

УДК 621.926

*В. С. Севостьянов, Т. Л. Сиваченко*

## ИГЛОФРЕЗЕРНЫЕ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛИ, ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПУТИ РАЗВИТИЯ

UDC 621.926

*V. S. Sevostyanov, T. L. Sivachenko*

## NEEDLE-MILLING CHOPPERS, THEIR TECHNOLOGICAL CAPABILITIES AND WAYS OF THEIR DEVELOPMENT

### **Аннотация**

Изложены проблемы измельчения сложных по составу и структуре материалов. Показана актуальность создания новых измельчительных устройств для комплексной переработки сырья и материалов. Предложена новая концепция использования стержневых элементов для разрушения твердых тел, приведены конструкции иглофрезерных измельчителей, описаны их технологические возможности и пути развития.

### **Ключевые слова:**

измельчение, иглофрезы, разрушение, энергосбережение, суспензия, эффективность, адаптивность, воздействие, единичный акт разрушения, способ измельчения.

### **Abstract**

The paper describes the problem of disintegration of materials having complex composition and structure. The urgency of creating new disintegrating equipment for complex processing of raw materials is shown. A new concept of using rod elements to disintegrate solids is offered, the designs of needle-milling choppers are given, their technological capabilities and ways of their development are described.

### **Key words:**

disintegration, needle-milling choppers, destruction, energy saving, suspension, efficiency, adaptability, effect, single act of destruction, technique of disintegration.

### **Введение**

Анализ развития технических систем для дезинтеграторной обработки дисперсных материалов показывает [1], что главными факторами, определяющими их эффективность, являются способность воздействовать на исходные системы по методу индивидуального зерна и создание в них максимальных контактных напряжений, что обеспечивается корреляцией размеров разрушаемых объектов и помольных органов.

Функционально важным свойством рабочего оборудования технологических машин является обеспечение их адаптив-

ности к переработке различных по своим характеристикам сред. При этом следует учитывать дисперсный состав продуктов, их реологические особенности, абразивность, условия обработки, в том числе влажность, температуру, чистоту готового продукта, огне- и взрывоопасность, дефектность структуры, возможность масштабирования и т. д.

Определяющим условием при создании новых конструкций помольных агрегатов является готовность научно-методической базы для их проектирования и возможности комплектации базовых узлов и рабочих органов на основе

освоенных промышленностью изделий. Авторские подходы к решению поставленных задач связаны с использованием технологической вариативности рабочих процессов и оборудования адаптивного действия [2, 3].

Основываясь на высказанных положениях, одним из вариантов повышения эффективности измельчения можно считать использование в качестве рабочих элементов металлических стержней, концы которых с одной стороны жёстко закреплены, а с другой – осуществляют воздействие на обрабатываемые материалы торцевыми частями консольных концов.

### **Основная часть**

Прогресс в области тонкого и особенно сверхтонкого измельчения связан с выполнением следующих условий [3, 4]:

- минимизацией размера мельющихся 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 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 разру-

шения материала представляют собой наборы стержневых элементов, закрепленных одним концом в держателе, а торцом свободного конца производящих обработку материала. Интенсивность такого воздействия определяется целым рядом факторов, но самым значимым из них является энергосиловой [5, 6].

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 отделки. В качестве других применений стержневых элементов можно выделить гребенки и иглы в текстильной промышленности, прошивки и пробойки в кожевенном деле, иглотерапия в медицине и множество прочих. По доступной информации использование наборов стержневых элементов для создания измельчительных машин промышленного назначения не обнаружено [6, 7].

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 [8]. 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 проведены 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 (рис. 1).

Оснастка для проведения технологических испытаний изображена на рис. 2.

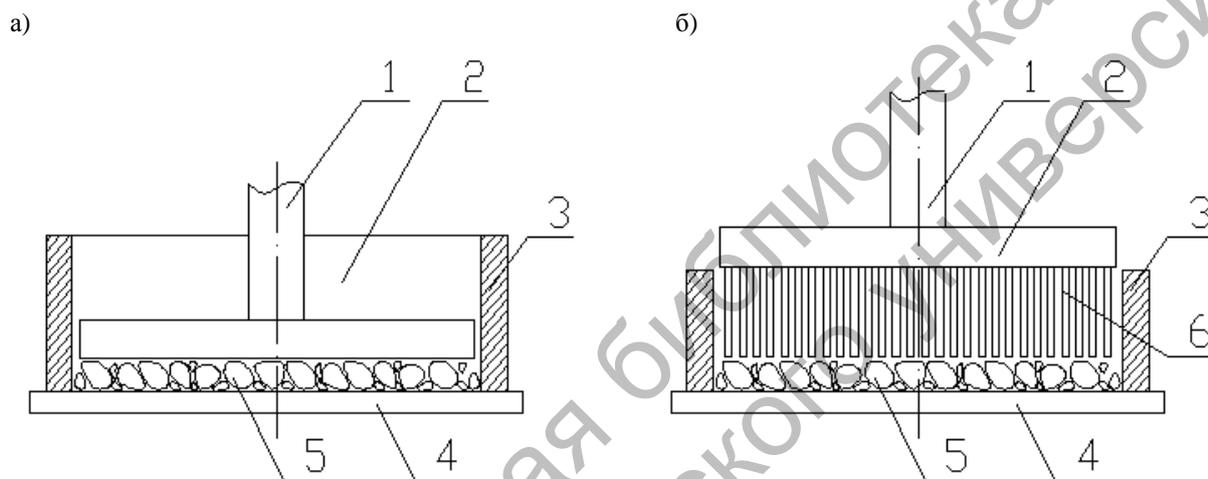


Рис. 1. Варианты элементарных актов разрушения: а – разрушение плоскими поверхностями; б – разрушение стержневыми элементами; 1 – пуансон; 2 – планшайба; 3 – оправка; 4 – основание; 5 – частицы измельчаемого материала; 6 – стержневые элементы

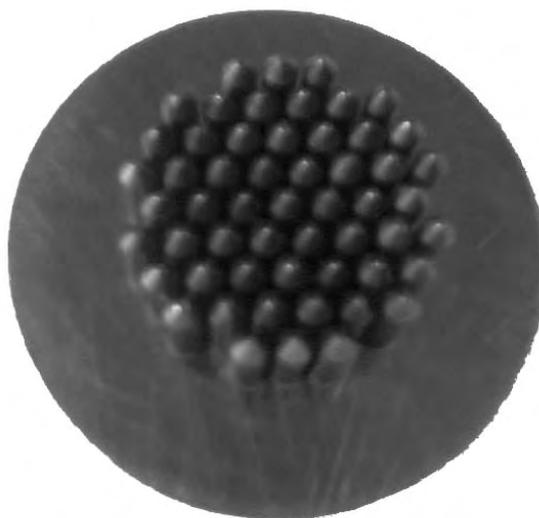


Рис. 2. Оснастка для проведения технологических испытаний

Эффективность нового механизма измельчения покажем на примере разрушения частиц кварцевого песка. Для его измельчения использовали оснастку с диаметром поверхности рабочей зоны 30 мм и плотностью оснащения стержневыми элементами рабочей поверхности около 66 %. Испытания проводились на гидравлическом прессе МС-500 при усилии сжатия 100 кН. На рабочую поверхность ровным слоем на-

сыпали кварцевый песок фракций 0,315...0,63; 0,63...1,25 и 1,25...2,5 мм в один слой толщиной, равной максимальной крупности частиц.

Количество актов разрушения для каждого случая выбиралось из необходимости получения суммарной пробы 100 г для гранулометрического анализа. Результаты измельчения песка при различных способах нагружения представлены в табл. 1.

Табл. 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)

*Примечание* – Результаты в скобках относятся к разрушению частиц между плоскими поверхностями

Анализ полученных результатов 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. Данное обстоятельство можно объяснить повышенными контактными напряжениями, которые создаются на торцах стержневых элементов. Отсюда и 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 результативно и при других видах воздействия на материал, в том числе при истирании, свободном и стесненном ударах, сдвиге и виброударном нагружении. Эти механизмы будут наиболее эффективны для переработки материалов органического происхождения.

Для выбора наилучших вариантов технологического применения механизмов единичных актов стержневого измельчения и снижения объемов поисковых исследований проведем отбор наиболее перспективных схем. Воспользуемся методом феноменологического анализа и аналогий.

Исходными условиями при этом будем считать интенсивность процесса измельчения, простоту изготовления нового оборудования, его высокую износостойкость, возможность создания аппаратов большого типоразмерного

ряда и функциональных применений.

Руководствуясь перечисленными требованиями, в качестве базовых вариантов единичных актов стержневого измельчения остановимся на схемах 1, 3, 5, 7, которые относятся к различным видам воздействия на перерабатываемые материалы. По каждому из них необходимо провести исследования, которые позволят выявить потенциальные возможности и пути их развития.

Предварительные испытания показали высокую диспергирующую способность нового механизма по обработке ряда волокнистых материалов. Конструкция отличается большим разнообразием исполнения.

На основе единичных актов стержневого измельчения разработан ряд конструкций измельчителей с иглофрезерными рабочими органами. Схемы некоторых из них представлены на рис. 3. Приведем их краткое описание.

*Схема 1.* Измельчитель истирающего действия с радиальными стержневыми элементами. Конструкция содержит основание 1, камеру для обработки материала 2 с устройствами для загрузки 3 и выгрузки 4, установленными в ней с возможностью вращения ротора 5 с рабочим органом 6, оснащенным игольчатыми элементами 7. Камера 2 имеет зоны входа 10 и выхода 11 материала из рабочего пространства, где происходит процесс измельчения. Интенсивность процесса во многом зависит от зазора между стенками рабочей камеры 2 и торцами стержней рабочего органа 6. Для управления потоками движения материала предусмотрена перегородка 12.

*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 спосо-

бу. 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 торцев 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 оснащена 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.

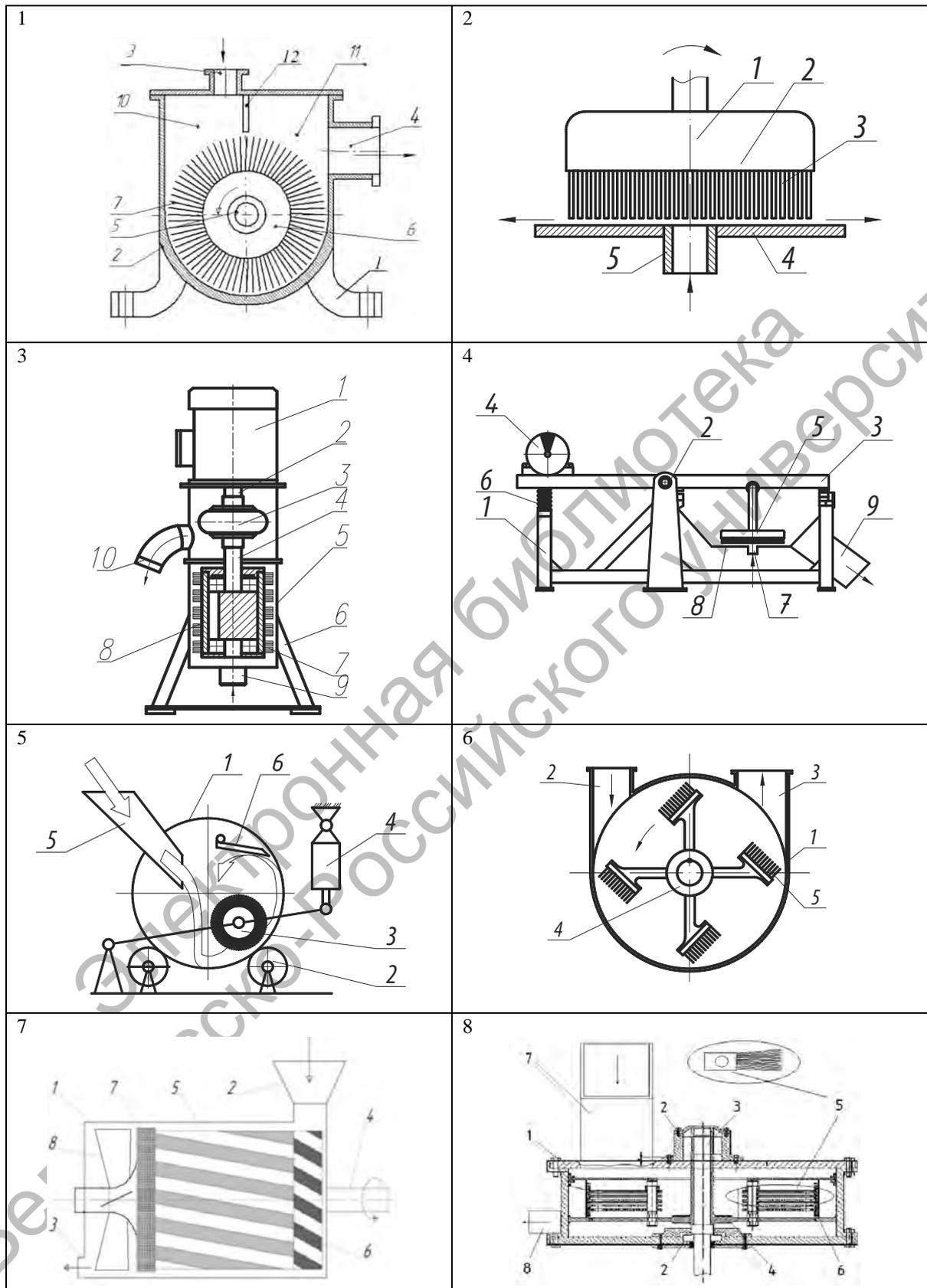


Рис. 3. Варианты конструкций измельчителей с иглофрезерными рабочими органами

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 щёток. 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.* Роторно-центробежный измельчитель. Агрегат предназначен для измельчения волокнистых материалов посредством воздействия срезом и истиранием. В рабочей камере 1, содержащей патрубки 2, 3 для загрузки и выгрузки материала, вращается вал 4 с рабочими органами: ротор с резцами 5 для помола и лопастями 6 для интенсификации захвата материала; цилиндрическая иглофрезерная насадка 7; крыльчатка для вывода измельчённого материала 8. Материал измельчается способом сдвига, среза или истирания. Комплексное воздействие на материал позволяет повысить производительность помола волокнистых материалов.

*Схема 8.* Центробежный иглофрезерный измельчитель. Представляет из себя плоский цилиндрический корпус 1 с двумя подшипниковыми опорами 2, в которых на вертикальном валу 3 закреплён ротор 4 – маховик с выполненными на нем подвижными пакетами иглофрез 5 в виде развитых режущих элементов. Ротор вращается в пространстве колосниковой решетки 6, смонтирован-

ной в корпусе установки. Подача материала осуществляется сверху через загрузочный лоток 7, а выгрузка измельченного продукта происходит в воздушном потоке, с боковой части корпуса установки через разгрузочный патрубок 8.

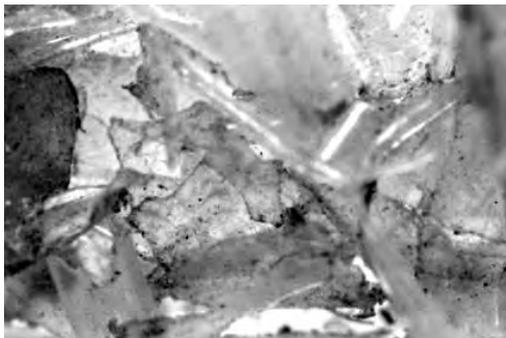
Приведенные технические решения иглофрезерных агрегатов, по сравнению с известными измельчителями аналогичного назначения, позволяют локализовать воздействие на частицы измельчаемого материала, улучшая тем самым весь процесс разрушения. За счёт таких воздействий можно обеспечить тонкий и сверхтонкий помол материала, что делает возможным применение разработанных аппаратов для целого ряда технологий, в том числе для механоактивации строительных смесей и селективного измельчения разнообразных материалов.

На макросъёмке материала, измельченного в различных агрегатах (рис. 4), видно, что характеры повреждений, наносимых ими, отличаются между собой. Поверхность твёрдого полимера (ПЭТ), размолотого игольчатым измельчителем, имеет множество царапин (надрезов), что свидетельствует об одновременном множественном контакте рабочего элемента мельницы и измельчаемой частицы материала. Повреждения от центробежно-роторного агрегата в основном заметны на торцевой стороне измельчённого материала, имеют вид резаных и рваных. Из данных наблюдений можно сделать следующие выводы: центробежно-роторный агрегат обеспечивает получение недостаточно мелкой и продолговатой фракции; игольчатый измельчитель – мелкого продукта стабильного зернового состава, а его конструкция имеет целый ряд направлений конструктивного совершенствования, а также оптимизации технологических режимов обработки материала.

При создании крупных измельчительных машин в качестве иглофрезерных элементов целесообразно использовать отрезки канатов или проволоочных жгутов. Например, такие решения хорошо реализуются в молотковых мельницах, била которых оснащаются

собираемыми в отверстия отрезками канатов и фиксируемыми клиньями, образуя ромашку (рис. 5). Для агрегатов истирающего действия или волковых машин наиболее просто рабочие органы изготавливать из секций или отдельных модулей, собираемых на роторе (рис. 6).

а)



б)

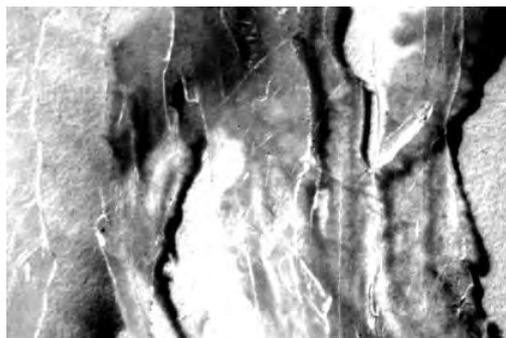


Рис. 4. Макросъёмка измельчённого твёрдого полимера: а – в роторно-центробежном агрегате; б – в игольчатом измельчителе

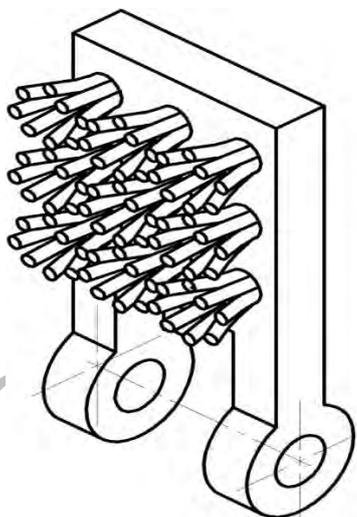


Рис. 5. Била на основе отрезков канатов



Рис. 6. Щеточный модуль измельчителя

### Заключение

Иглофрезерные измельчители, по сравнению с известными устройствами для помол материалов, обладают рядом отличительных признаков, которые способны обеспечить их эффективное использование. Рациональными облас-

тями их применения следует считать тонкий помол материалов минерального и органического происхождения без ограничения по прочности и твердости, но с учетом единичных актов разрушения.

Конструктивно-технологическое использование измельчителей с иглофрезерными рабочими органами, характе-

ризующимися развитой поверхностью воздействия на измельчаемые материалы, открывает дополнительные возможности в создании новых конструкций агрегатов для комплексной переработки техногенных материалов анизотропной структуры.

Дальнейшее развитие иглофрезерных измельчителей в первую очередь основывается на использовании опыта

применения металлических щеток, иглофрез, стержневых элементов, канатов и других упругих элементов при выполнении ими соответствующих функций, что позволит в максимально короткие сроки создавать новые конструкции измельчительных машин.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ и Правительства Белгородской области, проект № 14-41-08054 p\_офи\_м.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Горловский, И. А.** Оборудование заводов лакокрасочной промышленности / И. А. Горловский, Н. А. Козулин. – Л. : Химия, 1980. – 376 с.
2. Научные основы создания и расчет технологических комплексов для производства строительных материалов и изделий / В. С. Севостьянов [и др.]. – Белгород : БГТУ, 2011. – 190 с.
3. Вопросы развития техники и технологии измельчения материалов / Л. А. Сиваченко, В. С. Севостьянов, Т. Л. Сиваченко, Е. А. Шаройкина // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. – Белгород : БГТУ, 2010. – С. 315–321.
4. **Колосов, А. С.** Некоторые вопросы моделирования и оценки энергетической эффективности процесса измельчения твердых тел / А. С. Колосов // Изв. СО АН СССР. Сер. Химия. – Новосибирск : Наука, 1985. – С. 26–39.
5. **Севостьянов, В. С.** Штифтовый способ измельчения и его развитие / В. С. Севостьянов, Т. Л. Сиваченко, Л. А. Сиваченко // Интерстроймех-2011 : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2011. – С. 196–200.
6. **Сиваченко, Л. А.** Виброударные штифтовые мельницы / Л. А. Сиваченко, В. С. Севостьянов, Т. Л. Сиваченко // Вибрация–2010: сб. науч. ст. – Курск, 2010. – С. 52–56.
7. **Сиваченко, Т. Л.** Штифтовые мельницы и вопросы мехатроники их развития / Т. Л. Сиваченко // Мехатроника, робототехника : современные состояния и тенденции развития : сб. науч. ст. – Курск, 2011. – С. 97–103.
8. **Сиваченко, Л. А.** Создание рессорно-стержневых технологических аппаратов на основе интенсификации контактных взаимодействий их рабочих элементов / Л. А. Сиваченко, А. Б. Моисеенко, Е. А. Шаройкина // Материалы, технологии, инструменты. – 2009. – Т. 14, № 3. – С. 115–119.

*Статья сдана в редакцию 26 января 2016 года*

**Владимир Семенович Севостьянов**, д-р техн. наук, проф., Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. E-mail: sevostynov\_00@mail.ru.

**Татьяна Леонидовна Сиваченко**, соискатель, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. E-mail: tatsianamail.86@gmail.com.

**Vladimir Semenovich Sevostyanov**, DSc (Engineering), Prof. Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. E-mail: sevostynov\_00@mail.ru.

**Tatsiana Leonidovna Sivachenko**, degree applicant, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. E-mail: tatsianamail.86@gmail.com.