материала навстречу ему поступает горячий газовый сушильный агент и производит интенсивный отбор влаги. При этом процесс сушки осуществляется по принципу кипящего слоя. Высушенный продукт выгружается через разгрузочный патрубок 9.

Описанный вариант соответствует простейшей, а не оптимальной схеме осуществления процесса сушки. Для повышения его эффективности система настраивается таким образом, что зазоры между витками пружинных интенсификаторов постепенно увеличиваются от верхних к нижним. Это связано с тем, что мелкие частицы высыхают быстрее, во избежание ненужного их нахождения в зонах сушки их необходимо своевременно удалять. После просыпания через соответствующие зазоры между витками высушенные частицы материала падают вниз и выгружаются из аппарата. Крупные частицы продвигаются далее вниз внутри пружинных интенсификаторов с меньшей скоростью и подвергаются сушке в оптимальных условиях, так как они лучше омываются газовым агентом.

Реализуемый режим работы сушилки позволяет не только осуществлять сушку минерального сырья, но и производить его рассев на соответствующие фракции, а также его нагревать, что может быть использовано для приготовления асфальтобетонных смесей. В этом случае существенно повышается эффективность этого процесса и упрощается конструкция асфальтобетонного завода.

*Сушилка распылительная пружинная.* Распылительные сушилки достаточно широко используются в промышленности строительных материалов. Одним из направлений их дальнейшего развития может быть выполнение распылительной головки с изменяемыми параметрами работы, в частности, в виде цилиндрической пружины сжатия [100].

Представленная на рисунке 8.4 пружинная распылительная сушилка содержит рабочую камеру 1, трубопроводы 2, 3, 4 для ввода теплоносителя, осушаемого продукта и его удаления после сушки соответственно. Основной частью конструкции является устройство для распыления, выполненное в виде пружины сжатия 5, связанной с приводом 6 возвратно-поступательного действия.

Рабочий процесс распылительной сушилки осуществляется следующим образом. Включается привод 6, выполненный в виде дебалансного вибратора, обеспечивает возвратно-поступательные перемещения витков пружины 5 вплоть до их соприкосновения. Далее и одновременно по трубопроводам 2, 3 в рабочую камеру 1 под давлением подаются теплоноситель и осушаемый продукт соответственно. Потоки этих материалов интенсивно смешиваются между собой в рабочей камере 1. Основные функции смесеобразования выполняет пружинный элемент 5, который диспергирует исходный материал и подает его тонкими веерообразными потоками перпендикулярно движению потока теплоносителя, где и происходит наиболее эффективная фаза смесеобразования и, соответственно, обеспечиваются оптимальные условия процесса сушки.

Высушенный до требуемой влажности продукт в виде двухфазного потока твердых частиц и газовой смеси, отдающей свое тепло осушаемому материалу, отводится из

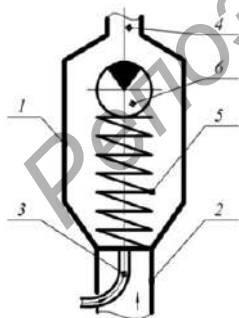


Рисунок 8.4 — Конструктивная схема пружинной распылительной сушилки

рабочей камеры 1 для последующего отделения из этого потока твердых частиц.

Использование пружинной распылительной сушилки позволяет снизить расход топлива на сушку, уменьшить габаритные размеры установки, что способствует сокращению потерь тепла от рабочей камеры.

Диспергирование сырьевого материала улучшает условия смесеобразования, при этом твердые частицы лучше оmyваются потоком теплоносителя и имеют меньшую склонность к образованию конгломератов.

*Пружинный классификатор цементного шлама.* При мокром способе производства цемента в сырьевом шламе в зависимости от свойств исходных компонентов и условий предварительной обработки может содержаться 50...85 % и даже более мелкой фракции, соответствующей по своим размерам требованиям обжига. Естественно, что в целях повышения эффективности переработки такого шлама его следует подвергать сепарированию, а домалывать только крупную фракцию [46].

Идеология решения поставленной задачи основана на создании такого механизма разделения твердых частиц шлама, когда просеивающая поверхность совершает интенсивные виброколебания, разжижающие смесь и облегчающие движение нужной фракции через рабочие зоны, причем отбор целевой части продукта производится под разряжением, а отбиваемые вибрирующими поверхностями крупные частицы постунают под действием сил гравитации в сборник, из которого удаляются механически. В качестве такой просеивающей поверхности наилучшим образом подходит цилиндрическая пружина.

Принципиальная схема разработанного для этих условий пружинного классификатора цементного шлама иллюстрируется рисунком 8.5 [101].

Пружинный классификатор содержит рабочую камеру 1 с патрубками для загрузки 2 и выгрузки 3, рабочий орган 4 и привод 5 в виде дебалансного вибратора через шток 6, движущийся в направляющей 7 и через

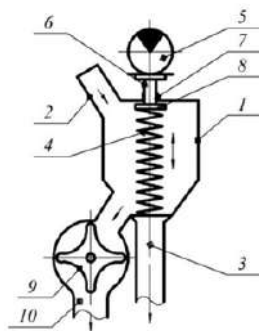


Рисунок 8.5 — Принципиальная схема пружинного классификатора цементного шлама

планку 8 передающий возвратно-поступательные перемещения пружинному рабочему органу 4. Для удаления из агрегата крупной фракции шлама в нижней части рабочей камеры 1 предусмотрен ячеиковый питатель 9 и выпускной патрубков 10. Рабочий орган 4 может собираться из нескольких параллельно установленных пружин 4.

Рабочий процесс пружинного классификатора осуществляется следующим образом. Включается дебалансный вибратор 5 и через шток 6, движущийся в направляющей 7, и планку 8 приводит в высокочастотные возвратно-поступательные перемещения пружинный рабочий орган 4. Через загрузочный патрубок 2 в рабочую камеру 1 подается грубый шлам, подлежащий классификации. Нужная по условиям технологии фракция под действием вибрации пружинного рабочего органа 4 и создаваемого разрежения поступает в его внутреннюю полость и далее через выгрузочный патрубок 3 отводится из аппарата в виде готового для последующего технологического применения продукта.

Крупная фракция, содержащаяся в шламе и не способная пройти через зазоры между витками пружинного рабочего органа 4, которые выбраны исходя из условий прохождения частиц только заданного размера, под воздействием вибрации отбиваются от рабочего органа и постепенно оседают в нижней части рабочей камеры 1. Скапливающийся таким образом остаток удаляется из агрегата ячеиковым питателем 9 и через выпускной патрубок 10 поступает на домол. Нужная производительность классификатора обеспечивается набором параллельно установленных между собой пружин 4. По мере износа межвитковых поверхностей рабочего органа 4 витки поджимаются друг к другу и компенсируют износ.

Разработанная конструкция решает ряд важных технологических задач, что достигается методами технологической вибротехники. Во-первых, цементный шлам характеризуется высокой адгезионной способностью, т.е. налипанием, что в новом агрегате устраняется вибрацией рабочих органов, которые дополнительно решают задачи стабильного выдерживания заданной границы разделения, во-вторых, между витками пружин происходит его дополнительное диспергирование, что в целом способствует повышению качества приготавливаемой суспензии.

*Пружинная мельница-флотомашина.* Мельница-флотомашина предназначена для обогащения полезных ископаемых на горно-

обогащительных фабриках цветной и черной металлургии и может быть использована для совмещения в одном агрегате операций измельчения и флотации [199].

Мельница-флотомашина, конструктивная схема которой приведена на рисунке 8.6, включают в себя камеру 1 с трубками 2 для подачи пульпы и отбора камерного продукта или отвода хвостов обогащения 3, в центральной части которой установлены рабочие органы, каждый из которых состоит из дугообразно изогнутых пружин 4, смонтированных узлами крепления 5, 6 на валу 8 привода и пустотелой оси 9 дополнительной опоры 10 соответственно. В полости пружины 4 установлено устройство 11 для подвода воздуха, выполненное в виде изогнутой по дуге трубы с отверстиями 12. Привод состоит из электродвигателя 13 и опоры 14. Дно стенки в нижней части камеры 1 копирует профиль рабочего органа 4. Для съема ценного продукта в верхней части камеры 1 предусмотрено гребковое устройство 15.

Мельница-флотомашина работает следующим образом. Камера 1 через патрубок для подачи пульпы 2 заполняется пульпой, в состав которой входят руда крупностью до 5...10 мм, вода и флотореагент в требуемом соотношении. Включается приводной электродвигатель и через вал 8 и узел 5 приводит во вращение пружинный рабочий орган 4.

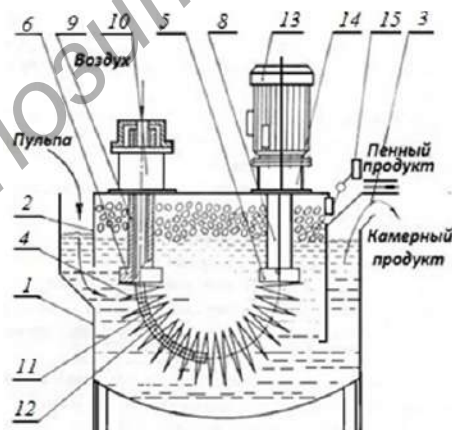


Рисунок 8.6 — Конструктивная схема пружинной мельницы-флотомашины

Через изогнутую трубу 11 по отверстиям 12 в полость рабочих органов 4 подается воздух. При работе всех элементов аппарата рудный материал попадает в сходящиеся клиновидные пространства между витками пружин 4 и подвергается дезинтеграции, разрушаясь до флотационной крупности, подхватывается пузырьками воздуха, который также диспергируется в межвитковых пространствах, а частички руды закрепляются на них и выносятся в пенный слой. Весь материал загрузки в нижней части камеры 1 интенсивно перемешивается, образуя зоны мощных турбулентных потоков, что способствует хорошему попаданию частиц руды в зоны разрушения.

Рудный материал постепенно измельчается практически до полного раскрытия зерен полезных компонентов. Пустая порода при этом или камерный продукт либо удаляется из машины, либо поступает через патрубок 3 в другую камеру, где рабочий цикл продолжается. Через патрубок 2 аппарат постоянно пополняется пульпой, что делает весь производственный цикл стабильным. Сфлотированный продукт концентрируется в верхней части камеры 1 в пенном слое и удаляется на пересортировку гребковым устройством 15.

Использование пружинной мельницы-флотомашины позволяет снизить стоимость получения обогащенного продукта и повысить при этом степень его извлечения. Недостатком данной конструкции является отсутствие устройства автоматической замены рабочих органов или всего модуля при их выходе из строя, что в дальнейшем может быть решено путем создания быстро заменяемых модулей или секций, входящих в состав флотомашины.

Предлагаемое решение в целом позволяет повысить степень извлечения полезных минералов за счет раскрытия сростков и селективного воздействия на материал упруго-деформируемыми пружинными рабочими органами, которые дают возможность эффективно измельчать сростки и тонко вкрапленные минералы без их переизмельчения до крупности, при которой флотация прекращается. Одновременно происходит механическая активация перерабатываемого материала, что также улучшает условия выхода целевых компонентов.

*Комбинированный криоизмельчитель полимеров.* Тщательный анализ физики и гидродинамики дисперсных потоков в процессах измельчения позволил разработать принципиально новый комби-

нированный криоизмельчитель с ударной дробилкой, пружинной мельницей и встроенным классификатором, объединенными в единый модуль и приводимыми во вращение от одного двигателя [104; 179].

Принципиальная схема такого агрегата приведена на рисунке 8.7. Основными базовыми агрегатами измельчителя являются молотковая дробилка, пружинная мельница и центробежный пневмоклассификатор.

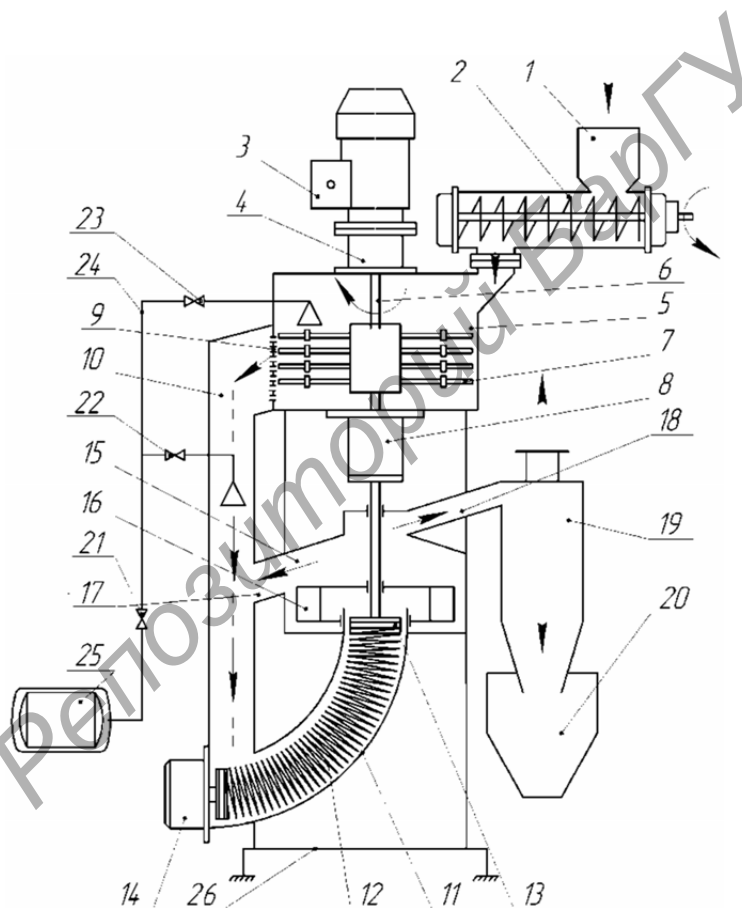


Рисунок 8.7 — Принципиальная схема комбинированного криоизмельчителя

Криоизмельчитель содержит приемный бункер 1, шнековый питатель 2, приводной электродвигатель 3, смонтированный на опоре 4, выходной вал 6, которой размещен в опоре 8 дробильной камеры 5 и оснащен рабочим оборудованием 7. Камера 5 имеет решетку 9 для отбора дробленой фракции, соединенную с патрубком 10, входящим в трубчатую рабочую камеру 11 с пружинным измельчительным органом 12, смонтированным своими концами на узле крепления 13 и оси дополнительной опоры 14. Над пружинным измельчителем установлена сепарационная камера 15, в которой на валу 6 установлена крыльчатка 16, а сама камера имеет патрубки 17 и 18 для удаления крупки и пневмовыноса измельченной фракции, которая отделяется от газовой смеси в циклоне 19 и поступает в емкость 20. Агрегат имеет вентили 21, 22, 23, встроенные в трубопровод 24, для подачи в рабочие зоны измельчающих устройств жидкого азота из емкости 25. Вся конструкция смонтирована на раме 26.

Измельчитель работает в непрерывном режиме с непосредственной подачей жидкого азота в зоны измельчения. При этом исходный полимерный материал циркулирует по схеме «шнековый питатель — измельчитель ударного действия — пружинная мельница — центробежный классификатор — циклон». Недоизмельченный продукт через патрубки 17 и 10 возвращается на домол, а отработанная газовая смесь удаляется из циклона 19 в атмосферу. Разрушение материала осуществляется ударными элементами (билами) рабочего оборудования 7 в дробильной камере 5 и пружинным рабочим органом 12, при вращении которого витки пружины захватывают частицы материала и интенсивно измельчают. Пружинный рабочий орган при этом выполняет роль питателя и подает материал в зону классификации. Подача азота в рабочие зоны производится по трубопроводу 24 и регулируется вентилями 21, 22, 23. Исходные гранулы полимера предварительно охлаждаются парами хладагента, который омывает их в шнековом питателе 2.

Решенная задача выполнения на одном приводном валу всей использованной рабочей части измельчителя позволяет не только создать простую и удобную в эксплуатации конструкцию, но, главное, снизить до минимума потери на трение и обеспечить условия работы, при которых расход азота минимален, а эффективность установки максимальна.

*Пружинный питатель-дозатор.* Технологические функции подачи и дозирования порошковых материалов являются важной составной частью многих производственных процессов. Накопленный опыт проектирования пружинных мельниц позволяет при небольшой модернизации создать на их основе эффективный пружинный питатель-дозатор, причем с большим диапазоном изменяемых параметров. В качестве примера на рисунке 8.8 покажем один из вариантов выполнения такого аппарата [110].

Разработанный аппарат включает в себя приводной электродвигатель 1, на валу которого и оси дополнительной опоры 2 смонтирован рабочий орган 3, выполненный в виде дугообразно-изогнутой пружины, размещенной в трубчатом корпусе 4, с патрубками 5, 6 для загрузки и выгрузки материала соответственно. Вся конструкция смонтирована на раме 7. Для увеличения количества одновременно подаваемых компонентов в трубчатый корпус 4 может быть встроен по меньшей мере один дополнительный патрубок 8 для загрузки других компонентов.

В процессе работы вращающийся от приводного электродвигателя 1 пружинный рабочий орган 3 своими витками захватывает исходный материал и равномерно перемещает его от загрузочного 5 к выгрузочному 6 патрубкам. В случае использования дополнительных патрубков 8 расширяется номенклатура дозируемых компонентов и, как следствие, функциональные возможности аппарата в целом.

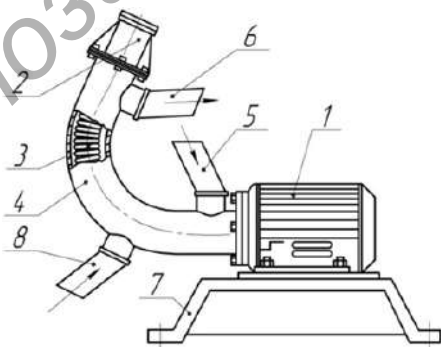


Рисунок 8.8 — Конструкция пружинного питателя-дозатора

В отличие от всех известных аналогов пружинный питатель-дозатор кроме точного дозирования способен эффективно измельчать материал, качественно, с высокой степенью однородности перемешивать различные компоненты, а также производить их механоактивацию. Важно, что это происходит в одном аппарате при минимальных энергетических и эксплуатационных издержках.

## **8.2 Дробилки ударного действия с управляемым движением обрабатываемых материалов**

Одним из эффективных методов измельчения для производства многих материалов является разрушение ударом. По сравнению с раздавливанием или изломом кусков время воздействия на материал при ударе занимает доли секунд. При этом значительная часть кинетической энергии дробящего органа переходит в энергию разрушения минеральной структуры или образованию микродефектов и микротрещин [202]. Таким образом, удастся существенно повысить эффективность многих технологических процессов, хотя реальный потенциал этого вида оборудования далеко не исчерпан. Из всего многообразия измельчителей наибольшее применение имеют молотковые дробилки и мельницы [64; 208].

Одним из основных недостатков молотковых измельчителей является несовершенство их рабочих процессов. Это обусловлено тем, что поведение материала в рабочей камере характеризуется высокой степенью нестабильности, заключающейся в неравномерности приложения ударных импульсов отдельных бил на частицы различной крупности и получении продукта полидисперсного состава, а также скачкообразным снижением интенсивности приложения ударных импульсов, начиная с первых ударов по кускам материала, что связано с приданием им характера движения, приближенного к движению концевых элементов бильной системы [208].

Для устранения указанного недостатка предлагается использовать подход, основанный на управляемом движении обрабатываемого материала в рабочих камерах измельчителей ударного действия. Достигнуть этого возможно путём создания секционных стадий измельчения, когда в каждой стадии (секции) реализуется такой характер движения измельчаемых кусков, при котором ли-

нейная скорость ударов рабочих элементов сохраняется максимально высокой, что обеспечивается наличием зон «гашения» окружной скорости разрушаемых частиц. По сути, это один из методов адаптивного проведения процесса ударного измельчения.

В практическом плане данная задача решалась по двум основным направлениям: 1) молотковая дробилка выполнена с вертикальным ротором, 2) с расположением ротора по углам к горизонту. Во всех вариантах конструкция предусматривала создание таких условий поведения материала в рабочей камере, чтобы после активной фазы ударного воздействия частицы не разгонялись по окружным траекториям, а снижали свою скорость относительно стенок рабочей камеры до минимального значения, а ещё лучше — получали импульс движения противоположный направлению движения ударных элементов. Рассмотрим некоторые варианты реализации этих направлений [97; 142; 169; 212].

*Молотковый измельчитель с вертикальным ротором.* Конструкция молоткового измельчителя изображена на рисунке 8.9 и состоит из отдельных секций с разделительными зонами и выполнением расширительных камер между ними. В исходном варианте эта установка представляет собой вертикально установленную на раме 1 цилиндрическую камеру 2 с загрузочным и выгрузочным люками 3, 4. Внутри камеры установлен вал 5, на котором размещены секции ударных элементов 6, 7, 8. Напротив свободных зон секций в корпусе установлены расширительные камеры 12, 13, которые оснащены патрубками для вывода целевой фракции. Привод дробилки состоит из электродвигателя 16 и клиноременной передачи 17. Секции ударных элементов, в свою очередь, состоят из рядов бил 9, закреплённых в шарнирах 10 на дисках 11.

Дробилка работает следующим образом. Через загрузочный люк 3 в рабочую полость дробилки равномерным потоком подаётся подлежащий обработке материал, который подвергается интенсивному разрушению быстро вращающимися ударными элементами 9 секций 6, 7, 8. Частицы измельчённого материала под действием сил гравитации удаляются из аппарата через разгрузочный люк 4. По условиям технологического процесса в рабочую камеру через патрубок 15 может подаваться тепловой или охлаждающий газовый агент, а также на патрубки 14 могут устанавливаться устройства для отбора целевой фракции или для подачи в камеру дробления дополнительных компонентов.

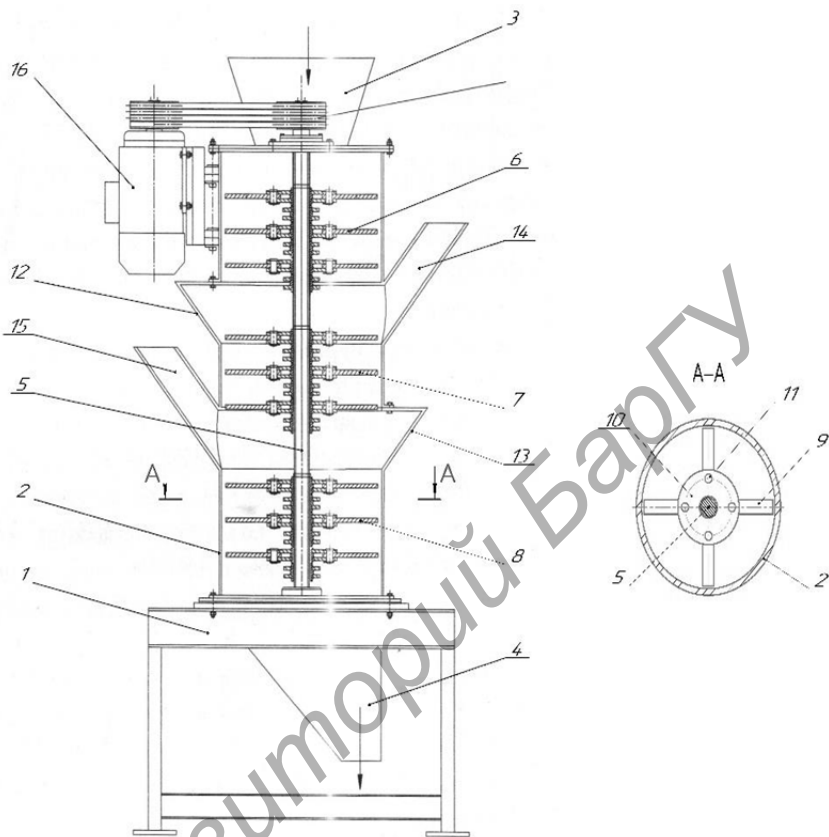


Рисунок 8.9 — Многосекционная дробилка ударного действия с вертикальным ротором

Использование разработанной дробилки позволяет получить целый ряд преимуществ. Во-первых, выполнение отдельных секций рабочего оборудования обеспечивает целенаправленное управление закономерностями процесса разрушения обрабатываемого материала. Это, в свою очередь, способствует стабилизации зернового состава продуктов измельчения, снижению энергопотребления за счёт минимизации трения между торцами бил и внутренней поверхности корпуса, а также проведению селективного измельчения, что чрезвычайно важно для обогащительных процессов.

Во-вторых, наличие расширительных зон в рабочей камере дробилки позволяет затормаживать окружное движение частиц и придавать им необходимые кинематические характеристики, обеспечивающие повышение эффективности действия ударных элементов на каждом из рядов бил.

В-третьих, наличие патрубков в корпусе позволяет своевременно выводить целевую фракцию, дополнительно добавлять компоненты, а также подавать тепловые или охлаждающие газовые агенты, что существенно расширяет функциональные возможности разработанной дробилки.

Предпочтительная область применения дробилки — предварительное измельчение сырья в циклах многостадийных переработок; домол различных компонентов, прежде всего сырьевых; приготовление формовочных составов и смесей; переработка отходов производства; селективное дробление.

Выполнение ударных элементов в виде ножей или фрез даёт возможность производить переработку волокнистых и пленочных материалов, растительного сырья, пластмасс и др. В целом практическое применение предлагаемой молотковой дробилки повышает степень дробления материала, снижает энергоёмкость процесса, позволяет обрабатывать более влажные продукты, в том числе проводить их предварительную сушку, осуществлять селективное измельчение и работать в замкнутом цикле совместно с пневмокласификатором.

*Молотковый измельчитель с наклонным ротором.* Технические решения подобного направления могут иметь различные конструктивные исполнения в зависимости от назначения, условий применения, производительности и ряда других условий. Важно при этом отметить, что кроме чистого измельчения в таком агрегате можно производить и другие технологические операции: сушку, смешивание, пневмокласификацию, механоактивацию, криообработку и др. [97].

В качестве конкретного варианта исполнения рассмотрим однороторную молотковую дробилку с наклонным корпусом, предназначенную для измельчения и сушки. Подобный пример продиктован желанием более предметно представить возможности нового оборудования. Конструкция дробилки изображена на рисунке 8.10.

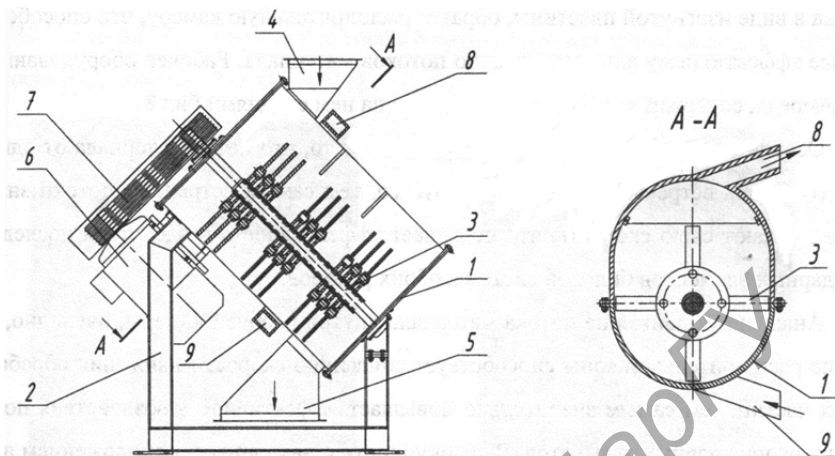


Рисунок 8.10 — Молотковая дробилка с наклонным корпусом

Она включает в себя цилиндрическую камеру 1, установленную на жёсткой раме 2, внутри которой находится рабочее оборудование 3, загрузочный и выгрузочный люки 4, 5, привод, состоящий из двигателя 6 и клиноременной передачи 7, в корпус установлены патрубки 8, 9 для подачи в рабочую камеру теплового газового агента и вывода конденсированного пара или влаги.

Установка работает следующим образом. Включается приводной электродвигатель 6 и через клиноременную передачу 7 приводит во вращение рабочее оборудование 3, включающее ротор с бильной системой. Одновременно через загрузочный люк 4 в рабочую полость равномерным потоком подаётся подлежащий обработке материал, а через патрубок 9 подаётся тепловой газовый агент. Материал под действием быстро вращающихся ударных элементов и горячих газов подвергается сушке, а также дополнительному разрушению и смешиванию. Крупные частицы обработанного материала под действием сил гравитации удаляются из аппарата через разгрузочный люк 5. Самая мелкая пылеватая фракция с отдавшим своё тепло воздухом через патрубок 8 отбирается из рабочей камеры вакуумным устройством (дымососом) и поступает на разделение.

Анализируя конструкцию и рабочий процесс измельчительных машин с наклонным корпусом, необходимо сделать ряд сравнительных оценок этих машин с аппаратами аналогичного назначения, с горизонтальными или вертикальными валами.

Во-первых, расположение основных агрегатов хорошо komponуется на раме, а приводной двигатель не ограничен вертикальностью установки, не требует усиления подшипниковых опор и не имеет предела по мощности. Во-вторых, обрабатываемый материал гораздо дольше находится в рабочей камере, что позволяет осуществлять его гарантированную переработку. В-третьих, ко всем элементам рабочего оборудования имеется хороший доступ и возможность использовать простые грузоподъёмные механизмы для ремонтных работ. В-четвёртых, изменённая компоновка создаёт более благоприятные условия для встраивания разработанного агрегата в существующие технологические линии.

*Измельчители ударного действия с многолезвийными рабочими органами.* Измельчение неоднородных по размерам, составу и свойствам материалов, к которым можно отнести твёрдые коммунальные отходы, композиты искусственного и растительного происхождения и многие другие продукты, сопряжено с большими трудностями и, как правило, осуществляется в несколько стадий. Подобную задачу, по нашему мнению, можно успешно решить адаптивными методами на основе выполнения рабочих измельчающих органов с многолезвийными режущими элементами и их равномерного распределения по всему объёму рабочей камеры и создания оптимальных условий для одновременного воздействия на каждый кусок материала нескольких внешних силовых воздействий по различным направлениям [142; 212].

Для решения данной проблемы предлагаются конструкции измельчителей с рабочими органами режущего действия, предназначенных для переработки материалов различными физико-механическими свойствами (бумага, картон, текстиль, древесина и др.).

Для этого измельчающее оборудование выполняется в виде быстроходного ротора, оснащённого набором зубчатых фрез, равномерно распределённых по всему рабочему пространству. Целостному восприятию различных исполнений положения ротора будут способствовать две рядом помещённые схемы многолезвийных измельчителей, которые будут рассмотрены для решения одинаковых технических задач (рисунки 8.11, 8.12).

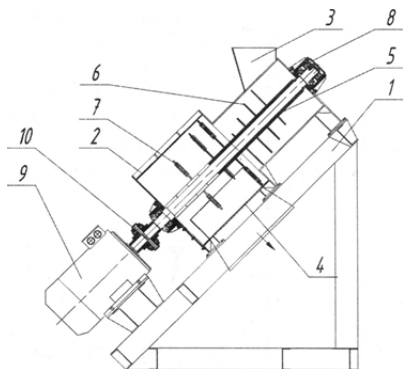


Рисунок 8.11 — Многолезвийный измельчитель с наклонным ротором

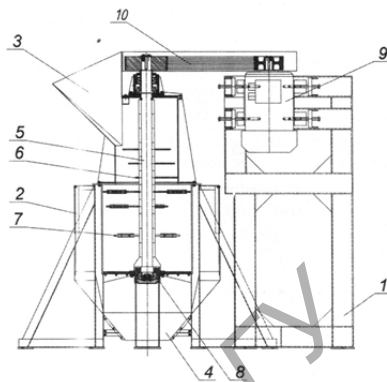


Рисунок 8.12 — Многолезвийный измельчитель с вертикальным ротором

Конструкция (см. рисунок 8.11) включает в себя многолезвийный измельчитель с наклонным ротором, который имеет жестко установленный на раме 1 под углом к горизонту двухступенчатый цилиндрический корпус 2, загрузочный и выгрузочный люки 3, 4, внутри корпуса установлен рабочий орган 5 с рабочими элементами 6, 7 в виде ножей и бил, вал опирается на подшипниковые споры 8 и приводится в движение электродвигателем 9 через муфту 10.

В свою очередь, выполнение измельчителя с вертикально установленным ротором отличается по набору конструктивных элементов наличием клиноременной передачи и отсутствием муфты, имеющих общую позицию 10. Принцип работы обоих агрегатов практически аналогичен. Он заключается в подаче сырьевой массы через загрузочный люк 3 в рабочую зону с быстро вращающимся на роторе 5 рабочими элементами 6, 7, которые интенсивно измельчают поступающий материал. Измельченный до требуемой величины продукт удаляется из рабочего пространства через люк 4.

Анализ представленных (см. рисунки 8.11, 8.12) конструктивных решений наклонной и вертикальной установок ротора применительно к многолезвийным измельчителям явственно показывает преимущество первой схемы, их перечисление было сделано ранее. К сказанному следует добавить, что использование эффекта многолезвийности позволяет не только существенно повысить эффективность процесса измельчения, но и обеспечить максимально высокий срок работы режущих элементов (фрез) при одновременном сокращении числа стадий измельчения.

### 8.3 Технологические аппараты ударно-вибрационного действия

*Рессорно-стержневые измельчители.* В рессорно-стержневых аппаратах в качестве основных рабочих органов или элементов используются дугообразно изогнутые прутки или рессоры, с помощью которых осуществляется процесс измельчения материала. Непосредственно основная стадия измельчения материала осуществляется дугообразно изогнутыми цилиндрическими стержнями или рессорами, которые связаны с виброприводом. Конструкция может быть исполнена в двух вариантах: 1) два параллельных между собой ряда стержней, один из которых совершает перемещение, соударяются друг с другом; 2) используется один ряд стержней, который совершает периодические удары по неподвижному лоткообразному основанию. В обоих вариантах реализуется измельчение по методу воздействия на единичное зерно [102; 169].

Схема рессорно-стержневого измельчителя, осуществляемого преимущественно одноактным механизмом разрушения частиц материала между двумя параллельными рядами стержней, из которых верхний является подвижным, показана на рисунке 8.13, а вариант выполнения и установки рядов стержневых элементов — на рисунке 8.14.

Рессорно-стержневой измельчитель состоит из основания 1, рабочего оборудования 2 в виде наборов стержневых элементов, загрузочного 3 и выгрузочного лотков 4, подвижного коромысла 5, установленного в шарнире 6 на стойке 7 и снабженного дебалансным вибратором 8, причем консольная часть коромысла опирается на амортизатор 9. Рабочее оборудование 2 включает в себя подвижную 10 и неподвижную 11 кассеты, собранные из стержневых элементов 12 и 13 соответственно.

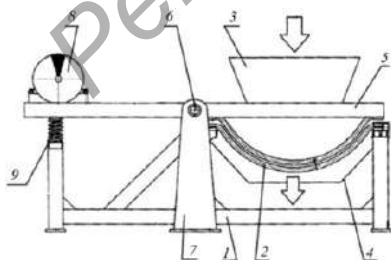


Рисунок 8.13 — Схема рессорно-стержневого измельчения

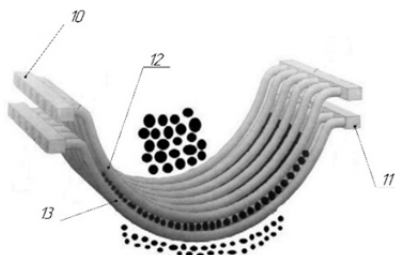


Рисунок 8.14 — Выполнение рабочих органов измельчения

Процесс разрушения частиц материала осуществляется путем высокочастотных перемещений стержневых элементов 12 неподвижной cassette 10 и попадания между периодически изменяющимися между этими элементами исходных частиц, что приводит к интенсивному измельчению. Колебательный механизм функционирует благодаря работе дебалансного вибратора 8, загрузка подлежащего измельчению продукта осуществляется через лоток 3, а выгрузка полученной крупки — из лотка 4.

Рессорно-стержневой измельчитель в полной мере отвечает условиям адаптивности и может быть использован для тонкого дробления, грубого помола, селективной переработки и механоактивации материалов преимущественно минерального происхождения.

*Валковый щёточно-щёковый измельчитель.* Повышение эффективности переработки анизотропных и сложных по составу и свойствам материалов может быть реализовано с помощью совместной работы щёточного валка и подвижной щеки, образующей сходящееся серповидное пространство и способствующей активной подаче кусков исходного продукта в зоны разрушения [109; 175]. Вариант выполнения измельчителя на основе такого подхода представлен на рисунке 8.15.

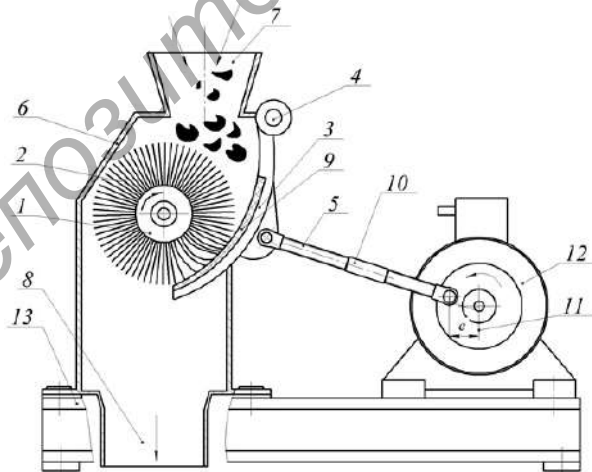


Рисунок 8.15 — Схема валкового щёточно-щёкового измельчителя

Агрегат, установленный на раме 13, включает в себя два основных рабочих звена — вращающий ротор 1 с проволочными элементами 2 и вибрирующую щёку 3, охватывающую часть наружной поверхности ротора. Щёка 3 своим верхним концом смонтирована на оси 4 и в центральной части связана с толкателем 5, который сообщает ей высокочастотные колебания с помощью эксцентрика 11, установленного на валу электродвигателя 12. Рабочее оборудование смонтировано в корпусе 6, имеющем люки 7, 8 для загрузки и выгрузки материала. Вся конструкция закреплена на раме 13.

Дополнительные колебания щеки 3 позволяют существенно активизировать рабочий процесс путём увеличения количества частиц, поступающих непосредственно в зоны разрушения между ротором 1 и поверхностью щеки 3. Управление процессом обеспечивается регулирующим устройством 10. Качательные движения щеки дополнительно подают исходный материал на торцы проволочных элементов, способствуя значительному улучшению процесса измельчения. Рабочую поверхность щеки при этом желательно выполнять рифлёной.

Адаптивный характер воздействия на частицы исходного материала может изменяться в широких пределах путём управления кинематикой рабочих органов, геометрическими параметрами рабочей камеры, а также степенью заполнения рабочего пространства кусками материала различных размеров и форм [50; 175].

#### **8.4 Агрегат для утилизации автомобильных шин по методу микрофрезерования**

Суть предлагаемого технического решения проблемы повышения эффективности тонкого измельчения изношенных автомобильных шин заключается в создании управляемого механизма единичного акта разрушения и организации обработки конкретных шин по методу одностадийного иглофрезерного измельчения каждой из них [50]. Графически это поясняется схемой, приведённой на рисунке 8.16, где показана закреплённая на вращающемся шпинделе 1 автомобильная шина 2, охватываемая по периферии измельчающими поворотными головками 3.

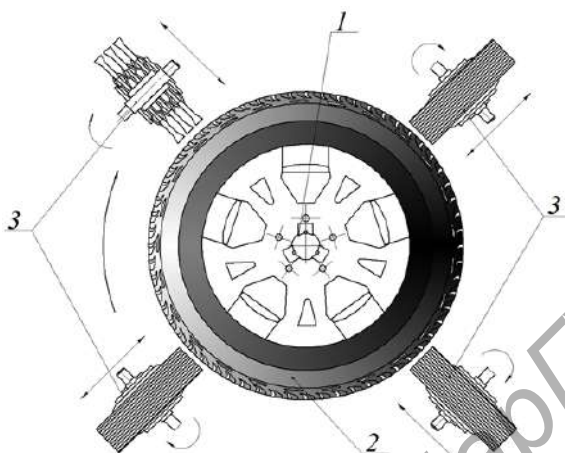


Рисунок 8.16 — Схема измельчения автомобильных шин по методу микрофрезерования

Рабочий процесс измельчения по данному методу производится следующим образом. Автомобильная шина 2 жёстко закрепляется бортовыми кольцами на шпинделе 1 и приводится в медленное вращение. Измельчающие головки 3 подводятся к периферийной части шины и производят её обработку путём микрофрезерования. Обрабатывающие головки 3, имеющие режущие элементы соответствующей конструкции (иглы, стержни, абразивные ленты, шипы, резцы и др.), установлены на раме станка под определёнными углами, что обусловлено необходимостью измельчать резиносодержащую часть шины без измельчения металлокорда, входящего в брекеты. По мере измельчения обрабатывающие головки 3 перемещаются к центру шины 2 непосредственно до бортовых колец. После этого процесс завершается, головки 3 возвращаются в исходное положение, бортовые кольца снимаются со шпинделя 1 и рабочий цикл повторяется для новой установленной на шпинделе станка шины. Обработка шин подобным способом может производиться как в ручном режиме, так и в автоматическом.

Станок для микрофрезерования предусматривает широкую универсальность и способность перерабатывать различные по размерам шины без переналадки. В конструкцию станка для измель-

чения автомобильных шин кроме перечисленных агрегатов будут входить: устройства для загрузки и установки шин, механизмы перемещения обрабатывающих головок, устройство для удаления измельчённого продукта. Все эти элементы должны быть размещены в герметичной камере для исключения пыления. Главное условие эффективного измельчения шин — жёсткое закрепление их на шпинделе таким образом, чтобы все составные элементы сохраняли требуемое положение относительно шпинделя.

Имеются и другие варианты жёсткого закрепления изношенных автомобильных шин на поворотных узлах станка для их измельчения, которые позволяют создать локальный фронт измельчения при стационарном положении вращающихся рабочих головок, т. е. рабочих органов. При этом процесс измельчения может происходить непрерывно с автоматической загрузкой и выгрузкой. Эти решения находятся в стадии разработок.

Концепция переработки шин с одной установки полностью соответствует технологии работы станков с числовым программным управлением и при проектировании нового оборудования будет использована максимально полно. Основной задачей и главной проблемой, которую предстоит решить, является создание измельчающего модуля для микрофрезерования (микрорезания). В этом направлении есть ряд авторских наработок. В основу заложен принцип иглофрезерования шёточным рабочим органом и срезания стержневыми элементами микрослоев резиновой массы, что позволяет, создав единый технологический модуль, производить переработку различных конструкций, типов и размеров изношенных автомобильных шин.

### **8.5 Технологические агрегаты на основе прямого использования энергии ветра в качестве движущей силы**

*Ветроагрегат для струйного измельчения.* С практических позиций важно иметь в виду, что энергия ветра может кардинально изменить работу струйной мельницы. Ветроагрегат для струйного измельчения, изображённый на рисунке 8.17, содержит конфузур 1 для концентрации воздушного потока, в горловине которого в цилиндрическом корпусе 2 установлено турбинное колесо 3.

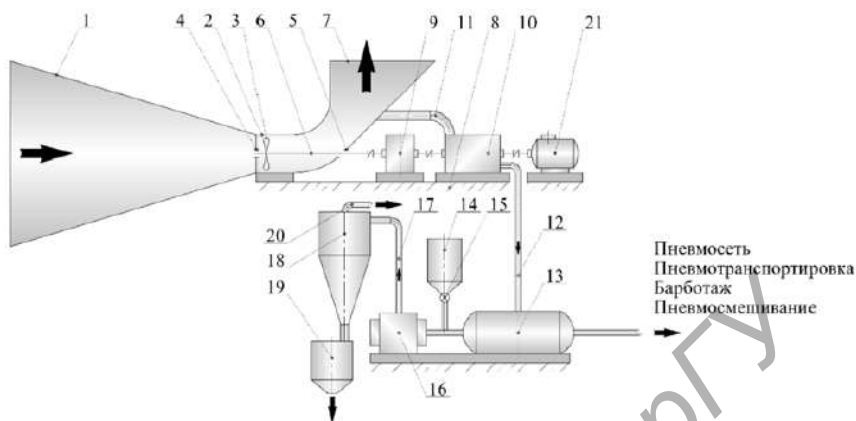


Рисунок 8.17 — Ветроагрегат для струйного измельчения

Ротор 6 турбинного колеса 3 закреплён на опорах 4 и 5, а для выпуска отработанного воздуха предусмотрен патрубок 7. Вся ветроэнергетическая часть смонтирована на несущей конструкции 8, на которой установлены мультипликатор и компрессор 10, кинематически соединённые с ротором 6 турбинного колеса 3. Забор воздуха в компрессор 10 и его подача под давлением в систему измельчения осуществляются через патрубок 11, соединённый с патрубком 7 для выпуска отработанного после турбинного колеса 3 воздуха и через напорный трубопровод 12. Турбинное колесо 3 связано с компрессором 10 с помощью мультипликатора 9.

Технологическая цепь струйного измельчителя включает в себя ресивер 13, бункер 14 с исходным материалом, подлежащим измельчению, питатель 15, струйную мельницу 16, отводящий трубопровод 17, осадительную камеру 18, выходную трубу 20 для удаления отработанного газового агента и бункер для материала 19. Встроенная в состав оборудования ветроагрегата обратимая электромашинка 21 обеспечивает устойчивую работу всей установки, выполняя функции электродвигателя привода компрессора при недостаточной скорости ветра и генератора электрического тока в случае повышенной скорости ветра или неполной загрузки струйной мельницы [105].

На наш взгляд, в качестве ветродвигателя в подобных конструкциях лучше всего использовать не турбинное колесо, а горизонтальный ветроротор, который удобно монтировать на промышленных объектах непосредственно в зоне проведения технологических процессов. При этом ряд аппаратов для тонкого и сверхтонкого помола, например, вибрационных, бисерных, пружинных, молотковых и дру. можно непосредственно соединять с быстроходным валом. Наиболее целесообразно использовать подобный подход для работы мельниц с очень длительным циклом помола, которые мало чувствительны к колебаниям потоков ветра. Лучше всего этим условиям соответствуют вибрационные мельницы. Если аппараты для помола располагать непосредственно на выходном валу ветродвигателя, то главным недостатком такого подхода следует считать установку мельницы на соответствующей высоте, но для конфузорных установок этот фактор может быть минимизирован.

*Многоцелевой ветроагрегат с тросовым приводом рабочего оборудования.* В качестве одного из вариантов использования такого оборудования представим установку для вибрационного помола материалов (рисунок 8.18), которая состоит из лопастей 1, мультипликатора 2, главного подшипника 3, ступицы 4 и гондолы 5. На выходном валу мультипликатора 2 закреплён эксцентрик 6 с шарнирно смонтированной на нём серьгой 7 с тросом 8, который своим нижним концом связан с подвесом 12 вибромельницы 11. Гондола 5 установлена на поворотном устройстве 9 мачты 10, а вибромельница 11 опирается на амортизаторы 13, 14 и имеет устройства 15, 16 для загрузки и выгрузки материала соответственно.

Принцип действия установки сводится к приданию тросу 8 возвратно-поступательных перемещений за счёт вращающегося эксцентрика 6. В качестве возвратного механизма в процессе работы вибромельницы 11 выступают пружинные амортизаторы 13, 14. Процесс измельчения материала происходит в рабочей камере мельницы посредством многократных воздействий мелкощих тел на частицы исход-

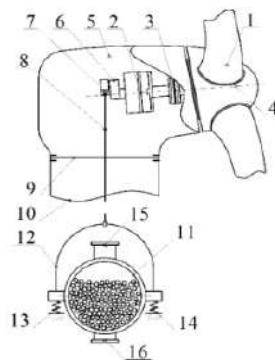


Рисунок 8.18 — Установка с тросовым приводом от ветроагрегата для вибропомола материалов

ного продукта. Характер этих колебаний: вертикальные, направленного действия, частота их равна частоте вращения выходного вала мультипликатора, а амплитуда — двойной величине эксцентриситета оси эксцентрика относительно оси выходного вала мультипликатора [200].

Выбор вибромельницы в качестве объекта использования тросового привода для передачи энергии от ветродвигателя на рабочее оборудование обусловлен тем, что такие машины предназначены для тонкого и сверхтонкого помола, в том числе до получения значительной доли наночастиц, имеют длительный период времени от загрузки до выгрузки материала, а управление их работой удобно автоматизировать, например, по счётчику интенсивности процесса виброколебаний.

В ряде случаев, исходя из требований кинематики движения, целесообразно использовать двухтросовый привод. Пример его реализации иллюстрируется рисунком 8.19, на котором показано, что крутящий момент от главного вала 1 передаётся на мультипликатор (редуктор) 2, выходной вал 3 которого имеет два рабочих конца с закреплёнными на них эксцентриками 4, 5 и шарнирно подвешенными тягами 6, 7. Установка эксцентриков 4, 5 в противофазах вращения позволяет исключить из конструкции возвратные механизмы, улучшить условия работы агрегата в целом и повысить его энергетическую эффективность.

Ветроагрегаты с тросовым приводом, по нашему мнению, могут быть использованы для распиловки древесины, подъёма воды, например, при её откачке из карьеров, перемешивания суспензий взамен барботажа в вертикальных ёмкостях и во многих других направлениях. Компрессорная генерация энергии может иметь очень широкое применение, но в ней много нерешённых проблем, в том числе главная — сам компрессор, который должен быть разработан под новые условия работы.

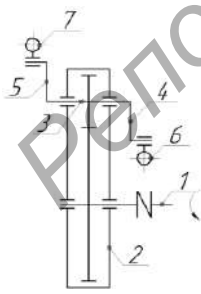


Рисунок 8.19 — Схема механизма для двухтросового привода рабочего оборудования

Разработанные варианты прямого использования энергии ветра в технологических процессах охватывают только некоторую часть из возможных направлений практического использования этого важного направления энергосбере-

жения. При правильном выборе объекта для внедрения разработанного оборудования можно ожидать, что его эффективность будет на 20...30 % выше по сравнению с известными ветроагрегатами. Это обусловлено фактом сокращения цепочки преобразований энергии при передаче её от ветродвигателя непосредственно потребителю, исключением из состава оборудования ряда сложных и дорогостоящих узлов и агрегатов (генераторов, инверторов, токосъёмников и др.) [105; 200].

Нельзя обойти стороной ряд сложных задач, которые при этом следует решить. Первой из них нужно считать привязку технологического объекта внедрения к стационарному ветроагрегату. Второй по важности является задача привязки характеристик реальных потоков ветра к технологическим условиям производства, использующего новый ветроагрегат. Кроме того, потребуется спроектировать надёжные конструкции ветроагрегатов, создать системы управления и скорректировать их совместную работу в составе технологических комплексов.

## **9 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ НА ОСНОВЕ АППАРАТОВ АДАПТИВНОГО ДЕЙСТВИЯ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**

### **9.1 Промышленное оборудование и комплексы на основе аппаратов адаптивного действия**

*Силикатный завод нового поколения.* На базе АО «Пресс» (Запорожье) в 1989—1992 годах был спроектирован и построен завод по производству 60 млн штук силикатного кирпича в год. Выполнение всех массоподготовительных операций базировалось на аппаратах адаптивного действия. Все исходные научно-технические задачи решались:

- а) применением с позиций физико-химической механики мокрой технологии ввода известковой части — известкового молока;
- б) использованием оборудования, способного производить комплексную переработку сырьевой массы и обеспечивать нужные дисперсность и однородность;
- в) реализацией эффекта механоактивации в процессе массоподготовки.

Традиционный вещественный набор компонентов не изменялся, но приготовление формовочной смеси проводилось на известковом молоке, получаемом путем диспергирования негашеной извести вместе с водой в специальном пружинном диспергаторе [176].

Общее представление о реализации нового подхода даёт технологическая схема, изображенная в сокращённом варианте на рисунке 9.1. Изначально было решено отказаться от шаровой мельницы как наиболее энергоёмкого агрегата. Её функции были возложены на два последовательно работающих аппарата — молотковую дробилку с вертикальным ротором и пружинный смеситель-активатор [172; 176]. Учитывая высокую дезинтеграторную и смеобразовательную способности этого оборудования, а также полагая, что механоактивировать необходимо все составляющие, обработке подвергали все материалы формовочной массы в полном объеме, в том числе совместно.

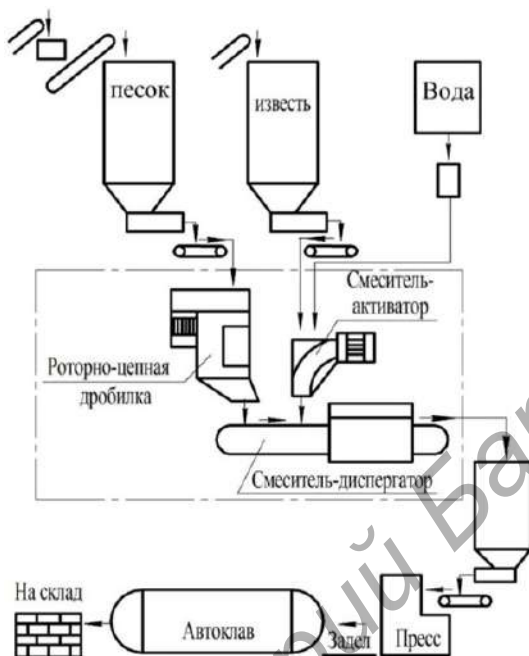
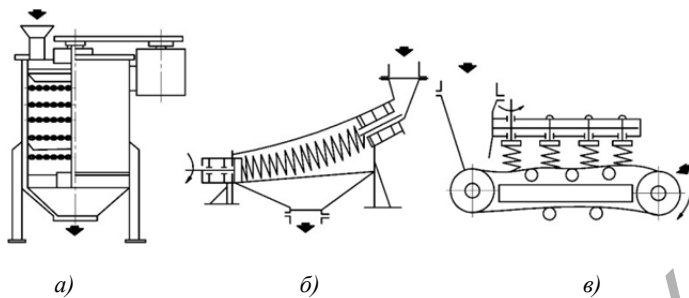


Рисунок 9.1 — Технологическая схема производства силикатного кирпича

Представление о конструкциях нового оборудования дают схемы этих устройств, приведенные на рисунке 9.2. Пояснений требует, на наш взгляд, только схема пружинного смесителя-диспергатора, представляющего собой установленные над движущейся лентой транспортера параллельными рядами пружинные рабочие органы, связанные с приводом [180]. Общие виды базовых промышленных образцов изображены на рисунках 9.3—9.5. Смесеприготовительное оборудование хорошо взаимодействует с оригинальным гидропрессом, оснащенный ультразвуковой головкой, который разработан специалистами Центральной научно-исследовательской лаборатории ПО «Вост. ГОК» (Желтые Воды Днепропетровской обл.). Производительность каждой из двух технологических линии по формовочной смеси составляет 40...60 т/ч, а по прессу — 20...30 т/ч. Производительность пружинного смесителя-диспергатора по известковому молоку — 10...12 м<sup>3</sup>/ч.



*a* — молотковая дробилка; *б* — смеситель-диспергатор;  
*в* — смеситель-активатор

Рисунок 9.2 — Схемы оборудования  
 для приготовления формовочных масс



Рисунок 9.3 — Молотковая  
 дробилка с вертикальным  
 ротором

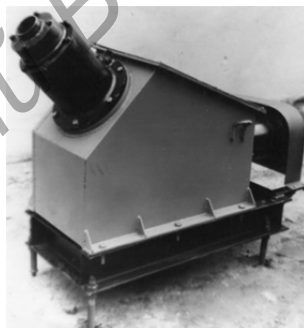


Рисунок 9.4 — Смеситель-  
 диспергатор



Рисунок 9.5 — Пружинный  
 смеситель-активатор

В целом разработанная технология, обкатанная на оборудовании промышленного класса, позволила получить силикатный кирпич марки М400 с морозостойкостью МРЗ 50 при расходе извести на 30...40 % меньше. Время автоклавной обработки (изотермическая выдержка) сократилось на 20...25 %, капитальные затраты на строительство нового комплекса снижаются в 1,5...2,0 раза. При этом удельные приведенные затраты снижаются на 20...25 %, а себестоимость силикатных изделий — на 25...28 % [172; 176].

К сожалению, из-за развала СССР и экономического банкротства 1992—1993 годов силикатный завод в Запорожье, построенный по технологии, не имеющей аналогов в мире, был разорён и прекратил своё существование. Реализация предложенной концепции производства до настоящего времени в необходимом объеме не проводилась из-за отсутствия финансирования.

*Агрегат для приготовления активированных смесей производства изделий из ячеистого бетона.* Базовым агрегатом в технологической схеме производства изделий из ячеистого бетона автоклавного твердения является виброгазобетонмешалка типа СМС-40, которая освоена промышленностью свыше 40 лет назад и с тех пор не усовершенствовалась. Особенность этого аппарата в том, что он осуществляет процесс формирования бетона до автоклавной обработки, которая в дальнейшем определяет основные показатели качества изделий. Уникальность процесса состоит как в том, что необходимо получить однородную смесь на основе компонентов с очень большим соотношением массовых долей, так и в том, что время обработки технологически ограничено (3...5 мин). Механизм получения однородной смеси требует как минимум реализации следующих условий: равномерного распределения и желательно на микроуровне всех компонентов, особенно алюминиевой пудры и извести, диспергирования и домола ячеисто-бетонной смеси для обновления поверхности в целях интенсификации их взаимодействия путем втирания в кремнеземистую матрицу.

Подобная задача успешно решается путем оснащения виброгазобетонмешалок пружинными активаторами, которые представляют собой дугообразно изогнутые цилиндрические пружины, установленные в верхних опорах и одним концом связанные с приводом вращения. В нижней части концы пружин свободно опираются на башмаки. При соприкосновении их витков в зонах мини-

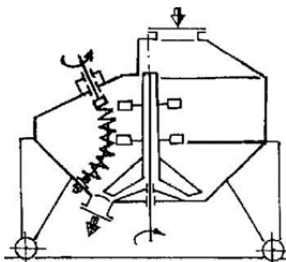


Рисунок 9.6 — Виброгазобетономешалка со встроенными пружинными активаторами

мального радиуса изгиба и они превращаются в энергонапряженные мельницы, способные существенно интенсифицировать рабочий процесс приготовления ячеистобетонной смеси [203]. Конструктивная схема модернизированной виброгазобетономешалки приведена на рисунке 9.6, а ее техническая характеристика — в таблице 9.1.

Применение пружинного активатора позволяет повысить показатели физико-механических свойств изделий из ячеистого бетона по ГОСТ 25485-89. Для марки бетона по средней плотности D600 наблюдается устойчивый переход из класса прочности B2,5 (30 кгс / см<sup>2</sup>) в класс B3,0...B3,5 (36...40 кгс / см<sup>2</sup>). При активации газобетонной смеси 4 мин средней ККК (ККК<sub>ср</sub>) равен 130. При выпуске марки бетона по средней плотности D500 ККК повышается до 150. Наличие эффекта механоактивации способствует снижению нормативного расхода тепла на автоклавную обработку 1 м<sup>3</sup> ячеистого бетона на 7 % или 9,5 мегакалорий, что эквивалентно 1,6 кг условного топлива. При годовой программе 100 000 м<sup>3</sup> / год на ОАО «Оршастройматериалы» экономия составляет более 150 т условного топлива в год [198; 203].

Т а б л и ц а 9.1 — Техническая характеристика модернизированной виброгазобетономешалки

Наименование параметра	Значение
Обрабатываемый материал	Ячеисто-бетонная смесь
Объем загружаемого материала, м <sup>3</sup>	3
Число пружинных активаторов, шт.	2...4
Мощность привода одного активатора, кВт	2,2
Достижимый конструктивный коэффициент качества (ККК) ячеистого бетона за счет активации, %	130...150
Габаритные размеры, Д × Ш × В, мм	5 065 × 4 500 × 4 100
Масса, кг	6 000

Накопленный опыт проектирования и эксплуатации пружинных механоактиваторов в ОАО «Оршастройматериалы» убедительно показывает эффективность такого типа оборудования. Сегодня созрела необходимость и имеются реальные возможности создания принципиально нового пружинного механоактиватора, который по своему техническому уровню будет превосходить лучшие мировые образцы и при этом получать материал с ККК до 200 и более.

*Комплект оборудования для производства окрашенного силикатного кирпича.* Принцип действия основного агрегата основан на введении сухого пигмента в силикатную массу в поле высокоскоростного действия молоткового измельчительного механизма. В качестве главного смесительно-диспергирующего аппарата использована молотковая дробилка с вертикальным ротором, оснащенным двумя ярусами узких бил с вваренными в их торцы пластинками из твердого сплава [166; 172]. Диаметр рабочей камеры — 750 мм, частота вращения ротора — 1 200 об./мин, мощность приводного электродвигателя — 22,5 кВт, производительность по сырьевой массе — до 20 т/ч. Общий вид молоткового смесителя-диспергатора представлен на рисунке 9.7.

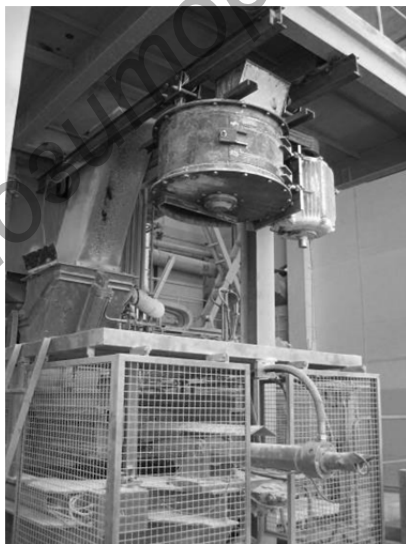
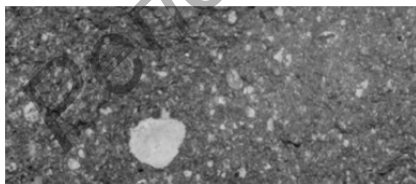


Рисунок 9.7 — Общий вид молоткового смесителя-диспергатора

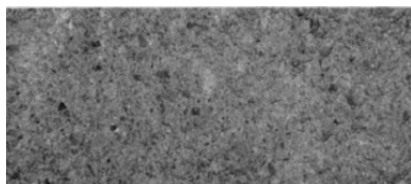
Заслуживает быть отмеченной установка смесителя-диспергатора на рельсовом подвесе между бункером подачи формовочной массы и приемным бункером гидравлического пресса. Это пример адаптивного решения формирования цепей оборудования, когда для перехода на новый вид продукции достаточно переместить один агрегат относительно другого и повернуть лотки для подачи сырьевой массы. Такая компоновка, реализованная на ЗАО «Могилевский КСИ», повлияла на эффективность работы оборудования, о чем можно судить по срезам цветного силикатного кирпича, который изготавливался на смеси, приготовленной в двухвальном лопастном смесителе (рисунок 9.8, *а*) и в молотковом смесителе-диспергаторе (см. рисунок 9.8, *б*).

Технология приготовления окрашенной формовочной массы требует предварительного смешивания исходной сырьевой массы и красителя в двухвальном лопастном смесителе. В такой технологии дальнейшее повышение качества получаемых изделий и экономию дорогостоящего красителя можно обеспечить путем реализации мокрой технологии диспергирования красителя с водой, совместив этот процесс с доувлажнением сырьевой массы после ее гашения в силосах. Наилучшим образом для этого подходит пружинная мельница непрерывного действия [198].

*Отделение помола мела для получения сырьевой муки.* При помоле влажного мела в ОАО «Белорусский цементный завод» используются аэрофолы диаметром 9 м и молотковые однороторные дробилки диаметром 1,75 м.



*а)*



*б)*

*а* — смесь приготовлена в двухвальном лопастном смесителе;  
*б* — смесь приготовлена в молотковом смесителе-диспергаторе

Рисунок 9.8 — Срезы силикатного окрашенного кирпича

Основная проблема при их эксплуатации заключается в очень высокой энергоёмкости процесса и недостаточной производительности, что связано с несовершенством работы в первую очередь молотковой дробилки. Первопричиной такого положения является низкая эффективность разрушения малопрочных частиц мела с преобладающим размером менее 10...12 мм массивными литыми билами, которые работают в режиме вентилятора. Следствием этого является кратность циркуляции материала 260...290 % и необходимость периодического включения второго аэрофола для обеспечения требуемой производительности линии.

Рабочие органы в виде бил имеют большие ударные поверхности, что способствует созданию на их поверхности воздушных потоков, которые в процессе измельчения сдувают частицы мела и не обеспечивают требуемой эффективности разрушения. Для устранения этого недостатка предлагается модернизировать молотковую дробилку путем выполнения её ротора из набора щёток соответствующей конструкции, монтируемых на кронштейнах и обеспечивающих перекрытия рабочего пространства дробилки. Диаметр элементов таких щёток должен быть не менее 5...8 мм, а линейная скорость в момент удара — более 40 м/с. Обладая огромным количеством ударных элементов, которые будут создавать необходимые для разрушения частиц напряжения, снижающих до минимума негативное влияние воздушных потоков. Схема набора оборудования отделения помола мела приведена на рисунке 9.9.

Новым в составе оборудования является только щёточная дробилка ударного действия, которая повышает степень измельчения мела, что существенно снижает кратность циркуляции обрабатываемого продукта. При таком ведении процесса мощность дымососа можно уменьшить в 1,5...2,5 раза и обеспечить требуемую производительность линии работой одного аэрофола. В пересчёте на условное топливо суммарная экономия только энергоресурсов при модернизации отделения помола мела может составлять не менее 10 000 т условного топлива в год.

*Оборудование для измельчения и сушки мела в производстве извести.* Производство извести с использованием влажных мелов связано с огромным потреблением энергии, прежде всего на обжиг, доходющим до 170 и более килограмм условного топлива (кг у. т.) на 1 т готового продукта.

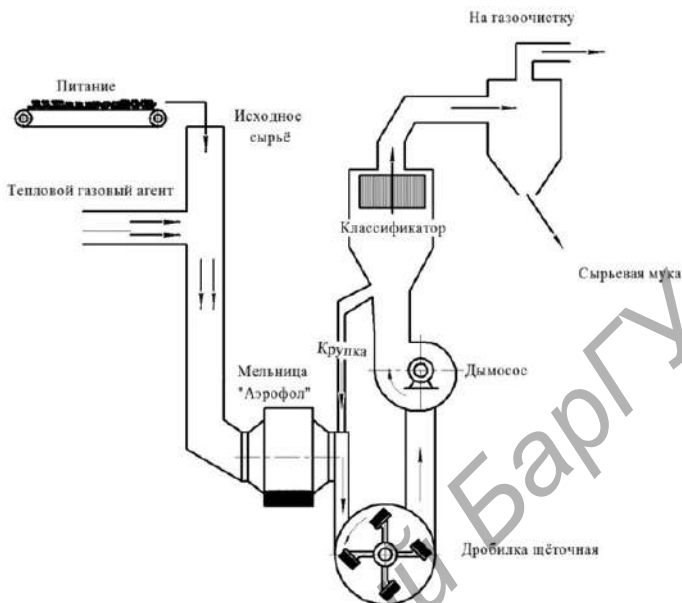
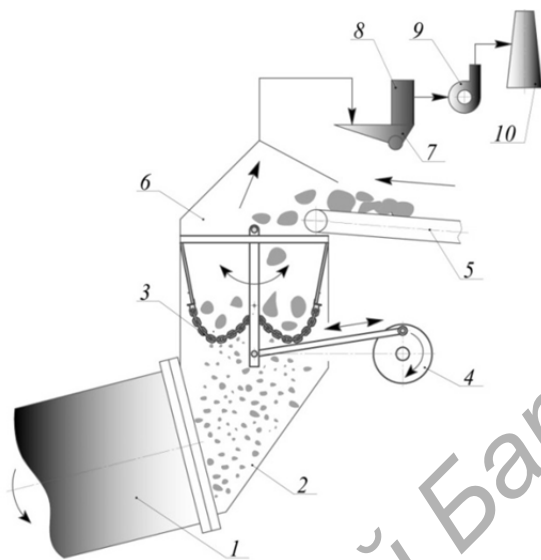


Рисунок 9.9 — Схема набора оборудования отделения помола мела

Поступающий на обжиг карьерный мел имеет влажность в среднем порядка 25 %, его сушка требует 70...80 кг у. т. из расчета необходимости 3 кг у. т. на испарение 1 % влаги, что характеризует этот процесс как крайне неэффективный и объясняется сложностью вывода жидкой фазы из капиллярно-пористой структуры крупнокускового мела [208; 246].

Имеющийся потенциал экономии топлива при сушке мела может быть реализован на основе использования тепла отходящих газов из вращающейся печи, имеющих температуру 150...170 °С. Для увеличения поверхности теплообмена и влагоудаления наилучшим образом подходит цепной агрегат, описанный подробно в главе 3, имеющий развитую рабочую поверхность, высокую степень измельчения сырьевых карьерных материалов и хорошо вписываемых в технологические цепи действующих производств. Компонентная схема набора оборудования для измельчения и сушки мела в производстве извести приведена на рисунке 9.10.



1 — вращающаяся печь; 2 — пыльная камера; 3 — цепной агрегат; 4 — привод цепного агрегата; 5 — ленточный конвейер; 6 — газоход; 7 — пылесборник; 8 — электрофильтр; 9 — дымосос; 10 — труба

Рисунок 9.10 — Набор оборудования для измельчения и сушки мела в производстве извести

Технологический процесс измельчения и сушки на основе такого набора оборудования происходит следующим образом. После розжига и запуска печи 1 последовательно включают в работу цепной агрегат 3, производящий измельчение материала, и ленточный конвейер 5, обеспечивающий равномерное питание агрегата крупнокусковым влажным мелом. Приводимые в интенсивные колебательные перемещения волновые цепные завесы цепного агрегата 3 своими рабочими элементами разрушают куски мела, создавая своеобразный кипящий слой, через который с помощью дымососа 9 просасываются отходящие газы. Измельченные до определенной крупности куски мела просыпаются между звеньями цепных завес и через пыльную камеру 2 ссыпаются во вращающуюся печь 1. В процессе прохождения отходящих газов через пыльную камеру 2 и рабочие зоны цепного агрегата 3, где частицы измельченного

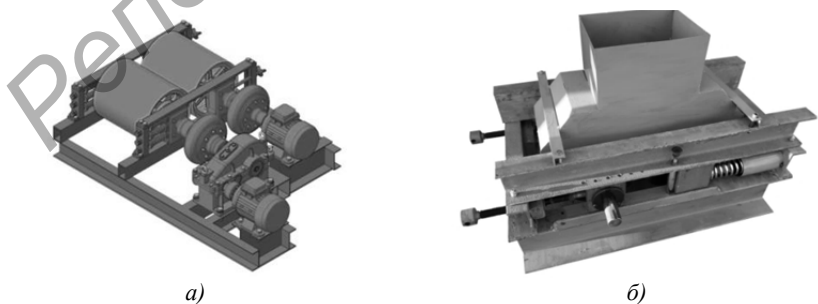
мела, достаточно равномерно распределенные внутри них и имеющие максимально развитую поверхность, отдают значительную часть влаги, которая в виде паропылегазовой смеси с помощью дымососа 9 удаляется из рабочей зоны.

Пылеватые частицы осаждаются с помощью электрофильтра 8, а очищенный газовый состав выбрасывается в атмосферу через трубу 10.

Оценка реальных возможностей разработанного способа мас-соподготовки показывает, что при достижении съема влаги 7...8 %, т. е. с 25 % до 17...18 %, при объемах переработки 250 тыс. т в год и среднестатистическом расходе удельного топлива в количестве 3 кг у. т. на испарение 1 % влаги из тонны сырья его экономия составит 5 250...6 000 т у. т. [208; 211]. Такая величина экономии соответствует комплексу по производству извести ОАО «Белорусский цементный завод» (г. Климовичи Могилевской обл.).

Особо следует отметить, что использование цепных агрегатов для комплексного проведения процессов измельчения и сушки сырьевых материалов на цементных заводах сухого способа производства позволяет экономить не менее 20...25 кг у т при переработке 1 т влажных мелов.

*Вибровалковый агрегат для переработки строительных отходов.* Разработанное оборудование предназначено для второй стадии дробления элементов бетонных конструкций, образующихся при сносе объектов промышленного и коммунального назначения. Важнейшей задачей при этом является получение максимального выхода классов сортового щебня кубовидной формы. Изготовленный для этих целей опытный образец вибровалкового измельчителя представлен на рисунке 9.11.



а)

б)

а — 3D-модель; б — опытный образец

Рисунок 9.11 — Вибровалковый измельчитель

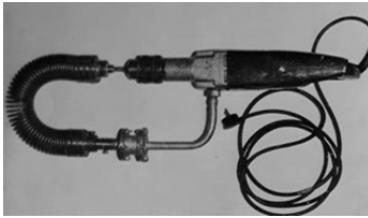
В таблице 9.2 даны технические характеристики опытного и промышленного (согласно технического проекта) агрегатов.

Разработанные конструкции вибровалкового измельчителя, которые обеспечивают эффективное измельчение строительных отходов, имеют хорошие перспективы использования для измельчения цементного клинкера, где их непрерывно-циклический режим единичных актов воздействия на обрабатываемый материал разрушает спрессованную ленту (корж), который образуется при работе пресс-валкового измельчителя, а также в технологиях селективной переработки горнорудного сырья на предприятиях прежде всего цветной металлургии [190].

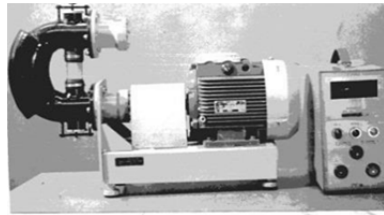
Описанный состав оборудования адаптивного действия охватывает далеко не все их конструкции и типоразмерные ряды. Наиболее многочисленную их группу составляют пружинные аппараты, которые насчитывают более 60 вариантов различных типоразмеров и исполнений. Приведем некоторые варианты разработки оборудования и дадим им краткую техническую характеристику. Некоторая часть пружинных аппаратов представлена на рисунке 9.12.

Т а б л и ц а 9.2 — Основные технические характеристики вибровалкового измельчителя

Основные характеристики	Опытный образец	Промышленный образец
Производительность, т / ч	1,5...2,5	20...50
Размеры валков, м:		
диаметр	0,25	0,6
длина	0,2	0,6
Величина эксцентриситета, м	$3 \times 10^{-3}$	$(2...5) \times 10^{-3}$
Зазор между валками, м	$(2...8) \times 10^{-3}$	$(5...15) \times 10^{-3}$
Частота колебаний, Гц	25	25
Окружная скорость, м / с	0,8	1,5
Мощность привода, кВт	$2 \times 3$	$2 \times 15$
Габаритные размеры, м:		
длина	1,7	2,5
ширина	1,2	1,8
высота	1,0	1,6
Масса, кг	150	1 200



Механизированный инструмент  
(соответствует схеме 4  
таблицы 5.1 главы 5)



Мельница для наработки  
партий материалов (соответствует  
схеме 1 таблицы 5.2 главы 5)



Мельница лабораторная  
(соответствует схеме 2  
таблицы 5.1 главы 5)



Мельница для измельчения  
зерна на комбикорм (соответствует  
схеме 1 таблицы 5.2 главы 5)



Микромельница для подготовки  
проб к анализу (соответствует схеме  
2 таблицы 5.1 главы 5)



Мельница для приготовления  
цементных коллоидных клеев  
(соответствует схеме 2  
таблицы 5.1 главы 5)

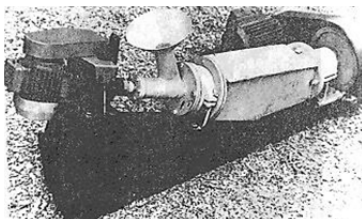
Рисунок 9.12 — Примеры выполнения пружинных аппаратов  
различного назначения



Мельница мокрого помола циркуляционная (соответствует схеме 15 таблицы 5.1 главы 5)



Мельница непрерывного действия (соответствует схеме 1 таблицы 5.2 главы 5)



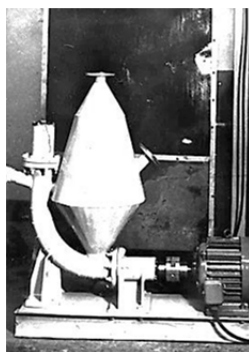
Диспергатор для вязких материалов (соответствует схеме 5 таблицы 5.2 главы 5)



Смеситель-диспергатор планетарный (соответствует схеме 6 таблицы 5.1 главы 5)



Мельница циклического действия (соответствует схеме 2 таблицы 5.1 главы 5)



Мельница с пневмоотбором целевой фракции (соответствует схеме 3 таблицы 5.2 главы 5)

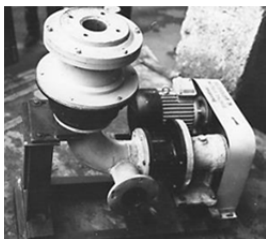
*Продолжение рисунка 9.12*



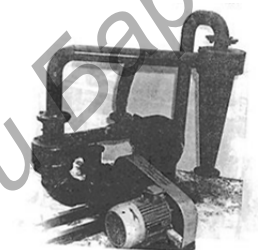
Мельница планетарная  
для жидкотекучих материалов  
(соответствует схеме 6  
таблицы 5.1 главы 5)



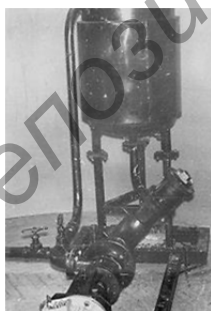
Мельница мокрого помола  
(соответствует схеме 12  
таблицы 5.1 главы 5)



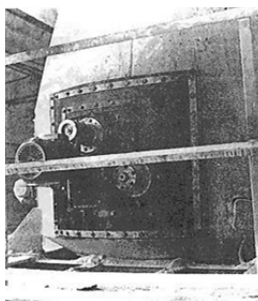
Мельница для приготовления  
жидких комплексных удобрений  
(соответствует схеме 4  
таблицы 5.2 главы 5)



Мельница со встроенной  
пневмокласификацией  
(соответствует схеме 6  
таблицы 5.2 главы 5)

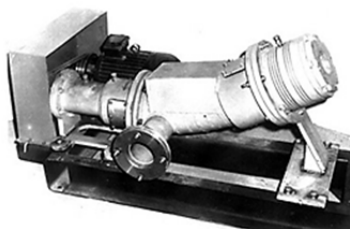


Установка для диспергирования  
лакокрасочных материалов  
(соответствует схеме 14  
таблицы 5.1 главы 5)



Смеситель для получения смесей  
производства газосиликатных изделий  
(соответствует схеме 8  
таблицы 5.1 главы 5)

*Продолжение рисунка 9.12*



Мельница непрерывного действия для жидкотекучих материалов (соответствует схеме 2 таблицы 5.2 главы 5)



Многоцелевой смеситель-активатор непрерывного действия (соответствует схеме 13, 15 таблицы 5.2 главы 5)

*Окончание рисунка 9.12*

Дробилки ударного действия с вертикальным ротором разрабатываются нами с 1991 года и прошли определенный этап развития. За этот период изготовлено более 100 установок, которые успешно эксплуатируются на предприятиях Беларуси, России, Украины, Казахстана. Накопленный опыт их использования для переработки различных материалов показывает высокий технологический потенциал и является предпосылкой для серийного освоения выпуска машиностроительными заводами. Постановка на производство дробилок ударного действия, в том числе с наклонным ротором и с учетом доработки конструкторской документации, может быть осуществлена в течение года. Технические характеристики созданных дробилок приведены в таблице 9.3, а на рисунке 9.13 — примеры выполнения. Исполнение рабочего оборудования в каждом конкретном случае выбиралось исходя из технологических требований и условий эксплуатации. Линейная скорость ударных элементов находится в диапазоне от 25 до 70 м/с в зависимости от физико-механических свойств перерабатываемого материала.

Особую группу технологических машин могут составить цепные агрегаты. Для прогнозирования их развития использован метод аналогий и экспертной оценки технического уровня существующего оборудования, что позволило разработать технические проекты на их типоразмерный ряд, который реально увязан по своему назначению и характеристикам с действующими промышленными комплектами. Технические характеристики разработанных цепных агрегатов приведены в таблице 9.4

318 Таблица 9.3 — Основные технические характеристики дробилок ударного действия с вертикальным ротором

Показатели	Типоразмер					
	ДУ-400	ДУ-750	ДУ-900	ДУ-1000	ДУ-1200	ДУ-1500
Диаметр рабочей камеры, мм	400	750	900	1 000	1 500	1 500
Производительность, т / ч	1...5	5...20	10...50	20...100	30...120	50...150
Число ярусов бил	2...10	2...10	2...10	2...10	2...10	2...10
Число бил на ярусе	2...6	2...6	4...8	4...8	4...8	6...12
Линейная скорость ударных элементов, м / с	25...70					
Максимальная крупность загружаемого материала, мм	20	50	50	60	80	100
Дисперсность готового продукта	ТУ заказчика					
Установленная мощность электродвигателя, кВт	7,5...10	18	30...55	55...90	110...200	150...280
Габариты, мм:						
длина	1 000	1 320	1 700	2 800	1 700	1 900
ширина	600	1 115	1 300	1 400	1 800	2 000
высота	1 600	2 040	2 000	2 850	2 500	3 200
Масса, т	0,18...0,25	0,4...0,6	0,5...0,9	0,6...1,0	1,8...2,5	2,9...4,0



ДУ-400



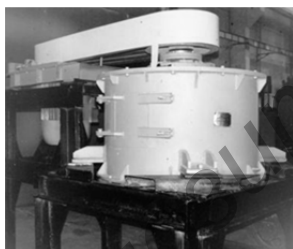
ДУ-700



ДУ-900



ДУ-1000



ДУ-1200



ДУ-1500

Рисунок 9.13 — Примеры выполнения дробилок ударного действия различных типоразмерных рядов

Т а б л и ц а 9.4 — Технические характеристики цепных агрегатов для измельчения влажных материалов

Наименование показателя	СМ-5	СМ-25	СМ-75	СМ-250
Диаметр исходных кусков, $D$ , м	0,3	0,6	1,0	1,5
Диаметр измельченных кусков, $d$ , мм	15	25	35	75

Окончание таблицы 9.4

Наименование показателя	СМ-5	СМ-25	СМ-75	СМ-250
Производительность агрегата, $Q$ , т / ч	5...8	25...30	60...80	250
Влажность материала, $\omega$ , %	15...30	15...30	15...30	13...30
Мощность приводного электродвигателя, $N_{дв}$ , кВт	7,5	28	55	200
Масса агрегата, $M$ , кг	950	2 750	5 200	1 800
Габаритные размеры агрегата, м:				
длина	1,8	2,8	4,0	6,0
ширина	1,5	2,5	3,8	4,0
высота	1,5	2,0	2,5	8,0

Перечень других конструкций аппаратов адаптивного действия и технологических комплексов на их основе можно продолжить. Сюда можно отнести оборудование для тонкого и сверхтонкого помола материалов, мельницы для приготовления жидкотекучих композиций и механоактивации смесевых составов, аппараты для переработки влажного карьерного сырья, сушилки различных типов, дробилки для селективного разрушения, виброуплотнители, грохоты, иглофрезерные установки, питатели-дозаторы, технологические комплексы специального назначения, мобильные агрегаты и т. д.

Часть информации, относящаяся к этому оборудованию, изложена в работах [148; 172; 198; 208; 211; 246].

## 9.2 Новые технологические процессы с использованием аппаратов адаптивного действия

Разумный синтез технологического оборудования и протекающих в нем рабочих процессов является основой для производства широкой гаммы различных материалов и изделий и определяющим фактором инновационного развития всей промышленной системы. Поэтому создание новых технологических процессов, изучение закономерностей и режимов обработки материалов с учетом их физико-механических и технологических свойств и реальная оценка

потенциала повышения эффективности обеспечивают предпосылки для рационального проектирования как отдельных машин и агрегатов, так и их комплексов.

Рассмотрим некоторые примеры разработки и создания новых технологических процессов на основе аппаратов адаптивного действия.

*Технология массоподготовки при производстве силикатного кирпича.* Массоподготовка в технологии производства силикатного кирпича включает в себя несколько основных переделов: помол при приготовлении вяжущей части, т. е. известково-кремнеземистого состава, его гашение в реакторе, итоговое смешивание перед прессованием. О несовершенстве технологии можно судить по крайне несовершенному агрегату — шаровой мельнице, которая весь цикл массоподготовки делает предельно энергозатратным, компоновка оборудования требует больших производственных площадей, а также транспортного и инженерного обеспечения, что существенно увеличивает эксплуатационные затраты.

За основу модернизации этой технологии принята проверенная на практике научная гипотеза [172], согласно которой нужный гранулометрический состав и однородность формовочной смеси можно получить путем совместной обработки всего объема кремнезема и извести в аппаратах адаптивного действия [208; 211]. Реализация такого варианта технологии массоподготовки при производстве силикатного кирпича отличается от описанного в разделе 9.1 способа тем, что помол известково-кремнеземистого вяжущего осуществляется в пружинном многосекционном измельчителе, через который пропускают всю сырьевую массу, а окончательное формирование формовочной смеси производят после гашения извести и доувлажнения в ударно-центробежном аппарате с наклонным ротором.

После прохождения исходных твердых компонентов через пружинный измельчитель с количеством рабочих органов (пружин) от 6 до 8 получается смесь, в которой зерновой состав по крупности соответствует тому составу, который получается при шаровом измельчении. Дополнительное диспергирование обеспечивает хорошую гомогенизацию с одновременной механоактивацией всех компонентов. После прессования готовые изделия соответствуют требованиям ГОСТ 379-79, в частности, по марке (100...300) и по морозостойкости (25...50).

Итоговое снижение расхода электроэнергии на помол и массоподготовку составляет 10...12 кВт · ч / 1 000 шт. условного кирпича. Предлагаемая технология в максимальной степени соответствует реальным возможностям действующих заводов и может быть реализована с минимальными издержками.

*Технология приготовления суспензии сажи для получения синтетических волокон.* Реализация этой технологии осуществлена в отделении приготовления суспензий сажи химико-прядельного цеха производства синтетических волокон № 3 ОАО «Могилевхимволокно». Предшествующая технология основывалась на использовании бисерной мельницы фирмы Draix и характеризовалась высокой энергоемкостью и стоимостью измельчительной гарнитуры. Диспергированию подвергалась суспензия сажи (пигмент) с исходной крупностью 0...50 мкм. Готовый продукт — разбавленная суспензия сажи в этиленгликоле с крупностью частиц менее 2 мкм более 95...97 %. Это обусловлено тем, что при толщине нити 10 мкм размер частиц пигмента не должен превышать 0,2 ее диаметра.

В качестве базового агрегата использовалась пружинная мельница «Млын» модели М19 с мощностью приводного электродвигателя 4 кВт, выполненная по схеме 2 таблицы 5.2 главы 5. Общий вид пружинной мельницы приведен на рисунке 9.14, а ее техническая характеристика — в таблице 9.5.

Конструктивная особенность пружинной мельницы заключается в том, что она по сравнению с бисерной мельницей может работать на более высокой концентрации суспензии, причем с ее увеличением эффективность помола возрастает, так как в каждый момент большее количество частиц подвергается диспергированию. За счет этого уменьшается время обработки суспензии и время работы сопутствующего агрегата — гомогенизатора (дисольвера).

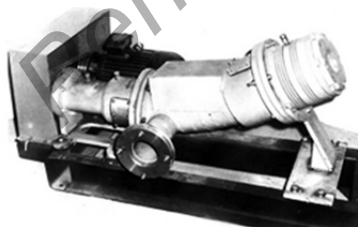


Рисунок 9.14 — Общий вид пружинной мельницы «Млын» модели М19

Отработан полный технологический цикл производственной эксплуатации пружинной мельницы. Произведено 75 партий суспензии общим объемом 900 т с учетом разбавления. На это потребовалось 1 200 ч непрерывной работы и 30 720 кВт · ч электроэнергии.

Т а б л и ц а 9.5 — Техническая характеристика пружинной мельницы «Млын» модели М19

Наименование параметра	Значение
Размер частиц загружаемого материала, мм	Менее 3
Достижимая конечная крупность частиц, мкм	Менее 5
Концентрация суспензии: твердое/жидкое	0,2...0,65
Производительность по суспензии, м <sup>3</sup> / ч	0,25...5,0
Мощность приводного электродвигателя, кВт	4,0
Габаритные размеры, Д × Ш × В, мм	1 200 × 700 × 650
Масса, кг	250

Аналогичные показатели для бисерной мельницы, имеющей мощность приводного электродвигателя 36 кВт, составили: время работы оборудования — 1 950 ч, потребление электроэнергии — 109 320 кВт · ч. Производительность пружинной мельницы в 1,625 раза выше бисерной мельницы фирмы Draïis.

Уровень качества приготавливаемой суспензии по размеру частиц, фракционному составу, проходимости на стадии формирования синтетических волокон соответствует техническим условиям. Во время работы пружинной мельницы производился мелкий ремонт установки: заполнение подшипников смазкой, подтяжка ремней и болтовых соединений. Пружинные рабочие органы отработали без нарушений весь период эксплуатации. Полученные результаты дают основания считать, что пружинные мельницы являются реальной альтернативой бисерных измельчителей в технологиях приготовления лакокрасочных материалов.

*Технология переработки технического кремния для получения узкофракционных составов.* Исходная задача — получить из предварительно подготовленного кремния крупностью 0...50 мм мелкозернистый продукт крупностью меньше 250, 125 и 100 мкм соответственно. В существующих технологиях использовались малоэффективные для этих целей щековая дробилка, роторный измельчитель и шаровая мельница, которые были заменены молотковой дробилкой с вертикальным ротором и пружинной мельницей непрерывного действия.

Молотковая дробилка ДМ-500 имеет рабочую камеру диаметром 500 мм, в которой установлен ротор с тремя рядами бил по четыре била в каждом, номинальная производительность — 1 200...1 500 кг / ч,

мощность приводного двигателя — 4 кВт. Общий вид дробилки изображен на рисунке 9.15.

Пружинная мельница «Млын» модели М12 выполнена по схеме 1 таблицы 5.2 главы 5, оснащена пружинным рабочим органом диаметром 88 мм, имеет производительность до 400 кг / ч при мощности привода 2,2 кВт. Ее общий вид показан на рисунке 9.16.

Исследование работы молотковой дробилки производилось при номинальной производительности по проходу 750 кг и линейной скорости ударных элементов 32 и 58 м / с. Анализ измельченного продукта показал, что при линейной скорости бил 32 м / с целевого продукта по верхнему классу измельчения получается до 40 %, а при скорости 58 м / с — около 65 %. Гистограмма дисперсного состава в этом случае показана на рисунке 9.17 и свидетельствует о том, что классификация продукта крупностью менее 250 мкм позволяет получать путем классификации и более мелкие классы продукта, т. е. 125 и 100 мкм.

Около 35 % частиц кремния с размерами от 0,25 до 3,0 мм не целесообразно возвращать на повторное измельчения в дробилку, что обусловлено низкой эффективностью измельчение мелких классов частиц, на поведение которых влияют создаваемые ротором воздушные потоки и проскок материала между билами без требуемого разрушения. Для этого наилучшим образом подходит пружинная мельница. Зерновой состав измельченного продукта за один проход в пружинной мельнице отсеянного после дробилки кремния приведен на рисунке 9.18.

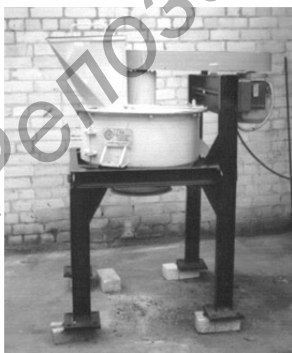


Рисунок 9.15 — Общий вид молотковой дробилки ДМ-500

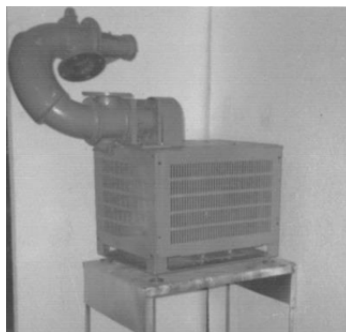


Рисунок 9.16 — Общий вид пружинной мельницы «Млын» модели М12

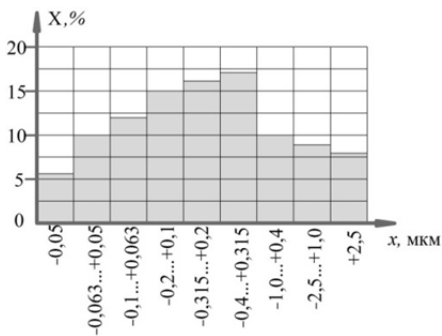


Рисунок 9.17 — Дисперсный состав кремния при дроблении в дробилке с линейной скоростью 58 м / с

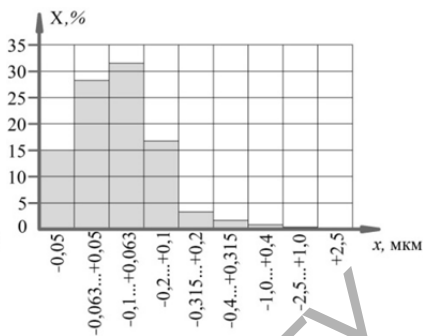


Рисунок 9.18 — Дисперсный состав кремния после измельчения в пружинной мельнице

Рабочая камера мельницы при производительности 350 кг / ч установлена под углом  $45^\circ$  к горизонту.

Анализ дисперсного состава продуктов измельчения показывает хорошую технологическую совместимость молотковой дробилки и пружинной мельницы, что, во-первых выражается в эффективности процесса помола в своем диапазоне крупности частиц, во-вторых, эти аппараты компактны и хорошо увязаны между собой по компоновочным требованиям и производительности, в-третьих, они могут дополнительно адаптироваться друг к другу за счет изменения ряда своих параметров без изменения конструкции для достижения требований технологического регламента.

*Технология производства известняковой крупки для комбикормов.* Технология соответствует ГОСТ 26826-86. Сырьем является природный известняк Порховского известнякового карьера прочностью на сжатие 40...60 МПа, влажностью 4,0...8,7 % и исходной крупностью 0...50 мм. Главная проблема производства продукции из этого сырья — низкий выход сортной крупки. Для решения указанной проблемы были использованы в качестве базовых адаптивные агрегаты — молотковая дробилка с вертикальным ротором и пружинный грохот. Выбор этого оборудования обусловлен тем, что такая дробилка обеспечивает высокую селективность и малое переизмельчение, а грохот позволяет регулировать границу разделения без замены сит при переходе на различные по крупности зерна известняка. Технологическая схема процесса показана на рисунке 9.19.

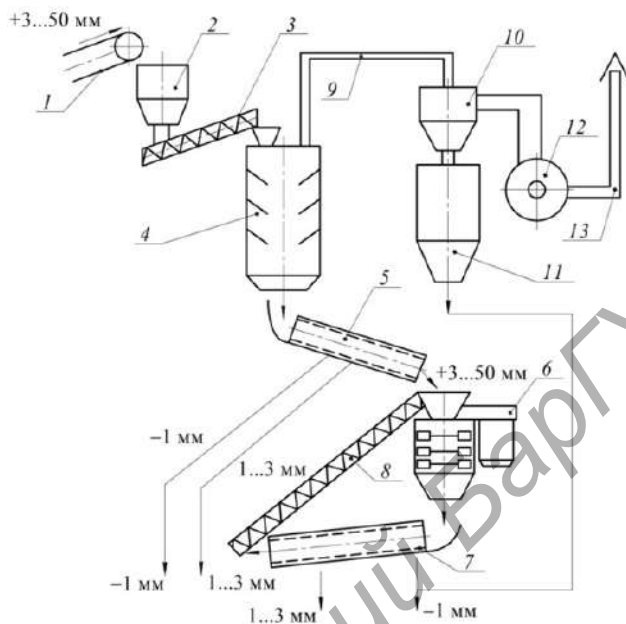


Рисунок 9.19 — Технологическая схема производства известняковой крупки

Вся эта система функционирует следующим образом. Исходный продукт крупностью  $0...50$  мм загружается транспортёром *1* в бункер *2*, из которого шнековым питателем *3* подаётся в полочную сушилку *4*, где топочными газами, движущимися по противоточной схеме, подсушивается при температуре  $250...400$  °С до влажности  $1...4$  % и сыпается в барабанный грохот *5*. Продукты пылеуноса отводятся посредством дымососа *12* через вытяжную трубу *9*, отделяются в циклоне *10* и выгружаются в бункер *11*, а отходящие газы из трубы *13* выбрасываются в атмосферу. Продукты грохочения грохота *5* в виде целевых фракций  $0...1$  и  $1...3$  мм выделяются как готовый продукт, а фракция  $3...50$  мм поступает в дробилку *6*, где подвергается селективному разрушению и выгружается в пружинный грохот *7*, где происходит отделение целевой фракции  $0...1$  и  $1...3$  мм, а надрешётная её часть шнековым питателем *8* подаётся на повторный цикл измельчения в дробилку *6*.

Технология реализуется по башенной схеме и характеризуется конструктивной простотой и высокой технологической эффективностью.

В качестве дробилки используется молотковый измельчитель с вертикальным ротором, числом рядов бил 3 и диаметром рабочей камеры 750 мм. Пружинный грохот, изображенный на рисунке 9.20, состоит из трёх секций с диаметрами пружин 105 мм и регулируемым зазором 1...5 мм. Технология реализована в ООО «Карбон» (г. Порхов Псковской обл.) и рассчитана на производительность по готовой крупке 5 000...25 000 т в год в зависимости от спроса.



Рисунок 9.20 — Общий вид пружинного грохота

Приведем пример реализации технологии. Известняк прочностью 20...60 МПа, крупностью 0...50 мм и влажностью 8 % подвозится на известняковый завод и транспортером 1 (см. рисунок 9.19) загружается в бункер 2, из которого шнековым питателем 3 с производительностью 16 т в час подается на вход полочной сушилки 4, где при температуре 280...300 °С подсушивается до влажности 3 % и поступает на барабанный грохот 5, где производится его разделение на три фракции: 1, 1...3 и более 3 мм. При этом выход известняка из сушилки составляет 14 т, а остальная его часть в виде влаги и фракции крупности менее 1 мм отбирается дымососом 12, фракции крупности 1...3 мм отсеиваются (в этой стадии технологии), оставшиеся 1,5 т поступают на дробилку 6. В молотковой дробилке 6 ударные элементы, линейные скорости которых составляют 35 м/с, измельчают куски известняка крупностью 3...50 мм до состояния, характеризующегося тем, что частиц 1...3 мм на выходе образуется 8 т, менее 1...3 мм и более 3 мм — 1 т. Разделение на эти фракции обеспечивается пружинным грохотом 7. Крупный продукт шнековым питателем 8 возвращается на вход дробилки 6, чем обеспечивается замкнутый цикл измельчения и сортировки. Дополнительный рецикл 1 т сырья делит это количество продукта на фракции: 1...3 мм — 0,7 т, менее 1 мм — 3 т. Таким образом, количественное соотношение полученной известняковой крупки 1...3 мм и известняковой муки менее 1 мм равно 10,2 и 5,3 т. Количество вы-

паренной воды — 0,5 т. Подсчеты выхода самой ценной фракции — 1...3 мм — показывают, что её количество составляет 55...60 %, что выше на 12...15 % по сравнению с традиционной технологией.

Накопленный производственный опыт эксплуатации участка по производству известняковой крупки позволяет с высокой долей уверенности перенести его на многие другие процессы. Например, в ОАО «Беларуськалий» (г. Солигорск), где объёмы переработки сильвинитовой руды составляют 50 млн т в год, использование адаптивных механизмов переработки материалов способно обеспечить максимально высокую степень энерго- и, главное, ресурсосбережения.

В качестве замечания к сказанному целесообразно отметить, что вибровалковые измельчители потенциально способны улучшить описанные технологии, но на решение этих задач они пока экспериментально не исследовались.

*Технология помола клинкера для получения цементов повышенной активности.* Для повышения тонины помола в промышленных масштабах в ОАО «Кричевцементношифер» (г. Кричев Могилевской обл.) опробована технология двухстадийного измельчения на основе молотковой дробилки и шаровой мельницы  $3,2 \times 14,0$  м. На первой стадии использовалась молотковая дробилка типа ДУ-1500 с вертикальным ротором, оснащенная в верхней части стандартными билами, а в нижней — мелкими билами на цепных подвесах. Мощность привода дробилки — 200 кВт, линейная скорость бил — 55 м/с. Шаровая мельница работала в штатном режиме с производительностью 50 т/ч в открытом цикле измельчения состава мелющей загрузки.

В процессе испытаний мощность привода дробилки, выполняющей функции предизмельчителя, составила 140 кВт, а полученный после нее продукт характеризовался крупностью +10 %, больше 1 мм — с содержанием класса 0,08 мм, т. е. цементных зерен в среднем 30 %. После прохождения через мельницу получен цемент, удельная поверхность которого по прибору ПСХ-8 составила  $5\,260\text{ см}^2/\text{г}$ . Таким образом, данная технология позволяет получать высокомарочные, быстротвердеющие или специальные цементы с минимальными энергозатратами, которые по проектному энергопотреблению составляют около  $3\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$ . Суммарно на весь цикл помола эти затраты примерно в 3 раза меньше по сравнению с вибропомолом.

Выявились основные недостатки технологии — быстрый износ ударных элементов и необходимость их довольно частой замены. Разработаны технические решения этой проблемы, которые позволяют довести ресурс работы бил не менее чем до двух недель непрерывной работы, т. е. примерно до 400 ч. Это обеспечивает выпуск 20 000 т с повышенными потребительскими свойствами и, соответственно, стоимостью продаж, особенно для ответственных объектов.

Аппараты адаптивного действия исследовались на процессах, проводимых в лабораторных условиях, на экспериментальных участках, в промышленных технологиях, а также внедрены в целом ряде производств. При этом выявлен целый ряд направлений, в которых такое оборудование обладает особыми преимуществами по сравнению с существующими. Выделим некоторые из них:

- 1) первичная переработка влажных материалов, в том числе совмещение с предварительной сушкой;
- 2) механоактивация комплектов для получения материалов на основе вяжущих веществ — цементобетона;
- 3) измельчение и диспергирование материалов в жидких средах;
- 4) селективное измельчение минерального сырья на стадиях мелкого дробления;
- 5) тонкий и сверхтонкий помол материалов с одновременным процессом гомогенизации их композиций;
- 6) эффективная переработка анизотропных и сложных по составу и свойствам материалов;
- 7) процессы тонкого грохочения мелкозернистых и влажных продуктов;
- 8) глубинное уплотнение с одновременной механоактивацией компонентов бетонных смесей;
- 9) совмещение процессов дозирования с дополнительной технологической обработкой сыпучих материалов.

Предложенный перечень, безусловно, будет расширяться по мере развития и совершенствования аппаратов адаптивного действия, накопления собственного технологического опыта и заимствования достижений из других областей науки, техники и технологий.

Рассматривая в целом потенциал создания новых технологических процессов на основе аппаратов адаптивного действия можно видеть, что они обладают дополнительными возможностями и обусловлены новыми механизмами воздействия на обрабатываемый материал, большим разнообразием конструктивных форм оборудо-

вания и вариативностью построения технологических схем производства как путем многообразия используемых агрегатов, так и комбинаций формирования их наборов.

Первый фактор определяется повышением энергонапряженности процессов непосредственно в зонах введения внешней энергии в обрабатываемую среду, созданием управляемых способов ее подачи с требуемыми по технологическим условиям переработки характеристиками, обеспечивающими максимально достижимую эффективность. Кроме простой интенсификации процессов расширяются другие возможности оборудования, например, путем выполнения нескольких операций в одной рабочей камере получения материалов с новыми потребительскими свойствами.

Конструктивное исполнение аппаратов адаптивного действия позволяет формировать цепи оборудования с улучшенным доступом к их базовым узлам и агрегатам. Характерный пример — совмещение транспортирующего органа (ленты) с пружинными органами или встраивание рабочих органов в насосные системы. Дополнительно можно отметить модульный принцип построения и вписывание их в зоны между крупными установками, в частности, между печами и дымососами, что позволяет решать ряд технологических задач (влагоудаление, измельчение), которые невозможно осуществить применением других видов оборудования.

Огромные технологические возможности заложены в построение цепей оборудования на основе подбора различных по принципу действия агрегатов, которые поэтапно обеспечивают наиболее эффективную переработку исходного продукта. Характерными примерами можно считать, например, механоактивацию минеральных компонентов, рудоподготовку селективными методами, получение материалов определенной гранулометрии (кубовидный щебень), проведение процессов механосинтеза и производства композиционных материалов. В крупнотоннажных технологиях вариативность построения цепей оборудования решает наиболее актуальные задачи: энерго- и ресурсосбережение, снижение капитальных затрат, повышение производительности.

Технологические аппараты адаптивного действия достаточно хорошо проработаны конструктивно, но исследований протекающих в них процессов явно недостаточно, что необходимо активизировать в целях выявления их потенциальных возможностей и определения областей использования.

### **9.3 Развитие технологического оборудования на основе адаптивных методов проведения рабочих процессов**

Современный технический прогресс характеризуется всемерным использованием достижений науки, новейшими технологическими процессами, оборудованием, средствами контроля и автоматического управления, что позволяет выпускать самую разнообразную продукцию для удовлетворения потребностей человечества. Фундаментальную основу грядущего технологического уклада будет определять не только и даже не столько цифровая экономика, но в гораздо большей степени энергетическая, ресурсная и экономическая его составляющие. Речь идет о крайне неэффективном использовании природных ресурсов, низком уровне работ в области комплексной переработки сырья и материалов, слабой проектной базе, отсутствии нужного количества специалистов и ученых соответствующего профиля. Все сказанное в полной мере относится к сфере, прежде всего, крупнотоннажного производства в таких отраслях промышленности, как черная и цветная металлургия, производство строительных материалов, химическая промышленность, переработка отходов и т. д. Базой для технического прогресса в этих отраслях является технологическое оборудование.

В общем ряду существующего технологического оборудования аппараты адаптивного действия занимают свою нишу, которая обусловлена их функциональными возможностями. С учетом выполненных авторами исследований определена реальная область использования разработанного оборудования, охватывающая следующие процессы: измельчение, смешивание, диспергирование, механоактивация, классификация, глубинное уплотнение, сушка, гранулирование, дозирование, а также их соответствующие комбинации.

Специфика выполнения рабочих органов аппаратов адаптивного действия заключается в том, что они конструктивно отличаются от традиционных тем, что являются состоящими, как правило, из элементов, которые изменяют свои характеристики и поведение под воздействием перерабатываемой среды (упругая деформация, мног шарнирность, виброактивность, микрорельефность поверхности, вариативность воздействия на материал и др.)

или режимов работы. Это накладывает определенные ограничения, например, на прочность и крупность кусков исходного материала, но, с другой стороны, расширяет возможности селективного механизма внешнего воздействия, эффектов виброреологии и ряда других особенностей. Обобщенная укрупнённая оценка рациональной области использования аппаратов адаптивного действия представлена в таблице 9.6.

Т а б л и ц а 9.6 — Рациональная область использования аппаратов адаптивного действия

Наименование	Область использования
Цепные аппараты	Первичное измельчение влажных сырьевых и карьерных материалов, переработка отходов, сортировка, влагопонижение и т. д.
Дробилки ударного действия с вертикальным и наклонным ротором	Мелкое дробление и грубый помол материалов твердостью до 5 единиц по шкале Мооса и прочностью до 120 МПа, смешивание, механоактивация, переработка отходов и т. д.
Пружинные мельницы, смесители и механоактиваторы	Тонкий и сверхтонкий помол, приготовление высококачественных композиций, механоактивация, получение материалов наноразмерной структуры и т. д.
Вибровалковые измельчители	Селективная переработка минеральных продуктов, предизмельчение в стадиях помола, механоактивация
Пружинные грохоты	Тонкое разделение влажных зернистых материалов
Иглофрезерные аппараты	Комплексная переработка неоднородных и сложных по составу и свойствам материалов
Пружинные виброуплотнители	Уплотнение и механоактивация бетонных смесей при монолитном строительстве
Измельчители с многолезвийными рабочими органами	Переработка пластмасс, резины и других композитных материалов, подготовка ТКО к последующей регенерации
Пружинные питатели-дозаторы	Точное дозирование зернистых материалов с одновременным смешиванием, измельчением и механоактивацией

Рассматриваемые аппараты адаптивного действия находятся на разных стадиях своего развития и обладают различным потенциалом, особенностями рабочего процесса, конструкцией, условиями работы, степенью исследованности, готовностью к промышленному освоению, наличием кадрового потенциала и т. д. В силу специфики протекающих в этих аппаратах процессов их целесообразно объединить в одну технологическую группу машин и проводить дальнейшие работы по их совершенствованию на основе единой научно-методологической базы. Дадим краткую оценку возможных направлений развития разработанного оборудования для переработки дисперсных материалов и сред адаптивными методами проведения рабочих процессов.

*Цепные агрегаты.* Этот новый класс оборудования предназначен для комплексной первичной переработки сырьевых материалов в крупнотоннажных производствах. На данный момент можно выделить следующие важнейшие направления работ по его развитию. Во-первых, учитывая аддитивный характер рабочих процессов и сложность их аналитического описания, изначально необходимо разработать ряд опытных образцов цепных агрегатов для проведения широкомасштабных испытаний по переработке различных материалов в целях определения технологических возможностей и эксплуатационной надежности, во-вторых, разработать универсальную методику расчета основных параметров и режимов работы, в-третьих, подготовить необходимую конструкторско-технологическую базу производства цепных агрегатов для освоения промышленного выпуска и коммерческой реализации.

Прогноз развития цепных агрегатов позволяет считать, что для многих технологических переделов они могут служить базовыми машинами и в значительной степени будут определять их общий технический уровень, например, для цементных заводов сухого способа производства, где на стадии массоподготовки они реально обеспечат переход на новый уровень эффективности [183; 185]. В связи с этим остро стоит задача логистического встраивания цепных агрегатов в состав действующих или новых технологических комплексов.

*Дробилки ударного действия.* Целью развития этого вида оборудования изначально явилось расширение технологических возможностей за счет использования энергии центробежного потока для смешивания, механоактивации, селективного измельчения или

классификации, что и было в определенной степени исследовано для дробилок с вертикальным ротором. Дальнейшие исследования показали, что определяющими факторами в работе таких аппаратов являются центробежное движение материала и мощные воздушные потоки, создаваемые бильной системой ротора. Для устранения этих негативных явлений разработана концепция управляемого движения обрабатываемой среды. Суть ее сводится к созданию таких условий работы, при которых частицы в составе двухфазного потока совершают кругоцикловые перемещения между секциями бил, а после соответствующих ударов теряют свою скорость до минимума в успокоительных камерах и далее поступают на следующие секции бил. Наилучшим образом для реализации такого способа управления процессом измельчения подходит установка с наклонным ротором [166; 185].

Большой объем выполненных теоретических и экспериментальных работ показывает, что молотковые измельчители с вертикальным и особенно наклонным ротором являются перспективными машинами для многих технологий. Для вывода их на мировой уровень в первую очередь необходимо провести анализ закономерностей движения потоков обрабатываемой массы в рабочей камере и увязать их с характеристиками собственно процесса измельчения или других видов переработки, например, перемешивания. Следующей по важности задачей следует считать обеспечение надежности и долговечности основных узлов и элементов: бил, шарниров, подшипниковых опор, отбойных дисков, рабочей камеры. Это только исходный перечень направлений развития дробилок ударного действия, который также должен учитывать традиционные для данного класса машин направления и здесь не рассматривается [192].

Опыт практического использования разработанных дробилок показывает, что это не только высокоэффективные, но и многофункциональные агрегаты. Выполнение соответствующих стадий научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ позволит создать перспективный для промышленного освоения класс оборудования, который способен заменить целый ряд существующих агрегатов и реально влиять на формирование цепей оборудования создаваемых технологических комплексов.

*Пружинные мельницы, смесители и механоактиваторы.* Этот класс технологических машин характеризуется большим конструктивным многообразием, прошел значительный путь технологического развития и практического использования. В Белорусско-Российском университете сформирована научная школа по данному направлению и имеется научно-исследовательская лаборатория. Опыт практического использования более 800 различных пружинных аппаратов 60 типоразмеров и конструктивных исполнений дает основание судить об их техническом потенциале. В число задач, которые требуется решить для дальнейшего развития пружинных аппаратов, следует включить спектр исследований по анализу закономерностей поведения обрабатываемой среды в рабочей камере и особенно условий управляемой подачи частиц в зоны разрушения, а также провести работы по изучению возможностей сверхтонкого помола, получения микрокомпозиций порошковых составов, эффектов механоактивации и диспергирования твердых частиц в жидких средах.

Основополагающим фактором развития пружинных мельниц следует считать необходимость создания централизованного производства пружинных рабочих органов, которые должны обладать достаточной износостойкостью и высокой долговечностью при циклическом нагружении. При условии решения этой задачи значительно упрощается организация выпуска машиностроительными предприятиями широкой гаммы пружинных аппаратов различного технологического назначения и функциональных возможностей.

*Вибровалковые измельчители.* Это первый вариант реализации на одном из рабочих валков виброколебаний с достаточно высокой частотой, создаваемых в плоскости расположения осей их вращения. Полученный при этом механизм интенсивного сдвигового нагружения открывает новые возможности по селективной переработке различных по своей структуре материалов. Его отличие от ближайших аналогов, например пресс-валкового измельчителя, требует внесения не только дополнительных корректив в структуру исследования, но и вынуждает создавать новые модели описания происходящих в зоне разрушения процессов.

Ближайшими задачами развития вибровалковых агрегатов следует считать проведение комплекса технологических испытаний по изучению кинетических закономерностей разрушения различных

материалов и выполнить анализ факторов, определяющих зерновой состав, дефектность структуры, энергоэффективность и технологические показатели работы. Параллельно стоит рассмотреть вопросы динамической нагруженности вибровалка, а также оценить износостойкость и перспективы использования вибровалковых агрегатов для измельчения высокопрочных материалов, например, ферросилиция, доменного граншлака, керамики, оксидов металлов и т. д.

*Пружинные грохоты.* Дальнейшее развитие пружинных грохотов должно базироваться на разработке математических моделей, описывающих закономерности поведения грохотимого продукта на вибрирующих витках пружинной просеивающей поверхности и учитывающих условия прохождения частиц подрешетного класса между витками пружин. Предстоит аналитически определить и экспериментально исследовать влияние характера колебаний на степень участия окружной длины просеивающих отверстий, т. е. щелей между витками рабочего органа на эффективность грохочения и удельную производительность. Предполагается провести комплекс исследований по мокрому грохочению различных материалов в целях оценки возможности расширения области использования пружинных грохотов.

*Иглофрезерные аппараты.* Этот класс технологического оборудования базируется на широко применяемых в технике в качестве различных рабочих инструментов щеток, иглофрез, скребков и т. д. Особая уникальность их конструктивного исполнения, проявляющаяся в микрорельефности рабочей поверхности, возможности создания максимальных контактных напряжений, самоочищаемости, множественности рабочих элементов и ряда других, позволяет рассматривать металлические проволочные инструменты в качестве эффективных рабочих органов технологических машин, где они могут эффективно осуществлять процессы измельчения, смешивания, диспергирования, механоактивации и ряда других процессов. Определяющей гарантией их успешного использования в качестве рабочего оборудования является многолетний опыт проектирования, изготовления и эксплуатации щеток для зачистки и обработки металлических поверхностей.

Первостепенной задачей развития иглофрезерных установок является перенос опыта создания проволочного инструмента на проектирование рабочего оборудования для дезинтеграторной об-

работки материалов и масштабирования их в целях изготовления более крупных рабочих органов. Такой переход требует разработки технологии изготовления крупных проволочных рабочих органов, но более важным на данном этапе является математическое описание процессов их взаимодействия с обрабатываемой средой. Параллельно следует проводить экспериментальные исследования иглофрезерных аппаратов по переработке различных материалов в целях определения области их эффективного использования и выявления потенциальных возможностей.

*Пружинные виброуплотнители.* Эти аппараты являются первыми из машин аналогичного назначения, которые одновременно с уплотнением способны осуществлять механоактивацию компонентов бетонной смеси. Кардинальное изменение конструкции виброизлучателя привело к интенсификации рабочего процесса и поставило новые научные и технологические задачи. Первой из них можно считать разработку теоретических методов расчета основных параметров и режимов работы пружинного вибронаконечника, второй — исследование технологических показателей уплотнения. Дополнительно необходимо разработать универсальный малогабаритный электропривод с аккумулятором, а для уплотнения больших объемов бетонных смесей — кассетный виброуплотнитель на крановом подвесе.

*Измельчители с многолезвийными рабочими органами.* Для переработки полимерных, неоднородных и композитных материалов важным направлением развития является концепция максимального увеличения числа режущих элементов на фрезерных рабочих органах при их равномерном распределении в объеме рабочей камеры. Создание такого оборудования требует выбора соответствующих типов фрез, размещения их на роторе и стенках рабочей камеры и проведения необходимых теоретических и экспериментальных исследований по определению основных параметров и режимов работы этого типа аппаратов [148].

*Пружинные питатели-дозаторы.* Конструктивные решения этих аппаратов базируются на пружинных мельницах и отличаются системой ввода компонентов в камеру с находящимся в ней транспортирующим пружинным рабочим органом. Задачами исследования при этом будут: разработка аналитической модели расчета основных параметров и режимов работы питателей-дозаторов с уче-

том дополнительных процессов, в том числе смешивания или по-мола с одновременной оценкой точности дозирования, проведение комплекса экспериментов по изучению реальных возможностей и показателей эффективности, а также определение области рационального использования.

Многие другие научные, технические, технологические и организационные вопросы и задачи развития технологического оборудования на основе адаптивных методов проведения рабочих процессов изложены в работах [148; 166; 180; 183; 190; 192; 198; 208; 211]. Их практическое использование на этапах исследования, проектирования и освоения производства позволит обеспечить ускоренную коммерциализацию ряда технологических аппаратов адаптивного действия.

Репозиторий Барнаула

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные авторами монографии материалы, выводы и обобщения базируются на собственных многолетних исследованиях, выполненных в межгосударственном образовательном учреждении высшего образования «Белорусско-Российский университет» (г. Могилёв, Беларусь), учреждении образования «Барановичский государственный университет» (г. Барановичи, Беларусь) и некоммерческом акционерном обществе «Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева» (г. Нур-Султан, Казахстан). Объектами исследований являются дезинтеграторные технологии переработки различных по структуре, составу и свойствам природных и техногенных материалов. Основополагающая концепция работы заключается в создании машин и агрегатов адаптивного действия, обеспечивающих селективный характер проведения процессов технологической обработки исходных компонентов, что направлено на максимально эффективное использование подводимой через рабочие органы к перерабатываемой среде внешней энергии в целях ее наиболее полного преобразования и получения конечных продуктов заданного качества.

Оценка основных направлений развития современного естествознания указывает на преобладающее влияние фундаментальных наук на технический прогресс в промышленности и рост наукоемкости производства. Вместе с тем на фоне общего прогрессивного развития технологической сферы дезинтеграторная ее составляющая, как отмечают многие исследователи, «застопорилась», что крайне неблагоприятно отражается на экономическом состоянии большинства стран и порождает общие негативные тенденции.

Для решения ряда озвученных проблем и улучшения сложившейся ситуации авторами использована современная методическая база создания новых видов технологического оборудования, включающая в себя фундаментальные принципы технологической вибротехники, адаптивные методы переработки материалов, прикладную физико-химическую механику, вариативные подходы в организации и проведении технологических процессов, а также использование нормальных эффектов, проявляющихся при проведении дезинтеграторных, сопряженных с ними технологий, в частности, смешивания, уплотнения, механоактивации, сушки, гранулирования, обогащения, классификации и др.

С учетом перечисленных подходов спроектирована подавляющая часть представленного в монографии оборудования, прежде всего пружинные аппараты различного технологического назначения, вибровалковые измельчители, многоцелевые цепные агрегаты, виброуплотнители бетонных смесей, установки с иглофризерными рабочими органами, молотковые измельчители с управляемым движением обрабатываемой среды и универсальные измельчители с многолезвийными рабочими органами.

Практика конструирования этого оборудования показала, что только системная оценка всех закономерностей, происходящих в рабочих зонах процессов, и целенаправленное управление или позволяет создавать наиболее совершенные машины для комплексной переработки дисперсных материалов.

Особое внимание в работе уделено технологиям и оборудованию для работы с неоднородными и сложными по составу и свойствам материалам. Это в итоге

реализовано в адаптивных механизмах воздействия на перерабатываемую среду посредством различных по конструкции рабочих органов. Разработанные таким образом новые принципы селективности нами рассматриваются как неотъемлемая часть общей стратегии технологии переработки этих материалов.

Описанные виды оборудования находятся на разных стадиях своего развития, поэтому степень их описания различна, но для каждого из них выполнен соответствующий набор аналитических и экспериментальных исследований, результатом которых является определение основных конструктивно-технологических и энергосиловых параметров и рациональной области использования.

Результаты опытно-промышленного освоения и внедрения научно-технических разработок с использованием оборудования адаптивного действия вызывают его высокую технологическую эффективность, что выражается в понижении расхода энергии в 1,2...1,7 раза, улучшении качества получаемого продукта, возможности селективно перерабатывать широкую гамму материалов и обеспечивать существенную экономию материальных, энергетических и финансовых ресурсов.

Технические решения машин и агрегатов адаптивного действия включают в себя их различные виды, типоразмеры и исполнения, защищены большим количеством патентов на изобретения, имеют мировой уровень новизны. Их технологические возможности охватывают также области применения, которые либо известными подходами не решены, либо это связано с большими трудностями и затратами. Как пример этого — переработка влажных карьерных материалов в цепных агрегатах, совмещение нескольких операций в одной рабочей камере пружинной мельницы, измельчение анизотропных продуктов в иглофрезерных аппаратах или совмещение функций виброуплотнения и механоактивации при монолитном бетонировании.

Основными сферами использования разработанного оборудования адаптивного действия следует считать:

- первичную переработку влажных сырьевых материалов, в том числе в карьерных условиях;
- тонкий и сверхтонкий помол минеральных продуктов и вяжущих веществ;
- получение узкофракционных зернистых сред различного назначения;
- приготовление высококачественных сырьевых смесей для крупнотоннажных производств;
- комплексную переработку многокомпонентных составов в целях получения продуктов с высокой степенью их технологического преобразования;
- механическую активацию смесевых составов на основе вяжущих веществ или отдельных компонентов;
- получение высококачественных суспензий, шламов, паст и эмульсий;
- переработку труднодиспергируемых волокнистых и анизотропных материалов, в том числе древесного сырья, пленок, резины, пластика, твердых бытовых отходов и др.;
- виброуплотнители бетонных смесей с одновременной механоактивацией;
- выпуск товарных продуктов с высокой глубиной переработки на базе технологических комплексов или линий нового поколения;
- получение наноразмерных композиций для формирования на их основе материалов оптимальной структуры.

Исторически совершенствование дезинтеграторных агрегатов идет по пути оптимизации единичных актов, воздействия на частицы материала и управления характером движения обрабатываемой среды. Главной отличительной способностью адаптивных методов переработки материалов следует считать то, что они, сочетая в себе известные механизмы нагружения, дополнены новыми и осуществляются при особых условиях поведения рабочих органов и обрабатываемой среды.

Сформированное авторами новое научное направление является дальнейшим этапом развития дезинтеграторных технологий и оборудования и имеет свою нишу практического использования. Это дает основания полагать, что при освоении выпуска отечественными машиностроительными предприятиями машин и агрегатов адаптивного действия возможно выйти на мировой рынок с новой инновационной продукцией.

Репозиторий БарГУ

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. A bead mill for making nanodispersions // Chem. — Eng (USA). — 2005. — Vol. 112, № 10. — P. 17—18.
2. Charles, R. Energysize reduction relationships in comminution / R. Charles // Mining Engineering. — 1958. — April. — P. 481—484.
3. Cunningham, J. C. Experimental Investigation and Numerical Simulation of Roll Compaction of Powders / J. C. Cunningham, A. Zavalianos // Proc.: 2002 International Conference on Process Modeling in Powder Metallurgy & Particulate Materials; 28—29 Oct. 2002, Newport Beach, California, USA. — Princeton, NJ, USA, 2002. — P. 10—18.
4. Dec, R. T. Experimental Investigations of Roll Press Compaction / R. T. Dec, R. K. Komarek // Powder Handling & Processing. — 1991. — Vol. 4, № 1. — P. 35—38.
5. Erdmann, P. Numerical simulation of dynamic soil compaction with vibratory compaction equipment / P. Erdmann, D. Adam // Geotechnics of Roads and Railways : proceedings XV Danube — European Conference on Geotechnical Engineering, 9—11 Sept. 2014, Vienna, Austria. — Vienna, 2014. — P. 243—248.
6. Experimental Investigation of the Fundamental Parameters of Roller Compaction / J. Zega [et al.] // AAPS Annual Meeting. — San Francisco, 1998. — P. 13—21.
7. Griffiths, A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids / A. Griffiths // Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences. — 1921. — Vol. 221. A 587. — P. 163—198.
8. Hess, W. Die Zerkleinerung von kalksteinkugeln bei kombinierter Druck und Schubbeanspruchung / W. Hess, K. Schonert // Zerklein (4 Europäischen Symposium), Dechema Monogr. — Weinheim : Chemie, 1976. — Bd 79. — P. 151—165.
9. Mular, A. L. Design and comminution circuits / A. L. Mular, G. V. Jergensen Society of mining Engineers ALME. — New York, 1982.
10. Rumpf, H. Beanspruchungstheorie der Prallzerkleinerung / H. Rumpf // Chemie-Ingenieur-Technik. — 1959. — № 5. — P. 323—337.
11. Rumpf, H. Die Einzelkommerkleinerung als Grundlage einer Zerkleinerung / H. Rumpf // Dig. Techn. — 1965. — Jnrg. 37. — № 3. — P. 187—202.
12. Schonert, K. Energetische Aspekte des Zerkleinerns spröder Stoffe / K. Schonert, K. Steier // Chemie — Ing. Techn. — 1979. — Jhrg. 43. — № 13. — P. 773—111.
13. Schonert, K. Grenze der Zerkleinerung bei Korngrosen / K. Schonert, K. Steier // Chemie — Ing. Techn. — 1979. — Jhrg. 43. — № 13. — P. 773—777.
14. Stairmand, C. The energy efficiency in milling processes. A review of some fundamental investigations and the it application to mill design / C. Stairmand // Zerkleinern (4 Europäischen Symposium), Dechema Monogr. — Weinheim : Chemie, 1976. — Bd 79. — P. 1—17.
15. Tan, C. Design of a urea granulator with energy optimization / C. Tan // Proceedings of 3rd International conference on engineering and ICT, 4—5 April 2012, Melaka, Malaysia. — 2012. — Vol. 1. — P. 187—191.
16. Абдукаликова, Г. М. Изучение способов упрочнения бетонных смесей и их интенсификации / Г. М. Абдукаликова, Л. А. Сиваченко // Архитектура, строительство и транспорт: состояние и перспективы развития : материалы Респ. науч.-конф., ЕНУ им. Л. Н. Гумилева. — Астана, 2014. — С. 12—16.

17. *Аввакумов, Е. Г.* Механические методы активации химических процессов / Е. Г. Аввакумов. — Новосибирск : Наука, 1986. — 305 с.
18. Агрегат для измельчения влажных материалов : полезная модель РК № 1597 / Л. А. Сивачено, А. М. Ровский, И. А. Реутский, У. К. Кусебаев ; дата publ.: 12.08.2016.
19. *Акунов, В. И.* Струйные мельницы / В. И. Акунов. — М. : Машиностроение, 1967. — 240 с.
20. *Андреева, Л. Е.* Упругие элементы приборов / Л. Е. Андреева. — М. : Машиностроение, 1981. — 392 с.
21. *Андреев, С. Е.* Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых : учеб. для вузов / С. Е. Андреев, В. В. Зверевич, В. А. Перов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Недра, 1980. — 415 с.
22. *Афонин, В. К.* Металлы и сплавы : справочник / В. К. Афонин, Б. С. Ермаков, Е. Л. Лебедев. — СПб. : Проффессионал, 2003. — 354 с.
23. *Ахвердов, И. Н.* Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. — М. : Стройиздат, 1981. — 464 с.
24. *Ахвердов, И. Н.* Технология железобетонных изделий и конструкций специального назначения / И. Н. Ахвердов. — Минск : Наука і тэхніка, 1993. — 239 с.
25. *Бабенко, С. А.* Порошки: получение, свойства, анализ / С. А. Бабенко, А. П. Ильин, В. В. Коробочкин. — Томск : Изд-во ТПУ, 2011. — 264 с.
26. *Баженов, Ю. М.* Технология бетона : учеб. пособие для строит. специальностей вузов / Ю. М. Баженов. — М. : Высш. шк., 1978. — 455 с.
27. *Баловнев, В. И.* Определение сопротивлений и энергии при измельчении материала / В. И. Баловнев // Строит. и дорож. машины. — 1988. — № 1. — С. 24—25.
28. *Баранов, В. Ф.* Вопросы ресурсо- и энергосбережения в циклах рудоподготовки / В. Ф. Баранов // Обогащение руд. — 1994. — № 1. — С. 48—56.
29. *Баранов, Е. Г.* Методы дезинтеграции / Е. Г. Баранов // Подготовка минерального сырья к обогащению и переработке / под ред. В. И. Ревнищева. — М. : Недра, 1988. — С. 92—127.
30. *Барон, Л. И.* Коэффициенты крепости горных пород / Л. И. Барон. — М. : Наука, 1972. — 176 с.
31. *Баршай, И. Л.* Формирование качества поверхности и эксплуатационных характеристик деталей при иглофрезеровании и комбинированной обработке иглофрезерованием и поверхностным пластическим деформированием / И. Л. Баршай, В. К. Шелег, Е. Э. Фельдштейн. — Минск : БНТУ, 2009. — 231 с.
32. *Бауман, В. А.* Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций / В. А. Бауман, Б. В. Клушанцев, В. Д. Мартынов. — М. : Машиностроение, 1981. — 324 с.
33. *Бернхардт, К.* Связь между активностью и расходом энергии при механическом активировании твердых материалов / К. Бернхардт, Х. Хеэги // Доклады VII Всесоюзного симпозиума по механоэмиссии и механохимии твердых тел. — Ташкент, 1981. — Ч. 33. — С. 145—153.
34. *Биленко, Л. Ф.* Закономерности измельчения в барабанных мельницах / Л. Ф. Биленко. — М. : Недра, 1984. — 200 с.
35. *Блиничев, В. Н.* Распределение энергии, подводимой к телу в процессе разрушения / В. Н. Блиничев, С. П. Бабков, П. В. Ключков // докл. VII Всесоюз.

симпозиума по механоэмиссии и механохимии твердых тел. — Ташкент, 1981. — Ч. 2. — С. 152—154.

36. *Богданов, В. С.* Процессы в производстве строительных материалов / В. С. Богданов, А. С. Ильин, И. А. Семикопенко. — Белгород : Вевелита, 2007. — 512 с.

37. *Богданов, В. С.* Процессы в производстве строительных материалов / В. С. Богданов, Д. В. Богданов, И. Л. Семикопенко. — Старый Оскол : ТНТ, 2018. — 436 с.

38. *Болдырев, В. В.* Механическая активация при реакциях твердых тел. Свойства и применение твердых порошков / В. В. Болдырев. — Киев : Наук. думка, 1986. — С. 69—78.

39. *Болдырев, В. В.* Развитие исследований в области механохимии неорганических веществ в СССР / В. В. Болдырев // Механохимический синтез в неорганической химии : сб. науч. тр. — Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1991. — С. 5—32.

40. *Болтон, У.* Конструкционные материалы металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты: карм. справ. / У. Болтон. — М. : Додека-XXI, 2004. — 320 с.

41. *Бонд, Ф. С.* Законы дробления / Ф. С. Бонд // Труды европейского совещания по измельчению. — М. : Стройиздат, 1966. — С. 195—205.

42. *Борщев, В. Я.* Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы : учеб. пособие / В. Я. Борщев. — Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2004. — 75 с.

43. *Бриджмен, П. В.* Исследование больших пластических деформаций и разрыва / П. В. Бриджмен. — М. : Химия, 1955. — 444 с.

44. *Бриджмен, П. В.* Новейшие работы в области высоких давлений / П. В. Бриджмен. — М. : Химия, 1948. — 300 с.

45. *Броек, Д.* Основы механики разрушения / Д. Броек. — М. : Высш. шк., 1980. — 308 с.

46. *Бутт, Ю. М.* Технология вяжущих веществ / Ю. М. Бутт, С. Д. Огороков, М. М. Сычев. — М. : Высш. шк., 1965. — 619 с.

47. *Бутюгин, А. В.* Изучение влияния активации на процесс извлечения гуминовых веществ из землистых бурых углей / А. В. Бутюгин, А. С. Иванов // Технологические проблемы измельчения и механоактивации : материалы науч.-техн. семинара стран Содружества-92, Могилев, ММИ, 1993. — С. 26—28.

48. *Вайтехович, П. Е.* Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил : монография / П. Е. Вайтехович. — Минск : БГТУ, 2008. — 220 с.

49. *Вердиян, М. А.* Процессы измельчения твердых тел / М. А. Вердиян, М. А. Кафаров // Итоги науки и техники. Процессы и аппараты химической технологии. — М. : ВИНТИ, 1977. — Т. 5. — С. 5—90.

50. Вибровалковый измельчитель-активатор : пат. РФ № 186478 : В02С 4/32 / В. С. Севостьянов, Л. А. Сиваченко, М. В. Севостьянов, Т. Л. Сиваченко, Л. Л. Сотник, П. Ю. Горягин. — № 2018130277 ; заявл. 20.08.2018 ; дата публ.: 22.01.2019.

51. *Вставский, Е. А.* Исследование долговечности и надежности гибких проволочных валов силовых приводов / Е. А. Вставский // Передаточные механизмы : сб. науч. тр. / под ред. В. Ф. Мальцева, Б. А. Пронина. — М. : Машиностроение, 1971. — С. 282—288.

52. *Гавриленко, И. Г.* Силовые параметры вращающихся проволочных щёток / И. Г. Гавриленко // Станки и инструменты. — 1975. — № 12. — С. 29—30.

53. *Гавриленя, А. К.* Теоретическое и экспериментальное обоснование технологических параметров процессов измельчения твердых материалов в машинах валкового типа : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / А. К. Гавриленя. — Минск, 2007. — 131 с.

54. *Гапонов, Г. В.* О селективных технологиях дезинтеграции руд / Г. В. Гапонов, В. И. Ревнивцев // Дезинтеграция руд и твердых материалов : межвуз. сб. науч. тр. — Л. : Механообр-Техника, 1988. — С. 13—22.

55. *Гийо, Р.* Проблема измельчения материалов и ее развитие / Р. Гийо. — М. : Стройиздат, 1964. — 111 с.

56. *Гончаревич, И. Ф.* Вибротехника в горном производстве / И. Ф. Гончаревич. — М. : Недра, 1992. — 319 с.

57. *Горловский, И. А.* Оборудование заводов лакокрасочной промышленности / И. А. Горловский, Н. А. Козулин. — Л. : Химия, Лен. отд-ние, 1980. — 376 с.

58. Горная энциклопедия / под ред. Е. А. Козловского. — М. : Совет. энцикл., 1984. — 1991 с.

59. Гранулятор : полезная модель РК № 1657 / Л. А. Сивачено, И. А. Реутский, А. М. Ровский, У. К. Кусебаев, Т. Л. Сиваченко ; дата публ.: 15.09.2016.

60. Детали машин. Расчет и конструирование : справочник : в 3 т. / под ред. Н. С. Ачеркана. — М. : Машиностроение, 1968. — Т. 2. — 408 с.

61. *Дешко, Ю. И.* Измельчение материалов в цементной промышленности / Ю. И. Дешко, М. Б. Креймер, Г. С. Крыхтин. — М. : Стройиздат, 1966. — 270 с.

62. *Дремин, А. Н.* Процессы, протекающие в твердых телах под действием ударных волн / А. Н. Дремин, О. Н. Бреусов // Успехи химии. — 1968. — Т. 37. — Вып. 5. — С. 898—916.

63. *Дроздов, А. Н.* Строительные машины и оборудование : учеб. для студентов учреждений высш. проф. образования / А. Н. Дроздов. — М. : Академия, 2012. — 448 с.

64. *Дуда, В.* Цемент / В. Дуда. — М. : Стройиздат, 1981. — 464 с.

65. *Жданович, Г. М.* Высокоэнергетические машины для тонкого измельчения / Г. М. Жданович, А. И. Дудяк, В. Г. Тюжняков // Конспекты лекций научной школы «Вибротехнология-89». — Одесса : ОВИМУ, 1989. — Ч.1. — С. 28—34.

66. *Зайцев, Ю. В.* Прочность и долговечность конструкционных материалов с трещиной / Ю. В. Зайцев, С. Н. Леонович. — Минск : БНТУ, 2010. — 362 с.

67. *Зеленков, С. Ф.* Методы получения наночастиц и нанопорошков / С. Ф. Зеленков, О. В. Пустовалов // Машины и аппараты для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ, 2006. — С. 70—74.

68. Измельчитель влажных материалов : пат. РК № 32183 / Л. А. Сиваченко, С. Ж. Багитова, И. А. Реутский, А. М. Ровский ; дата публ.: 30.06.2017.

69. Инновационный патент на изобретение РК № 29820 : Пружинная шаровая мельница / Л. А. Сиваченко, Б. А. Унаспеков, Е. Г. Голбан, С. Ж. Багитова, Т. Л. Сиваченко ; заявка № 2014/0276.1 от 15.04.2014 ; дата публ.: 28.04.2015.

70. *Картадов, Ю. М.* Прочность и деформируемость горных пород / К. М. Картадов, Б. В. Матвеев, Г. В. Михеев. — М. : Недра, 1979. — 269 с.

71. Кассетный пружинный виброуплотнитель бетонных смесей : пат. РК № 30423 / Б. А. Унаспеков, Л. А. Сиваченко, Г. М. Абдукаликова, А. П. Явенков ; дата публ.: 15.10.2015.

72. *Кирпичев, В. Л.* Беседы о механике / В. Л. Кирпичев. — М. : ГИТТЛ, 1951. — 360 с.

73. Колмогоров, В. П. Напряжения, деформации, разрушение / В. П. Колмогоров. — М. : Металлургия, 1970. — 229 с.
74. Колосов, А. С. Некоторые вопросы моделирования и оценки энергетической эффективности процессов измельчения твердых тел / А. С. Колосов // Изв. СО АН СССР. — 1985. — Вып. 2. — С. 26—39.
75. Корзун, И. М. Экспериментальные исследования рабочего процесса пружинного грохота / И. М. Корзун, Л. А. Сиваченко // Гор. механика и машиностроение. — 2019. — № 2. — С. 34—41.
76. Королев, К. М. Интенсификация приготовления бетонной смеси / К. М. Королев. — М. : Стройиздат, 1976. — 146 с.
77. Круглицкий, Н. И. Очерки по физико-химической механике / Н. И. Круглицкий. — Киев : Наук. думка, 1988. — 224 с.
78. Кулебакин, В. Г. Применение механоактивации глин для повышения качества керамики на их основе / В. Г. Кулебакин, Н. В. Влодарчик, А. С. Шагора // Механохимия и механоактивация : сб. докл. Междунар. науч. конф. — СПб., 1995. — С. 220—221.
79. Курмаз, Л. В. Детали машин. Проектирование : справ. учеб.-метод. пособие / Л. В. Курмаз, А. Т. Скойбеда. — 2-е изд., испр. — М. : Высш. шк., 2005. — 309 с.
80. Левданский, Э. И. Совершенствование процесса измельчения сильвинитовой руды перед обогащением / Э. И. Левданский, А. Э. Левданский, П. С. Гребенчук // Обогащение руд. — 2007. — № 3. — С. 3—7.
81. Левданский, Э. И. Совершенствование процесса измельчения сильвинитовой руды перед флотацией / Э. И. Левданский, И. А. Левданский // Тр. БГТУ. — 2015. — № 3 (176). — С. 152—158.
82. Левенсон, Л. Б. Дробильно-сортировочные заводы и установки / Л. Б. Левенсон, П. М. Цигельный. — М. : Стройиздат, 1952. — 420 с.
83. Линч, А. Д. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование и управление / А. Д. Линч ; пер. с англ. — М. : Недра, 1981. — 343 с.
84. Лихтман, В. Н. Влияние поверхностно активной среды на процессы деформации металлов / В. Н. Лихтман, П. А. Ребиндер, Г. В. Карпенко. — М. : Изд-во АН СССР, 1954. — 208 с.
85. Локшин, Е. С. Выбор основных параметров дорожного катка : метод. рекомендации / Е. С. Локшин, А. С. Селиванов. — М. : МАДИ, 2016. — 15 с.
86. Матчак, А. Я. Металлические проволочные щётки для отделочно-затирачных работ / А. Я. Матчак, С. В. Заковырик, Л. Г. Одинцов // Вестн. машиностроения, 1989. — № 7. — С. 51—53.
87. Молчанов, В. И. Активация минералов при измельчении / В. И. Молчанов, О. Г. Селезнева, Е. Н. Жирнов. — М. : Недра, 1988. — 208 с.
88. Моргулис, М. Л. Вибрационное измельчение материалов / М. Л. Моргулис. — М. : Промстройиздат, 1957. — 105 с.
89. Мосаков, Б. С. Основы технологии монолитного строительства / Б. С. Мосаков. — Новосибирск : СГУПС, 2003. — 258 с.
90. Наліўка, О. І. Даследаванне напружана-дэфармаванага стану драцянога рабочага элемента здрабняльнай машыны / О. І. Наліўка, С. І. Русан, Л. А. Сівачэнка // Весн. БарДУ. Сер. «Тэхнічныя навукі». — 2020. — Вып. 8 — С. 90—97.

91. *Никитин, Н. Н.* Курс теоретической механики : учеб. для машиностроит. и приборостроит. специальностей вузов. — 5-е изд., перераб. и доп. — М. : Высш. шк., 1990. — 607 с.

92. *Новик, Г. Я.* Управление свойствами горных пород в процессах горного производства / Г. Я. Новик, М. Г. Зильбершмидт. — М. : Недра, 1994. — 224 с.

93. Обработка тонкодисперсных керамических материалов в мельнице с упругодеформируемым рабочим органом / Л. А. Сиваченко [и др.] // Применение аппаратов порошковой технологии и процессов термосинтеза в народном хозяйстве : материалы Всесоюз. конф. — Томск, 1987. — С. 13.

94. *Овчинников, П. Ф.* Виброреология / П. Ф. Овчинников. — Киев : Наук. думка, 1983. — 272 с.

95. *Овчинников, П. Ф.* Методы сравнения измельчителей: сравнение различных видов измельчителей / П. Ф. Овчинников // Докл. Междунар. науч.-техн. конф. — Одесса, 1993. — Ч. 1. — С. 11—19.

96. Патент на изобретение РБ № 17513 : Смеситель-диспергатор / Л. А. Сиваченко, В. Н. Башаримова, Т. Л. Сиваченко ; заявка № а20101861 от 21.12.2010 ; дата публ.: 30.08.2012.

97. Патент на изобретение РБ № 22189 : Дробилка ударного действия / Л. А. Сиваченко, Н. В. Курочкин, А. Н. Хутенко ; заявка № а2014016 от 03.01.2014 ; дата публ.: 30.10.2018.

98. Патент на изобретение РБ № 9513 : Аппарат для просеивания зернистых материалов / Л. А. Сиваченко, О. В. Голушкова, С. С. Гаврюшин, А. А. Жуковский ; заявка № а20040918 от 07.10.2004 ; дата публ.: 30.04.2006.

99. Патент на изобретение РК № 28146 : Турбинный ветроагрегат для струйного измельчения / Б. А. Унаспеков, Л. А. Сиваченко, Е. Г. Болбан ; заявка № 2013/0420.1 от 05.04.2013 ; дата публ.: 21.01.2014 ; бюл № 1.

100. Патент на изобретение РК № 28150 : Сушилка распылительная / Б. А. Унаспеков, Л. А. Сиваченко ; заявка № 2013/0421.1 от 05.04.2013 ; дата публ.: 15.04.2015 ; бюл. № 4.

101. Патент на изобретение РК № 28434 : Пружинный классификатор цементного шлама / Б. А. Унаспеков, Л. А. Сиваченко, Т. Л. Сиваченко ; заявка № 2013/1105.1 от 21.08.2013 ; дата публ.: 15.05.2014 ; бюл. № 5.

102. Патент на изобретение РК № 28805 : Рессорно-стержневая мельница / Б. А. Унаспеков, Л. А. Сиваченко, К. Л. Сиваченко, Е. А. Шаройкина ; заявка № 2013/1101.1 от 19.08.2013 ; дата публ.: 15.08.2014 ; бюл. № 8.

103. Патент на изобретение РК №29820 : Пружинная шаровая мельница : МПК ВО2с 19/22 / Б. А. Унаспеков, Л. А. Сиваченко, Е. Г. Болбан и др. ; дата публ.: 15.05.2015 ; бюл. № 5.

104. Патент на изобретение РК № 30095 : Комбинированная установка для криоизмельчения / Б. А. Унаспеков, Л. А. Сиваченко, М. Г. Богатырев, Т. Л. Сиваченко ; заявка № 2014/1175.1 от 09.09.2014 ; дата публ.: 15.07.2015 ; бюл. № 7.

105. Патент на изобретение РК №31143 : Игольчатый измельчитель / Л. А. Сиваченко, С. Ж. Баштова, Т. Л. Сиваченко ; заявка № 2015/0303.1 от 03.03.2015 ; дата публ.: 16.05.2016 ; бюл. № 5.

106. Патент на изобретение РФ № 2024315 : Устройство для обработки рабочих и смазочных жидкостей / А. Н. Максименко, Л. А. Сиваченко, Н. Т. Селезнев ; заявка № 4943353 от 12.05.1991 ; дата публ.: 15.12.1994 ; бюл. № 23.
107. Патент на изобретение РФ № 2446015 : Установка для измельчения волокнистых материалов / С. Н. Глаголев, А. М. Гридчин, В. С. Севостьянов, А. А. Макридин, С. А. Михайличенко ; дата публ.: 15.12.94 ; бюл. № 25.
108. Патент на полезную модель РК № 1678 : Сушилка вибрационная пружинная / Л. А. Сиваченко, С. Ж. Баштова, Т. Л. Сиваченко, Ю. К. Добровольский ; заявка № 201510286.2 от 03.09.2015 ; дата публ.: 15.09.2016 ; бюл. № 11.
109. Патент на полезную модель РФ № 186478 : Вибровалковый измельчитель-активатор / В. С. Севостьянов, Л. А. Сиваченко, Л. Л. Сотник и др. ; заявка № 20181360277 от 20.08.2018 ; дата публ.: 22.01.2019 ; бюл. № 3.
110. Патент США № 4899941 : Устройство для помола : МПК6B02 C19/22 / Л. А. Сиваченко, А. М. Кургузинов, В. В. Моисеенко, 1988. — 39 с.
111. *Патури, Ф.* Растения — гениальные инженеры природы / Ф. Патури. — М. : Прогресс, 1982. — 271 с.
112. *Перов, В. А.* Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / В. А. Перов, Е. Е. Андреев, Л. Ф. Биленко. — М. : Недра, 1990. — 301 с.
113. *Пироцкий, В. З.* Технологическая оптимизация процесса измельчения и свойств цементов / В. З. Пироцкий. — М. : НИИЦемент, 1989. — Вып. 36. — С. 85—91.
114. Полиуретановые сита для грохотов [Электронный ресурс] / НПП «Уником-Сервис», Россия, г. Первоуральск. — Режим доступа: [http://www.unikom-service.ru/poliuretanovye\\_sita\\_grohotov](http://www.unikom-service.ru/poliuretanovye_sita_grohotov). — Дата доступа: 26.04.2019.
115. *Поникоров, И. И.* Расчет машин и аппаратов химических производств и нефтепереработки (примеры и задачи) : учеб. пособие / И. И. Поникоров, С. И. Поникоров, С. В. Рачковский. — М. : Альфа-М, 2008. — 720 с.
116. *Потапов, В. А.* Рабочее оборудование цепного агрегата для переработки сложных и неоднородных материалов / В. А. Потапов, Л. А. Сиваченко, М. С. Кузьменкова // Энерго- и ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительных отраслях : материалы Междунар. науч.- практ. конф. — Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2019. — С. 174—181.
117. *Потапов, В. А.* Цепной агрегат с волновой рабочей камерой и адаптивным механизмом силового воздействия для переработки влажных сырьевых материалов / В. А. Потапов, Л. А. Сиваченко // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2020. — Вып. 8. — С. 98—105.
118. *Работнов, Ю. Н.* Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов. — М. : Наука, 1988. — 712 с.
119. *Ребиндер, П. А.* Научные основы технологии производства новых материалов / П. А. Ребиндер, Н. В. Михайлов // Вестн. АН СССР. — 1961. — № 10. — С. 70—80.
120. *Ребиндер, П. А.* Поверхностные явления в дисперсных системах: физико-химическая механика : избр. тр. / П. А. Ребиндер. — М. : Наука, 1979. — 381 с.
121. *Ребиндер, П. А.* Физико-химическая механика — новая область науки / П. А. Ребиндер. — М. : Знание, 1958. — 64 с.
122. *Ребиндер, П. А.* Физико-химические исследования процессов деформации твердых тел / П. А. Ребиндер // Юбилейный сборник АН СССР к XXX-летию

Великой Октябрьской социалистической революции. — М. : Изд-во АН СССР, 1947. — Т. 1. — 333 с.

123. *Ревнивцев, В. И.* Основные закономерности изменения состояния слоя сыпучего материала при сжатии / В. П. Ревнивцев, О. П. Барзуков, Н. Н. Иванов // Обогащение руд. — 1984. — С. 3—6.

124. *Ревнивцев, В. И.* Подготовка минерального сырья к обогащению и переработке / В. И. Ревнивцев, Е. И. Азбель, Е. Г. Баранов ; под ред. В. И. Ревнивцева. — М. : Недра, 1986. — 307 с.

125. *Ревнивцев, В. И.* Технологическая минералогия обломочных малых частиц / В. И. Ревнивцев, З. Н. Доливо-Добровольская, П. С. Владимиров. — СПб. : Наука, 1992. — 248 с.

126. *Ржевский, В. В.* Основы физики горных пород / В. В. Ржевский, Г. Я. Новик. — М. : Недра, 1973. — 286 с.

127. *Ровский, А. М.* Измельчитель сырьевых материалов с цепным рабочим органом / А. М. Ровский // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Могилев, 26—27 окт. 2017 г. — Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2017. — С. 140.

128. *Родин, Р. А.* К вопросу о современном состоянии теории хрупкого разрушения горных пород / Р. А. Родин // Изв. высш. учеб. заведений горн. журн. — 1990. — № 3. — С. 66—69.

129. *Родин, Р. А.* О гипотезах дробления / Р. А. Родин // Изв. высш. учеб. заведений горн. журн. — 1989. — № 4. — С. 71—78.

130. *Родин, Р. А.* О механизации роста трещин при разрушении упругого тела / Р. А. Родин // Изв. высш. учеб. заведений горн. журн. — 1991. — № 10. — С. 5—12.

131. *Родин, Р. А.* О работе, расходуемой на дробление горных пород / Р. А. Родин // Изв. высш. учеб. заведений горн. журн. — 1987. — № 6. — С. 84—89.

132. *Родин, Р. А.* Физическая сущность процесса разрушения хрупких горных пород / Р. А. Родин // Изв. высш. учеб. заведений горн. журн. — 1991. — № 11. — С. 12—20.

133. *Романович, А. А.* Исследование влияния скорости вращения валков на выходные показатели процесса измельчения и разработка рекомендаций по повышению износостойкости их рабочих поверхностей / А. А. Романович // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2011. — № 4. — С. 71—73.

134. *Романович, А. А.* Основы расчета и проектирования пресс-валковых агрегатов для измельчения анизотропных материалов : монография / А. А. Романович, А. В. Колесников. — Белгород : БГТУ, 2011. — 165 с.

135. *Романович, А. А.* Энергосберегающие агрегаты для измельчения материалов цементного производства с анизотропной текстурой : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.13 / А. А. Романович. — Белгород, 2014. — 398 л.

136. *Рундквист, А. К.* Теория разрушения материалов / А. К. Рундквист. — М. : Недра, 1999. — 452 с.

137. *Русан, С. І.* Даследаванне прапускання здольнасці тэхналагічных пераходаў са зменнымі параметрамі / С. І. Русан, Л. Л. Сотнік // Тэхніка і тэхналогіі: інавацыі і якасць : матэрыялы V Міжнар. навук.-практ. канф., Баранавічы, 20 снеж. 2018 г. / Баранавічы, дзяр. ун-т. — Баранавічы, 2018. — С. 123—126.

138. Сапожников, М. Я. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций / М. Я. Сапожников — М. : Высш. шк., 1971. — 382 с.

139. Севостьянов, В. С. Иглофрезерные измельчители, их технологические возможности и пути развития / В. С. Севостьянов, Т. Л. Сиваченко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. — 2016. — № 2. — С. 69—77.

140. Севостьянов, В. С. Модернизация помольного оборудования участка утилизации отходов при производстве полимерной продукции строительного назначения / В. С. Севостьянов, С. А. Михайличенко, Т. Л. Сиваченко // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование : матер. межвуз. сб. ст., Белгород, 2012. вып. XI. — Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, С. 318—321.

141. Севостьянов, В. С. Научно-практические основы создания иглофрезерных измельчителей многоцелевого назначения / В. С. Севостьянов, Т. Л. Сиваченко, М. В. Севостьянов // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2018. — № 3. — С. 107—116.

142. Севостьянов, В. С. Обоснование педагогов к проектированию новых конструкция измельчителей ударного действия / В. С. Севостьянов, Т. Л. Сиваченко, Л. А. Сиваченко // Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды : сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. — Белгород : БГТУ, 2015. — С. 253—259.

143. Севостьянов, В. С. Потенциал создания конструкций и использования иглофрезерных методов дезинтеграторной обработки материалов / В. С. Севостьянов, С. А. Михайличенко, Т. Л. Сиваченко // Научно-технические технологии и инновации (XXI научные чтения) : матер. Междунар. науч.-практ. конф. — Белгород, 2014. — Ч. 4. — С. 104—109.

144. Севостьянов, В. С. Разработка энергоэффективных материалов единичных актов измельчения / В. С. Севостьянов, Т. Л. Сиваченко // XXI научные чтения : матер. Междунар. науч.-практ. конф. — Белгород, 2014. — Ч. 4. — С. 117—120.

145. Севостьянов, В. С. Результаты технологических испытаний иглофрезерного измельчителя / В. С. Севостьянов, Т. Л. Сиваченко // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ, 2017. — С. 216—220.

146. Севостьянов, В. С. Совершенствование помольных агрегатов с использованием предизмельчения / В. С. Севостьянов, В. С. Богданов, В. С. Платонов // Цемент. — 1990. — № 2. — С. 9—12.

147. Севостьянов, В. С. Технологическая эффективность переработки материалов в роторно-центробежных агрегатах / В. С. Севостьянов, С. А. Михайличенко, Т. Л. Сиваченко // Научно-технические технологии и инновации (XXI научные чтения) : матер. Междунар. науч.-практ. конф. — Белгород, 2014. — Ч. 4. — С. 110—116.

148. Севостьянов, В. С. Технологические аппараты с иглофрезерными рабочими органами для комплексной переработки композиционных материалов / В. С. Севостьянов, Т. Л. Сиваченко, С. А. Михайличенко // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2015. — № 2. — С. 50—56.

149. Севостьянов, В. С. Штифтовый способ измельчения и его развитие / В. С. Севостьянов, Т. Л. Сиваченко, Л. А. Сиваченко // Интерстроймех-2011 : матер. Междунар. науч.-техн. конф. — Могилев, 2011. — С. 196—200.

150. Селективное измельчение минералов / В. И. Ревнивцев [и др.]. — М. : Недра, 1988. — 286 с.
151. *Серго, Е. Е.* Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых : учеб. для вузов / Е. Е. Серго. — М. : Недра, 1985. — 285 с.
152. *Сиваченко, Л. А.* Адаптивные методы в природе к технике и их реализация / Л. А. Сиваченко // Научные технологии в промышленности строительных материалов : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. — Белгород : БГТУ, 2010. — Ч. 3. — С. 212—216.
153. *Сиваченко, Л. А.* Анализ изменения угла захвата в вибровалковом измельчителе / Л. А. Сиваченко, Л. Л. Сотник // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. / БГТУ им. В. Г. Шухова. — Белгород, 2017. — С. 236—241.
154. *Сиваченко, Л. А.* Анализ изменения угла захвата и межвалкового пространства в вибровалковом измельчителе / Л. А. Сиваченко, Л. Л. Сотник, И. А. Богданович // Научные стремления : сб. науч. тр. — Минск, 2017. — Вып. 22. — С. 7—11.
155. *Сиваченко, Л. А.* Анализ работы подшипниковых узлов эксцентрикового вала вибровалкового измельчителя / Л. А. Сиваченко, Л. Л. Сотник // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2017. — Вып. 5. — С. 87—92.
156. *Сиваченко, Л. А.* Вибрационные пружинные грохоты / Л. А. Сиваченко, О. В. Голушкова. — Могилев : БРУ, 2006. — 42 с.
157. *Сиваченко, Л. А.* Вибрационные пружинные мельницы / Л. А. Сиваченко, Д. М. Хононов. — Могилев : БРУ, 2006. — С. 89. — (Препринт / Бел.- Рос. ун-т).
158. *Сиваченко, Л. А.* Вибровалковый измельчитель / Л. А. Сиваченко, И. А. Богданович, Л. Л. Сотник // Научно-технические технологии и инновации (XXII научные чтения) : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Белгород, 6—7 окт. 2016 г. : в 12 ч. / БГТУ им. В. Г. Шухова ; редкол. : Е. Н. Чинова, В. Ш. Гузаиров. — Белгород : БГТУ, 2016. — Ч. 5 : Эффективные материалы, технологии и машины для строительства и эксплуатации автомобильных дорог. — С. 194—198.
159. *Сиваченко, Л. А.* Вибровалковый измельчитель зерна / Л. А. Сиваченко, В. А. Дремук, Л. Л. Сотник // Современные технологии сельскохозяйственного производства : сб. науч. ст. по материалам XX Междунар. науч.-практ. конф. — Гродно, 2017. — С. 132—134.
160. *Сиваченко, Л. А.* Вибровалковый измельчитель и основы его проектирования / Л. А. Сиваченко, И. А. Богданович, Л. Л. Сотник // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві : зб. наук. пр. / Луц. нац. техн. ун-т ; редкол. : В. І. Шваб'юк [та інш.]. — Луцьк : ЛНТУ, 2016. — Вип. 5. — С. 32—39.
161. *Сиваченко, Л. А.* Вопросы развития техники и технологии измельчения материалов / Л. А. Сиваченко, Е. А. Шаройкина, В. С. Севостьянов // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ, 2010. — С. 315—321.
162. *Сиваченко, Л. А.* Глубинные виброуплотнители бетонных смесей на основе пружинных излучателей / Л. А. Сиваченко, А. П. Явенков, Г. М. Абдукаликowa // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины : сб. науч. ст. : в 2 т. — Курск : ЮЗГУ, 2014. — Т. 1. — С. 136—141.
163. *Сиваченко, Л. А.* Глубинный виброуплотнитель бетонных смесей с пружинным излучателем колебаний / Л. А. Сиваченко, Г. М. Абдукаликowa, Т. Л. Си-

ваченко // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2015. — С. 297—300.

164. *Сиваченко, Л. А.* Дезинтеграторы технологии, их техническая обеспеченность и перспективы развития / Л. А. Сиваченко, Д. В. Титов, Т. Л. Сиваченко // Энергосберегающие технические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ, 2009. — С. 228—233.

165. *Сиваченко, Л. А.* Дробилки с многозвенными ударными элементами и пружинные грохоты для рудоподготовки / Л. А. Сиваченко, С. С. Гаврюшин, О. В. Голушкова // Обогащение руд. — 2005. — № 3. — С. 31—36.

166. *Сиваченко, Л. А.* Дробилки ударного действия с вертикальным ротором для производства строительных материалов / Л. А. Сиваченко, Е. И. Кутынка, Т. Л. Сиваченко // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2009. — № 3. — С. 26—34.

167. *Сиваченко, Л. А.* Интенсификация процессов массоподготовки при производстве силикатного кирпича // Л. А. Сиваченко, Т. Л. Сиваченко, Г. И. Чермичко // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ, 2016. — С. 322—326.

168. *Сиваченко, Л. А.* Интенсификация процессов тонкого грохочения влажных материалов / Л. А. Сиваченко, Н. В. Курочкин // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ, 2011. — С. 276—280.

169. *Сиваченко, Л. А.* Использование аппаратов с адаптивными рабочими органами для получения цементного клинкера / Л. А. Сиваченко, О. В. Голушкова, В. С. Михалков // Инженер-механик. — 2014. — № 3. — С. 43—48.

170. *Сиваченко, Л. А.* К вопросу приготовления коллоидных цементных вяжущих / Л. А. Сиваченко, М. Г. Богатырев, К. Л. Сиваченко // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ, 2008. — С. 178—181.

171. *Сиваченко, Л. А.* К выбору рациональной схемы иглофрезерного измельчителя для комплексной переработки неоднородных и сложных по составу и свойствам материалов / Л. А. Сиваченко, П. В. Силина, В. С. Севостьянов // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ, 2017. — С. 228—234.

172. *Сиваченко, Л. А.* К повышению эффективности силикатных производств / Л. А. Сиваченко, Е. И. Кутынка, К. Л. Сиваченко // Механика XXI века : ст. V межрегион. науч.-техн. конф. — Братск : БрГУ, 2006. — С. 128—132.

173. *Сиваченко, Л. А.* К разработке базовой конструкции цепного технологического агрегата / Л. А. Сиваченко, А. Н. Хустенко, В. А. Потапов // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2018. — С. 328—333.

174. *Сиваченко, Л. А.* К созданию банка аномальных эффектов интегральных технологий / Л. А. Сиваченко, Е. И. Кутынка, А. В. Жерсек // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ, 2005. — С. 128—133.

175. *Сиваченко, Л. А.* К созданию иглофрезерных рабочих органов для технологических аппаратов промышленного назначения / Л. А. Сиваченко, О. И. Наливко // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ, 2018. — С. 348—352.

176. *Сиваченко, Л. А.* К созданию силикатных заводов нового поколения / Л. А. Сиваченко // Создание и применение высокоэффективных наукоемких ресурсосберегающих технологий машин и комплексов : материалы Междунар. науч.-техн. конф. — Могилев : МГТУ, 2001. — С. 208—209.

177. *Сиваченко, Л. А.* Кассетный пружинный виброуплотнитель бетонных смесей / Л. А. Сиваченко, А. П. Явенков, Г. М. Абдукаликова // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2014. — С. 287—296.

178. *Сиваченко, Л. А.* Кинематический анализ движения эксцентрикового вала виброролкового измельчителя [Электронный ресурс] / Л. А. Сиваченко, Л. Л. Сотник, С. И. Русан // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях : Междунар. науч.-практ. конф., Белгород, 22—23 сент. 2017 г. — Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2017. — С. 298—304.

179. *Сиваченко, Л. А.* Комбинированный криоизмельчитель полимеров / Л. А. Сиваченко, М. Г. Богатырев, Д. В. Богданов // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ, 2014. — С. 265—271.

180. *Сиваченко, Л. А.* Конструкции пружинных аппаратов, опыт их промышленного использования и пути развития / Л. А. Сиваченко, М. Г. Богатырев // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ, 2010. — С. 305—311.

181. *Сиваченко, Л. А.* Математическая модель работы пружинного активатора с дебалансом / Л. А. Сиваченко, М. Г. Богатырев // Изв. ОрелГТУ. Сер. «Естественные науки». — 2006. — № 9—10. — С. 91—96.

182. *Сиваченко, Л. А.* Механоактиваторы адаптивного действия и их развитие / Л. А. Сиваченко, В. С. Севастьянов, Т. Л. Сиваченко // Вибрационные технологии и управляемые машины : сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. : в 2 ч. — Курск : ЮЗГУ, 2016. — Ч. 1. — С. 104—117.

183. *Сиваченко, Л. А.* Многофункциональный технологический агрегат с цепным рабочим оборудованием / Л. А. Сиваченко, В. А. Потапов, Т. Л. Сиваченко // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Белгород, 20—21 сент. 2018 г. — Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2018. — С. 210—215.

184. *Сиваченко, Л. А.* Новая концепция развития помольной техники / Л. А. Сиваченко // Обогащение руд. — 1994. — № 1. — С. 35—41.

185. *Сиваченко, Л. А.* Новое технологическое оборудование для переработки твердых коммунальных, строительных и промышленных отходов / Л. А. Сиваченко, Г. И. Белохвостов, Т. Л. Сиваченко // Научно-технический прогресс с жилищно-коммунальным хозяйстве : матер. Междунар. науч.-практ. конф. : в 3 ч. — Минск : БГТУ. — Ч. 2. — С. 204—211.

186. *Сиваченко, Л. А.* Новые конструкции механоактиваторов адаптивного действия для бетонных смесей / Л. А. Сиваченко, Е. А. Шаройхина, Т. Л. Сиваченко // Механизация строительства. — 2017. — № 1. — С. 11—17.

187. *Сиваченко, Л. А.* Новые технологические задачи в области процессов измельчения и пути их решения / Л. А. Сиваченко, В. С. Богданов, Ю. М. Фадин // Научно-технологические и инновационные технологии : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. — Белгород : БГТУ, 2016. — С. 172—178.

188. *Сиваченко, Л. А.* Обзор пружинных механоактиваторов / Л. А. Сиваченко, М. Г. Богатырев // Ресурсоэкономичные материалы, конструкции, здания и сооружения : сб. науч. тр. Вып. 16. — Ровно, 2008. — Ч. 1. — С. 3—10.

189. *Сиваченко, Л. А.* Основные положения совершенствования дезинтеграторных технологий / Л. А. Сиваченко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. — 2011. — № 4. — С. 95—106.

190. *Сиваченко, Л. А.* Оценка эффективности дробления вибровалкового измельчителя / Л. А. Сиваченко, А. Н. Хустенко, Л. Л. Сотник // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. — 2017. — № 4. — С. 89—97.

191. *Сиваченко, Л. А.* Переработка тонкодисперсных материалов в измельчителях с упругодеформируемым рабочим органом / Л. А. Сиваченко, А. М. Кургузиков, С. Л. Бочков // Методы получения, свойства и область применения нитридов : материалы 6 Всесоюз. семинара. — Рига, 1987. — С. 38.

192. *Сиваченко, Л. А.* Практическая реализация технологической вибротехники / Л. А. Сиваченко // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины : сб. науч. ст. : в 2 т. — Курск : ЮЗГУ, 2014. — Т. 1. — С. 100—113.

193. *Сиваченко, Л. А.* Проблемные вопросы механоактивации вязжущих веществ / Л. А. Сиваченко, М. И. Кузьменков, С. Ж. Багитова // Ударно-вибрационные системы и машины для строительной и горной отраслей : материалы VI Междунар. науч. семинара. — Орел : ОГУ им. И. С. Тургенева, 2017. — С. 202—213.

194. *Сиваченко, Л. А.* Проблемы износа рабочих гарнитур дробильно-размольного оборудования / Л. А. Сиваченко, Н. Г. Селезнев, В. А. Шуляк // Трение и износ. — 1995. — № 3. — С. 53—59.

195. *Сиваченко, Л. А.* Проблемы переработки влажных сырьевых материалов и пути их решения / Л. А. Сиваченко, В. В. Кутузов, А. М. Ровский // Инженер-механик. — 2015. — С. 16—20.

196. *Сиваченко, Л. А.* Пружинные аппараты, их технологические возможности и резервы повышения эффективности / Л. А. Сиваченко, Т. Л. Сиваченко // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ, 2011. — С. 281—289.

197. *Сиваченко, Л. А.* Пружинные виброуплотнители для глубинного уплотнения бетонных смесей / Л. А. Сиваченко, А. П. Явенков, Г. М. Абдукалива // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2013. — С. 398—402.

198. *Сиваченко, Л. А.* Пружинные мельницы, их технологические возможности и пути развития / Л. А. Сиваченко, Т. Л. Сиваченко, К. А. Яценко // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудования для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2016. — С. 332—336.

199. *Сиваченко, Л. А.* Пружинный классификатор цементного шлама / Л. А. Сиваченко, Б. А. Унаспеков, Н. Э. Богданов // Энергосберегающие технологический комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ, 2013. — С. 379—382.

200. *Сиваченко, Л. А.* Прямое использование энергии ветра в технологических процессах // Л. А. Сиваченко, А. В. Балобешко, Т. Л. Сиваченко // Энергоэффективность. — 2016. — № 12. — С. 24—27.

201. *Сиваченко, Л. А.* Разработка винтовых пружинных аппаратов для помола и смешивания, исследование рабочих процессов и разработка методов расчета основных параметров : дис. ... д-ра техн. наук : в 2 т. : 05.04.09. / Л. А. Сиваченко. — М., 1995. — Т. 1. — 452 с. ; Т. 2. — 150 с.

202. *Сиваченко, Л. А.* Реализация единичных актов разрушения материала в агрегатах ударно-стирающего действия / Л. А. Сиваченко, Н. В. Курочкин, Т. Л. Сиваченко // Ударно-вибрационные системы и машины для строительной и горной отраслей : материалы VI Международ. науч. симпозиума. — Орел : ОГУ им. И. С. Тургенева, 2017. — С. 141—146.

203. *Сиваченко, Л. А.* Результаты работы по интенсификации производства изделий из ячеистого бетона / Л. А. Сиваченко, А. Н. Хусенко // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2003. — № 6. — С. 379—381.

204. *Сиваченко, Л. А.* Создание винтовых пружинных аппаратов для помола и смешивания, исследование их рабочих процессов и разработка методов расчета основных параметров : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — М., 1995. — 47 с.

205. *Сиваченко, Л. А.* Создание винтовых пружинных аппаратов для помола и смешивания, исследование их рабочих процессов и разработка методов расчета основных параметров : дис. ... д-ра техн. наук : в 2 т. : 05.04.09 / Л. А. Сиваченко. — М., 1995. — Т. 1. — 452 с. ; Т. 2. — 150 с.

206. *Сиваченко, Л. А.* Сравнительный анализ процесса дробления силвинитовой руды в вибровалковом измельчителе на различных режимах / Л. А. Сиваченко, Л. Л. Сотник // Тр. БГТУ. — Минск : БГТУ, 2020. — № 2 (234). — С. 122—126.

207. *Сиваченко, Л. А.* Сушилка полочная с внутренним рециклом материала / Л. А. Сиваченко, Д. В. Богданов, К. Г. Аркатова // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ, 2014. — С. 261—264.

208. Технологические аппараты адаптивного действия / Л. А. Сиваченко [и др.]. — Минск : Издат. центр БГУ, 2008. — 375 с.

209. *Сиваченко, Л. А.* Технологические профессии пружин / Л. А. Сиваченко, С. С. Гаврошин // Вестн. БелГТАСМ. — Белгород, 2001. — № 1. — С. 113—119.

210. *Сиваченко, Л. А.* Технологическое машиностроение как основа передовых промышленных технологий / Л. А. Сиваченко, Т. Л. Сиваченко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. — 2016. — № 4. — С. 67—77.

211. *Сиваченко, Л. А.* Технологическое машиностроение. Инновационный резерв мировой экономики : монография / Л. А. Сиваченко, Т. Л. Сиваченко. — Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. — 254 с.

212. *Сиваченко, Л. А.* Универсальный измельчитель с многолезвийными рабочими органами / Л. А. Сиваченко, Е. И. Дерман // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ, 2016. — С. 337—341.

213. *Сиваченко, Л. А.* Управляемые вибрационные машины и технологии — основа создания новой отрасли промышленности — технологического машиностроения / Л. А. Сиваченко, Т. Л. Сиваченко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. — 2016. — № 3 — С. 74—85.

214. *Сиваченко, Л. А.* Цепные агрегаты многоцелевого назначения для переработки влажных сырьевых материалов / Л. А. Сиваченко, И. А. Реутский, А. М. Ровский // Современные технологии и методы проектирования в строительстве : сб. науч. тр. — Луцк : ЛНТУ, 2016. — Вып. 5. — С. 213—221.

215. *Сиваченко, Л. А.* Цепные технологические агрегаты многоцелевого назначения и их развитие / Л. А. Сиваченко, А. М. Ровский, И. А. Реутский // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. — 2016. — № 1. — С. 78—86.

216. *Сиваченко, Л. А.* Энерготехнологическая концепция национальной безопасности / Л. А. Сиваченко, Б. А. Унаспсков // Энергоэффективность. — 2013. — № 5. — С. 28—31.

217. *Сиваченко, Л. А.* Энерготехнологическая концепция национальной безопасности / Л. А. Сиваченко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. — 2012. — № 2. — С. 78—88.

218. *Сиваченко, Л. А.* Энерготехнологические проблемы дезинтеграторных технологий в промышленности строительных материалов и пути их решения / Л. А. Сиваченко, Т. Л. Сиваченко, Н. В. Курочкин // Энергоэффективность. — 2014. — № 12. — С. 22—25.

219. *Сиваченко, Л. А.* Энергоэффективные пружинные аппараты для совместного уплотнения и механоактивации бетонных смесей / Л. А. Сиваченко, Г. М. Абдукаликова, А. М. Утепбергера // Современные тренды в архитектуре и строительстве: энергоэффективность, энергосбережение, BIM-технологии, проблемы городской среды : материалы Междунар. науч.-практ. конф. — Алматы : КазГАСА, 2019. — С. 386—390.

220. *Сиваченко, Т. Л.* Измельчители ударного действия с рельефной поверхностью рабочих органов / Т. Л. Сиваченко // Современные технологии и методы проектирования в строительстве : сб. науч. тр. Вып. 6. — Луцк, 2017. — С. 222—228.

221. *Сиваченко, Т. Л.* Штифтовые мельницы и вопросы мехатроники их развития / Т. Л. Сиваченко // Мехатроника, роботехника: современное состояние и тенденцию развития : сб. науч. ст. Всерос. шк. для молодёжи. — Курск : ЮЗГУ, 2017. — С. 97—103.

222. *Сиденко, П. Л.* Измельчение в химической промышленности / П. Л. Сиденко. — М. : Химия, 1968. — 382 с.

223. *Сотник, Л. Л.* Анализ результатов исследований зависимости производительности от основных факторов вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2018. — Вып. 6. — С. 81—86.

224. *Сотник, Л. Л.* Анализ факторов влияющих на работу вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник // Актуальные вопросы современной науки : сб. ст. по материалам X Междунар. науч.-практ. конф, Томск, 12 марта 2018 : в 4 ч. — Уфа, 2018. — Ч. 1. — С. 157—161.

225. *Сотник, Л. Л.* Изучение влияния технологических факторов на потребляемую мощность вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник, Л. А. Сиваченко, И. А. Богданович // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. — 2018. — № 4. — С. 19—22.

226. Сотник, Л. Л. Исследование влияния отдельных факторов на степень измельченности в вибровалковом измельчителе методом математического планирования эксперимента / Л. Л. Сотник, Л. А. Сиваченко // Гор. механика и машиностроение. — 2018. — № 1. — С. 30—36.

227. Сотник, Л. Л. Исследования взаимодействия материальной точки с цилиндрическим эксцентриком / Л. Л. Сотник, С. И. Русан, Л. А. Сиваченко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. — 2018. — № 1. — С. 48—54.

228. Сотник, Л. Л. К вопросу анализа производительности вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник, Л. А. Сиваченко // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. Вып. XVII. — Белгород, 2018. — С. 162—167.

229. Сотник, Л. Л. К вопросу создания вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник, Л. А. Сиваченко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-практ. конф, Могилев, 27—28 окт. 2016 г. / Белорус.-Рос. ун-т. — Могилев, 2016. — С. 136.

230. Сотник, Л. Л. Кинематика валка вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молод. ученых, Могилев, 26—27 окт. 2017 г. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. — Могилев, 2017. — С. 214.

231. Сотник, Л. Л. Кинематический анализ эксцентрикового вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник, С. И. Русан, Л. А. Сиваченко // Ударно-вибрационные системы и машины для строительной и горной отраслей : материалы VI Междунар. науч. симпозиума, Орел, 26—27 апр. 2017 г. / редкол.: Л. С. Ушаков (гл. ред.) [и др.]. — Орел, 2017. — С. 233—241.

232. Сотник, Л. Л. Определение потребляемой мощности привода вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник // Состояние и перспективы развития химического и нефтехимического комплекса : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26—30 нояб. 2018 г. — Минск, 2018. — С. 234—238.

233. Сотник, Л. Л. Оптимальные параметры процесса измельчения доломита в вибровалковом измельчителе / Л. Л. Сотник, Л. А. Сиваченко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Могилев, 24—25 окт. 2019 г. / Белорус.-Рос. ун-т. — Могилев, 2019. — С. 146.

234. Сотник, Л. Л. Основы расчета мощности привода вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник, Л. А. Сиваченко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Могилев, 25—26 окт. 2018 г. / Белорус.-Рос. ун-т. — Могилев, 2018. — С. 146.

235. Сотник, Л. Л. Особенности работы и схема вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник, В. А. Дремук, Л. А. Сиваченко // Экономика, технологии и право в современном мире : материалы Междунар. науч.-практ. конф. фак. экономики и права и инженер. фак., Барановичи, 20 окт. 2016 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Баранович. гос. ун-т ; редкол.: А. В. Никишова (гл. ред.) [и др.]. — Барановичи, 2017. — С. 106—108.

236. Сотник, Л. Л. Селективное измельчение в вибровалковом измельчителе / Л. Л. Сотник, О. А. Кузьмина // Актуальные научные исследования в современном мире : сб. науч. тр. Вып. 11 / редкол.: В. П. Коцур (гл. ред.) [и др.]. — Переяслав-Хмельницкий, 2017. — Ч. 10. — С. 33—37.
237. Сотник, Л. Л. Экспериментальные исследования измельчения доломита в вибровалковом измельчителе / Л. Л. Сотник, Л. А. Сиваченко // Мир транспорта и технологических машин : науч.-техн. журн. — 2020. — № 2. — С. 38—46.
238. Способ уплотнения бетонных смесей : пат. РК № 28724 / Б. А. Унаспеков, Л. А. Сиваченко ; дата публ.: 15.07.2014.
239. Справочник по обогащению руд / Ю. Э. Акерман [и др.]. — М. : Недра, 1982. — 387 с.
240. Сравнение различных видов измельчителей : тезисы и доклады 1-й конф. ; под ред. П. Ф. Овчинникова : в 2 ч. — Одесса : ОВИМУ, 1993. — Ч. 1. — 130 с.
241. Сравнение различных видов измельчителей : тезисы и доклады 1-й конф. ; под ред. П. Ф. Овчинникова : в 2 ч. — Одесса : ОВИМУ, 1993. — Ч. 2. — 95 с.
242. Суворов, В. И. Опыт использования «Млын-М4» при переработке органических материалов / В. И. Суворов, О. Х. Гаджиев // Технологические проблемы измельчения и механоактивации : материалы науч.-техн. семинара стран Содружества-92. — Могилев : ММИ, 1993. — С. 43.
243. Таггарт, А. Ф. Справочник по обогащению полезных ископаемых : в 2 т. / А. Ф. Таггарт. — М. : Металлургиздат, 1950. — Т. 2. — 516 с.
244. Технологические комплексы и оборудование для переработки утилизации техногенных материалов / В. С. Севостьянов [и др.]. — Белгород : БГТУ, 2015. — 321 с.
245. Технологическая потенция машиностроения : монография / Л. А. Сиваченко [и др.]. — Нур-Султан : ЕНУ им. Л. Н. Гумилева, 2019. — 280 с.
246. Унаспеков, Б. А. Пути комплексного перевооружения промышленности и повышение их технологической и энергетической эффективности / Б. А. Унаспеков, Л. А. Сиваченко, Г. М. Абдукаликова // Вестн. Евраз. нац. ун-та им. Л. Н. Гумилева. — 2017. — Ч. 2. — № 4. — С. 243—248.
247. Установа для селективного измельчения : полезная модель РК № 1658 / Л. А. Сивачено, У. К. Кусебаев, И. А. Реутский, А. М. Ровский ; дата публ.: 15.09.2016.
248. Устройство для измельчения влажных материалов : полезная модель РК № 1598 / Л. А. Сивачено, А. М. Ровский, И. А. Реутский, У. К. Кусебаев ; дата публ.: 15.08.2016.
249. Устройство для измельчения сыпучих материалов : а. с. SU 1409326 / Л. А. Сиваченко, В. В. Моисенко, И. И. Аладьев ; дата публ.: 15.07.1988.
250. Устройство для измельчения сырьевых известковых пород : пат. ВУ 22037 / Л. А. Сивачено, А. М. Ровский, И. А. Реутский ; дата публ.: 30.10.2017.
251. Устройство для помола : пат. США № 4899941 / Л. А. Сиваченко [и др.] ; дата публ.: 18.02.1990.
252. Феодосьев, В. И. Соппротивление материалов : учеб. для вузов / В. И. Феодосьев. — М. : Наука. Гл. ред. миз. мат. лит. 1986. — 512 с.
253. Физико-химическая механика дисперсных структур : сб. науч. тр. — Киев : Наук. думка, 1986. — 264 с.
254. Финкельштейн, Б. А. О классификационных признаках различных способов дробления и измельчения и относительной перспективности соответству-

ющего оборудования / Б. А. Финкельштейн, В. А. Цукерман // Совершенствование и развитие процесса подготовки руд к обогащению : тр. Механообр. Вып. 140. — Л., 1989. — С. 19—38.

255. *Хавкин, Л. М.* Технология силикатного кирпича / Л. М. Хавкин. — М. : Стройиздат, 1982. — 384 с.

256. *Хайнике, Г.* Трибохимия / Г. Хайнике ; пер. с англ. М. Г. Гольфельда. — М. : Мир, 1987. — 594 с.

257. *Ходаков, Г. С.* Тонкое измельчение строительных материалов / Г. С. Ходаков. — М. : Стройиздат, 1972. — 238 с.

258. *Ходаков, Г. С.* Физика измельчения / Г. С. Ходаков. — М. : Наука, 1972. — 307 с.

259. *Черепанов, Г. П.* Механика хрупкого разрушения. — М. : Наука, 1974. — 712 с.

260. *Шамрай, Ф. А.* Модернизация в России / Ф. А. Шамрай // Строит. и дорож. машины. — 2012. — № 2. — С. 2—7.

261. *Шимов, В. Н.* Инновационное развитие экономики Беларуси: движущие силы и национальные приоритеты / В. Н. Шимов, Л. М. Крюков. — Минск : БГЭУ, 2014. — 199 с.

262. *Шинкоренко, С. Ф.* Решение задач дезинтеграции в горной химии / С. Ф. Шинкоренко, Ю. П. Ким, А. В. Фролов // Дробильно-размольное оборудование и технологии дезинтеграции : сб. науч. тр. — Л. : Механообр, 1989. — С. 31—40.

263. *Шонерт, К.* Измельчение отдельных частиц между двумя плоскостями / К. Шонерт, Г. Румпф // Тр. Европ. совещания по измельчению. — М. : Стройиздат, 1966. — С. 111—130.

264. *Шуляк, В. А.* Классификации механических методов измельчения и дробления дисперсных материалов: технологические проблемы измельчения и механоактивации : материалы науч.-техн. семинара / В. А. Шуляк, Л. А. Сиваченко. — Могилев, 1992. — С. 245—253.

265. *Шуляк, В. А.* Классификация механических методов измельчения и дробления дисперсных материалов: технологические проблемы измельчения и механоактивации : материалы науч.-техн. семинара / В. А. Шуляк, Л. А. Сиваченко. — Могилев, 1992. — С. 254—259.

266. *Шуляк, В. А.* Классификация механических методов измельчения и дробления дисперсных материалов: технологические проблемы измельчения и механоактивации : материалы науч.-техн. семинара / В. А. Шуляк, Л. А. Сиваченко. — Могилев, 1992. — С. 260—269.

267. *Шуляк, В. А.* Кривоизмельчение полимеров в винтовых мельницах / В. А. Шуляк, Л. А. Сиваченко, А. П. Лопатин // Механохимия и механоактивация : сб. докл. Междунар. науч. конф. — СПб., 1995. — С. 208—211.

268. *Шуляк, В. А.* Сушка и механотермическая обработка дисперсных материалов и сред / В. А. Шуляк. — Минск : Издат. центр БГУ, 2003. — 240 с.

269. *Шуляк, В. А.* Универсальные критерии сравнительной оценки измельчителей / В. А. Шуляк, Л. А. Сиваченко // Сравнение различных видов измельчителей : докл. 1-й науч.-техн. конф. — Одесса, 1993. — Ч. 1. — С. 20—23.

270. *Эберхардштайнер, Й.* Прочность и трещиностойкость конструкционных строительных материалов при сложном напряженном состоянии / Й. Эберхардштайнер, С. Н. Леонович, Ю. В. Зайцев. — Минск : БНТУ, 2013. — 522 с.

*Научное издание*

**Сиваченко** Леонид Александрович  
**Сотник** Леонид Леонидович  
**Сиваченко** Татьяна Леонидовна  
**Потапов** Владимир Александрович  
**Абдукаликва** Гулнара Момыновна  
**Корзун** Ирина Михайловна  
**Наливко** Олег Игоревич  
**Дыдышко** Иван Михайлович

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
В АППАРАТАХ АДАПТИВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Коллективная монография

*Под научной редакцией Л. А. Сиваченко*

Ответственный за выпуск А. Ю. Сидоренко  
Технический редактор Л. Н. Щербук  
Компьютерная верстка С. М. Глушак  
Корректор Н. Н. Колодко

Подписано в печать 04.12.2020. Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Гарнитура Таймс. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 21,50. Уч.-изд. л. 17,85. Тираж 100 экз. Заказ.

Издатель: Учреждение образования «Барановичский государственный университет»  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/424 от 09.09.2016.  
Ул. Войкова, 21, 225404, г. Барановичи. Тел. 8 (0163) 64 34 77, e-mail: rig@barsu.by.