

Одним из перспективных направлений совершенствования технологии переработки растительного сырья является комбинирование физических эффектов с использованием как внутренних, так и внешних источников энергии.

Новая мельница-нагреватель, работа которой основана на совмещении в одном процессе сразу нескольких механизмов сушки и измельчения, отличается малой энерго- и металлоемкостью, повышенным КПД и в целом более высокой экономичностью и качеством помола.

Мельница-нагреватель для переработки растительного сырья



Комбинированная мельница-нагреватель для комплексной переработки растительного сырья

А. Б. Липилин, генеральный директор», **М. В. Векслер**, ведущий специалист,
Н. В. Коренюгина, главный технолог, завод «ТЕХПРИБОР»; **А. М. Морозов**, к. т. н., научный консультант, ООО «БИОВЕТ-ФЕРМЕНТ»

Введение

Древесная мука – продукт сухо-го механического измельчения древесины и ее отходов (стружки, опилок, щепы и прочей «неделовой» древесины), используемая в качестве наполнителя полимерных композиционных материалов, не только снижает их стоимость, но и придает им новые функциональные свойства. Так, для изделий из полипропилена или поливинилхлорида – это повышенные износостойкость и жесткость, устойчивость к воздействию УФ-излучения, более высокая скорость формования и меньшее абразивное воздействие на экструзионное и литьевое оборудование по сравнению с минеральными наполнителями. Современные пластиковые оконные профили и подоконники содержат в своем составе до 50 % древесного наполнителя.

Принцип действия новой комбинированной мельницы-нагревателя основан на том, что для повышения эффективности процесса получения древесной муки тонкого помола в аппарате одновременно используются дискретное многофакторное энергетическое воздействие на обрабатываемое сырье, пульсации давления

в локальных объемах камеры помола и высокие скорости сдвига в перерабатываемом материале. От аналогов новый аппарат выгодно отличается меньшей энерго- и металлоемкостью, высокой размольной мощностью, компактными размерами и отсутствием отдельного сушильного агрегата.

Комплексное воздействие, оказываемое комбинированной мельницей-нагревателем на перерабатываемые материалы, не может быть приписано отдельным физическим эффектам без учета их взаимодополняющего, а иногда и кумулятивного действия; однако для лучшего понимания данных процессов целесообразен их раздельный анализ на основе известного принципа «элементарных стадий». К указанным физическим эффектам относятся вихревой нагрев воздуха, «кинетическое» осушение и дискретно-непрерывное измельчение частиц исходного растительного сырья в результате энергетического разделения и «парового взрыва».

В статье обсуждаются результаты научно-экспериментальных работ по созданию высокоэффективной комбинированной мельницы-нагревателя, предназначенной для

переработки растительного сырья естественной влажности в сухие порошки с преобладающим размером частиц до десятков микрон.

Принцип «кинетического» осушения

Несмотря на относительно невысокую электрическую мощность и отсутствие внешних источников тепла, комбинированная мельница-нагреватель способна удалить из влажного материала больше воды, чем можно было ожидать, рассматривая процесс сушки исключительно с позиций нагрева и испарения жидкости. На первый взгляд такое утверждение не соответствует закону сохранения энергии, однако никакого противоречия в данном случае нет: основная часть свободной влаги удаляется за счет ее центробежного отжима и «кинетического» съема с поверхности частиц измельчаемого материала, что исключает затраты энергии на испарение влаги.

Более экономичный по сравнению с нагревом и последующим испарением жидкости ее механический отжим широко используется в различных областях техники: достаточно вспомнить отжимные шнековые

прессы [1] или обычную стиральную машину с центрифугой. Нечто подобное происходит и в быстроходных измельчителях ударного действия, например в молотковых дробилках. Однако в отличие от шнеков-прессов или центрифуг, где отделение жидкости от твердой фазы происходит на перфорированной поверхности корпуса, в быстроходных мельницах нет подобного механизма сепарации, из-за чего не выведенная из процесса влага повторно оседает на поверхности частиц, что не позволяет добиться заметного проявления эффекта «кинетического» осушения.

Для экономичной и одновременно высокопроизводительной сушки растительного сырья одновременно с его тонким помолом было необходимо интенсифицировать процесс образования новых поверхностей, чтобы связанная влага из внутренних слоев частиц материала оказывалась на вновь образованных поверхностях доступной для «кинетического» съема, а также обеспечить эффективное отделение воздушно-капельной дисперсии от твердой фазы без ее повторного увлажнения. И если первое требование связано с решением задачи о том, сколько энергии подведено к объекту и насколько полно она использована для его разрушения, то второе относится к созданию максимальной разности температур и давлений в разных областях камеры помола.

Вихревой нагрев воздушного теплоносителя

Для нагрева воздуха в комбинированной мельнице-нагревателе используется принцип температурного разделения потоков, аналогичный эффекту *Ранка*, который заключается в том, что в вихревой трубе достаточно простой геометрии (рис. 1) происходит разделение потока воздуха на два: один имеет температуру *выше* температуры исходного воздуха, а второй – *ниже*.

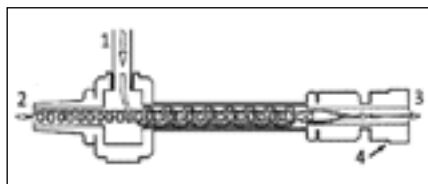


Рис. 1. Схема вихревой трубки Ранка: 1 – воздух от компрессора (около 20 °С); 2 – холодный воздух (-40 °С); 3 – горячий воздух (110 °С); 4 – регулирующий клапан

Хотя эффект температурного разделения газов был обнаружен французским инженером *Жозефом Ранком* еще в 1931 г., спустя почти 60 лет ведущие специалисты по аэродинамике вихревых течений все еще считали эффект *Ранка* «неожиданным явлением», природа которого «до сих пор недостаточно изучена» [2, с. 62]. Однозначное научное объяснение этому явлению отсутствует в доступной литературе и в настоящее время. Несмотря на это, вихревые холодильно-нагревательные аппараты как про-

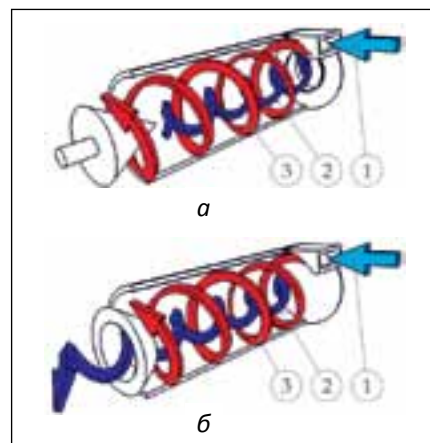


Рис. 2. Схема вихревого холодильно-нагревательного аппарата противоточного (а) и прямоточного (б) типов: 1 – воздух от компрессора; 2 – холодный воздух; 3 – горячий воздух

тивоточного, так и прямоточного типов (рис. 2) широко используются в различных отраслях промышленности, в том числе для фазового разделения газожидкостных смесей в химико-технологических процессах, подогрева пара в паротурбинных энергоустановках, энергетической сепарации доменных газов и т. д. [3, с. 126–179]. Именно конструкция вихревых трубок-энергоразделителей дает наиболее полное представление о реализованной в комбинированной мельнице-нагревателе модели осушения растительного сырья.

Указанный эффект широко используется, например, в металлургии. Так, в энергетическом сепара-

Автоматизированные линии сушки-измельчения для производства ДРЕВЕСНОЙ МУКИ ГОСТ 16361-87

- демонстрация работы
- пробные помолы
- обучение

1 300 000 рублей в базовой комплектации

Инновационная разработка - микронный помол и сушка без топлива!

www.tpribor.ru

ЗАВОД «ТЕХПРИБОР», РФ, Тульская обл., г. Щекино, ул. Пирогова д. 43; тел/факс: 8 (48751) 4-08-69; 4-87-27; e-mail: manager@tpribor.ru



ЗАВОД
«ТЕХПРИБОР»
г. ЩЕКИНО, ТУЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ



Оборудование сертифицировано

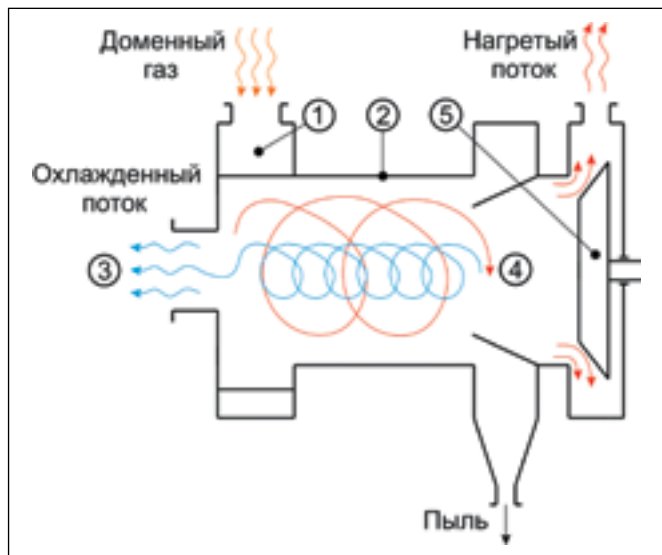


Рис. 3. Схема энергетического сепаратора: 1 – улитка соплового входа; 2 – вихревая труба; 3 – внутренний холодный поток; 4 – внешний нагретый поток; 5 – дроссельный клапан

торе, схема которого приведена на рис. 3, горячий доменный газ через улитку соплового входа 1 подается в вихревую трубу 2, где приобретает интенсивное круговое движение и разделяется на два потока. Внутренний, более холодный поток 3 не участвует в дальнейшем процессе и может быть утилизирован, а внешний поток 4, температура которого выше, чем у входящего газа, через дроссельный клапан 5 направляется в воздухонагреватель доменного дутья. Экономический эффект выражается в снижении расхода топлива за счет использования тепла перегретого газа.

Аналогичная схема температурного разделения применена и в комбинированной мельнице-нагревателе с той разницей, что для генерирования вихрей использован вращающийся ротор-импеллер, а горячий воздух внешнего вихря после выхода из кольцевого зазора дросселя повторно поступает на вход камеры помола. Таким образом, комбинированную мельницу-нагреватель можно рассматривать как частный случай *прямоточной* вихревой трубы с замкнутым горячим контуром и открытым холодным (рис. 4).

Несмотря на внешнюю простоту устройства, комбинированная мельница-нагреватель имеет высокую термодинамическую эффективность, что объясняется рециркуляцией горячего воздуха внешнего вихря через загрузочный патрубок-теплообменник, в котором входящий воздух интенсивно перемешивается с нагретым.

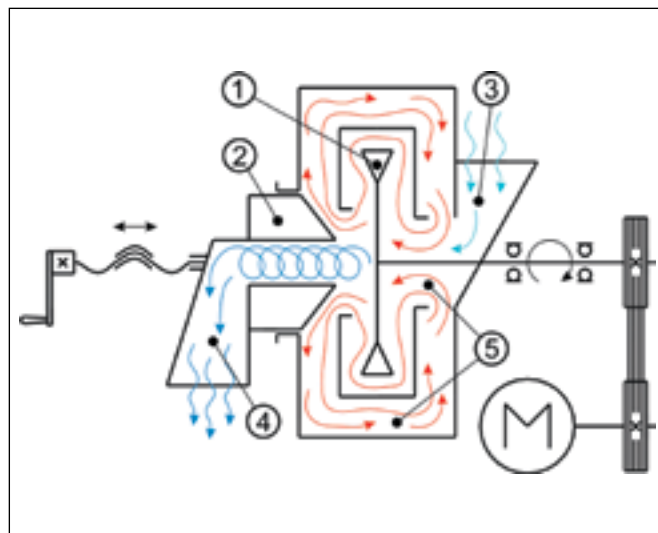


Рис. 4. Принципиальная схема комбинированной мельницы-нагревателя: 1 – ротор-импеллер; 2 – дроссельный клапан и механизм его осевого перемещения; 3 – наружный воздух; 4 – холодный поток; 5 – горячий поток

В отдельных случаях при измельчении сухих материалов в условиях высокой температуры окружающей среды комбинированная мельница-нагреватель, работающая в режиме рециркуляции горячего воздуха, вырабатывает такое количество излишнего тепла, что это может привести даже к тлению материала в камере помола. Для предотвращения подобного перегрева аппарат оснащается водяной рубашкой охлаждения и устройством регулирования границы терморазделения путем изменения радиального зазора в дроссельном клапане (рис. 5).

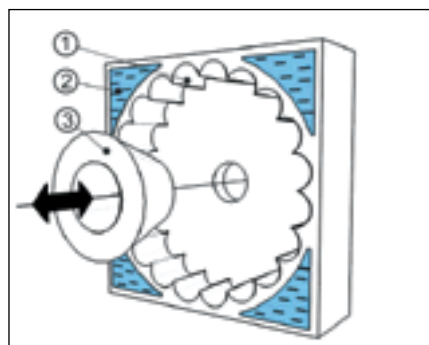


Рис. 5. Схема охлаждения комбинированной мельницы-нагревателя:

1 – профилированная камера помола с 20 пульсационными камерами; 2 – рубашка охлаждения; 3 – дроссельный клапан

Механизм измельчения

Если механизмы «кинетического» удаления свободной влаги с поверхности частиц растительных материалов и испарения внутренней капиллярной влаги в комбинированной мельнице-нагревателе достаточно хорошо понятны и объяс-

нимы, то эффект аномально низкого удельного энергопотребления, обнаруженный в ходе отработки данной конструкции мельницы, представляется более сложным и многофакторным. И насколько известно авторам данной работы, на сегодняшний день не существует общепринятой теории, способной обосновать аномально низкий расход энергии, затрачиваемой комбинированной мельницей-нагревателем на сушку и измельчение растительного сырья. Оптимизацию этих процессов проводили в ходе испытаний аппарата.

У вибрационных мельниц расход энергии на получение древесной муки с размерами частиц ≤ 100 мкм составляет 1000–1200 кВт·ч на тонну [4, с. 188–240]. При этом одним из обязательных условий применения вибромельниц является предварительное дробление сырья, а также его сушка до остаточной влажности $\leq 4\%$, что еще больше увеличивает энергозатраты на получение порошка. Эксперименты с воздушоструйными мельницами также не увенчались успехом: из-за плохой по сравнению с минеральными веществами (кварц, известняк) измельчаемости древесины эти агрегаты оказались не приспособлены для производства тонких марок древесной муки порядка 120 и меньше.

Для справки: комбинированная мельница-нагреватель на получение древесной муки указанных марок из неподготовленного, влажного сырья затрачивает в среднем 300 кВт·ч

электроэнергии, что в 3,3–4,0 раза меньше энергозатрат традиционно используемых для этих целей мельниц.

Очевидно, что для получения таких впечатляющих результатов модель разрушения частиц растительного сырья в комбинированной мельнице-нагревателе должна серьезно отличаться от моделей, реализуемых в измельчителях других типов (молотковых дробилках, ножевых размалывающих машинах, вибрационных, воздушоструйных мельницах и т. д.). Следует заметить, что на сегодняшний день ни одна из классических теорий измельчения не позволяет установить четкую количественную взаимосвязь между затратами энергии и размерами начальных и конечных частиц измельчаемого материала, особенно если размеры последних не превышают десятки микрон. Известные теории измельчения *Реттингера*, *Кирпичева* – *Кикка*, *Стендлера* подходят для расчета грубого помола хрупких материалов, однако они в недостаточной степени учитывают потери

энергии на трение частиц о рабочие поверхности мельниц и упругую деформацию исходного материала, не приводящие к его разрушению. При этом разница между расчетным и фактическим энергозатратами мельниц тонкого помола может превышать 500 % [5, с. 26–40]!

Необычно высокая степень помола (>200) растительного сырья в комбинированной мельнице-нагревателе тем более труднообъяснима с позиций механического измельчения, если учесть, что конструктивно аппарат не имеет рабочих органов, предназначенных непосредственно для прямого воздействия на частицы измельчаемого материала.

Объяснение полученному эффекту удалось найти с позиций механохимии – науки, изучающей изменение свойств материалов при их деформировании в результате интенсивного механического воздействия.

По мнению ряда исследователей [6, 7], существуют два основных физических процесса, которые возбуждают механохимические реакции в твердых телах: деформация

кристаллов (в случае растительного сырья, очевидно, волокон) и их излом. В ходе этих процессов выделяется тепло, возникают сдвиговые напряжения и деформации, обычно сопровождающиеся локальным подъемом температуры и давления, разрывом химических связей на вновь образованных поверхностях и формированием вследствие этого центров с повышенной активностью. Аналогичные выводы были сделаны *Е. Г. Аввакумовым* и для высокомолекулярных органических соединений на основе данных о механодеструкции целлюлозы при ее измельчении [7]. Результаты исследований по механохимии полимеров и высокомолекулярных соединений обобщены в обзорных работах *А. А. Берлина* [8] и *Н. К. Барамбойма* [9].

Большинство исследователей механохимии твердых тел первоочередными задачами считают определение запаса избыточной энергии и установление вида, концентрации и характера распределения дефектов. При этом наибольшее количество дефектов структуры материала

ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

ЖУРНАЛ ДЛ Я П РОФ ЕССИОНАЛОВ!

**ПОЛУЧИТЬ
НЕОБХОДИМУЮ
ИНФОРМАЦИЮ
О ПОДПИСКЕ,
ПОДПИСАТЬСЯ НА ЖУРНАЛ**

Горячая линия

☎ **8-800-200-11-12**

(бесплатный звонок из любого региона РФ)

☎ (499) 277-11-12

podpiska@vedomost.ru

Подписка по каталогам:

«Пресса России» – индекс 40871

«Роспечать» – индекс 80885

ИНТЕРНЕТ-ПОРТАЛ
www.polymerbranch.com



ПОДПИШИТЕСЬ И БУДЬТЕ В КУРСЕ ЖИЗНИ ОТРАСЛИ!

ОТКРЫТА ПОДПИСКА НА 2013 ГОД

может быть получено в измельчительных аппаратах, обеспечивающих импульсное воздействие на частицы, что является в ряде случаев объяснением кинетического характера протекания механохимических реакций [10].

На основании изложенного, а также обширного экспериментального материала, полученного в ходе разработки и отладки нового аппарата, можно сделать предположение о физике процесса измельчения растительного сырья в комбинированной мельнице-нагревателе. Большая часть введенной в объем камеры помола энергии, вероятно, не расходуется на немедленное образование новых поверхностей, а накапливается в частицах при образовании структурных дефектов. Таким образом, характер измельчения имеет ярко выраженную цикличность – сначала происходит накопление дефектов «отложенного измельчения», а по достижении критических значений – взрывное разрушение частиц.

Подобное предположение не противоречит существующей теории измельчения. *А. Б. Левенсон*, основываясь на теории *Кирпичева – Кикка*, предложил следующее упрощенное выражение для определения энергии, затрачиваемой на измельчение материала с исходным объемом V (массой G) до продукта с частицами минимальных размеров:

$$A = \frac{\sigma_p^2 \cdot V}{2E} = \frac{\sigma_p^2 \cdot G}{2E \cdot \rho},$$

где σ_p – разрушающее напряжение (предел прочности материала); E – модуль Юнга; ρ – плотность материала.

При этом степень измельчения теоретически достигает бесконечности.

Обоснованная *А. Б. Левенсоном* возможность «взрывного» разрушения всего объема измельчаемого материала подтверждается результатами экспериментов по тонкому помолу опилок хвойных пород древесины в комбинированной мельнице-нагревателе.

При исследовании микрофотографий, сделанных на сканирующем электронном микроскопе Phenom G2, образцов древесной муки, полученной при разных режимах работы экспериментального аппарата, конструкция которого предусматривала возможность установки статоров с раз-

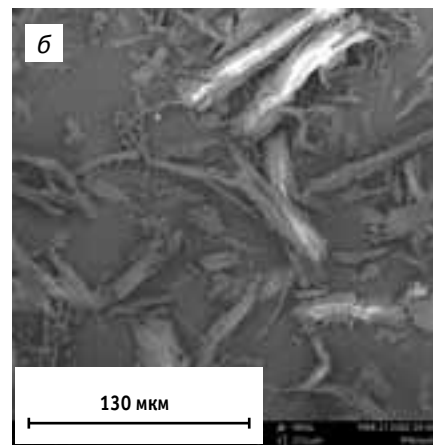
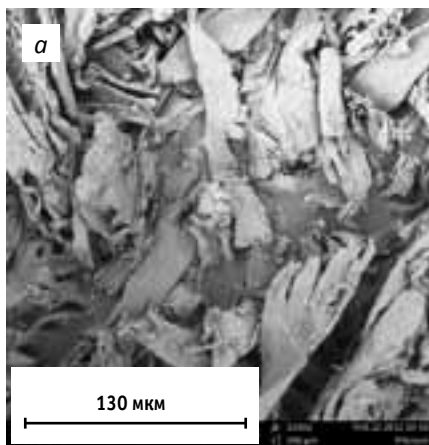


Фото 1. Электронно-микроскопические изображения древесной муки, полученной на комбинированной мельнице-нагревателе с 20 (а) и 50 (б) пульсационными камерами статора

ным количеством пульсационных камер, были отмечены существенные отличия формы и структуры поверхности частиц (данная работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного контракта № 16.522.12.2010, заключенного между указанным министерством и ООО «БИОВЕТ-ФЕРМЕНТ» по мероприятию 2.2 федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2013 годы»).

Древесная мука, полученная на средних режимах работы аппарата с 20 пульсационными камерами статора, имеет достаточно равномерный гранулометрический состав и представлена частицами чешуйчатой формы без явных следов отделения волокон (фото 1, а).

Частицы древесной муки, полученной в аппарате с 50 пульсационными камерами статора, выглядят совершенно иначе. Помимо большого количества мелких фрагментов наблюдается отделение волокон, а сами частицы выглядят более «рыхлыми» (см. фото 1, б).

Полученные порошки существенно отличались и по внешнему виду. В первом случае продукт помола представлял собой хорошо сыпучую массу цвета исходной древесины (фото 2, а), во втором это была рыхлая, «ватная» масса серо-бурого цвета (см. фото 2, б).

Наиболее вероятной причиной изменения цвета, формы и структуры поверхности частиц древесины является локальное повышение давления,

вызванное быстрым вскипанием внутренней влаги материала или «парового взрыва». Спусковым механизмом данного процесса могут являться скачки давления, которые приводят к срыву пленки пара, что резко интенсифицирует теплообмен, вызывая «микровзрывы» частиц органики. В ходе последующих экспериментов было установлено критическое число оборотов ротора-импеллера, количество и объем пульсационных камер статора, при которых достигался устойчивый эффект, по своему действию напоминающий «паровой взрыв».

В целом гипотеза об изменении цвета образцов вследствие локального «парового взрыва» дополняет высказанные ранее предположения о причинах аномально высокой размольной мощности комбинированной мельницы-нагревателя. Частичный разрыв (на критических режимах) или



Фото 2. Древесная мука, полученная в аппарате с 20 (а) и 50 (б) пульсационными камерами статора

существенное ослабление (на рабочих режимах) связей между основными элементами растительного сырья – целлюлозой, гемицеллюлозой и лигнином – значительно облегчает их дальнейшее измельчение, что и объясняет необычно высокую энергоэффективность комбинированной мельницы-нагревателя в получении сухих тонкодисперсных порошков органики.

Заключение

Представленный материал является результатом работы специалистов завода «ТЕХПРИБОР» (г. Щекино, Тульская обл.), которые на протяжении последних 5 лет занимались созданием и отладкой принципиально нового аппарата комплексной переработки растительного сырья. За это время было изготовлено большое количество единиц экспериментального оборудования, позволяющего моделировать процессы и эффекты «кинетического» осушения, вихревого нагрева воздуха, энергетического разделения частиц сырья, их дискретно-непрерывного измельчения, «парового взрыва», а также их взаимодополняющего и кумулятивного действия. На конструкцию аппарата и его основные элементы получены патенты РФ на изобретение и полезные модели.

Практическим результатом опытно-конструкторских работ стало создание промышленного аппарата и автоматизированного перерабатывающего комплекса на его основе, получившие названия «комбинированная мельница-нагреватель «С.А.М.П.О. 2012» и «компакт-линия сушки-измельчения растительного сырья «МИКРОКСИЛЕМА-ДМ» [11].

В итоге комбинированная мельница-нагреватель «С.А.М.П.О. 2012» представляет собой своего рода симбиоз роторной мельницы-дезинтегратора и механической сирени, для изготовления которой в условиях современного механосборочного производства не требуется сложных технологий и специализированного оборудования, и имеет относительно простую механическую конструкцию. При этом аппарат надежен в эксплуатации и прост в обслуживании, а ресурс его основных изнашивающихся частей вполне сопоставим со сроками

службы сменных пластин роторов молотковых мельниц, традиционно используемых для тонкого помола растительного сырья.

Литература

1. Геррман Х. Шнековые машины в технологии. / Пер. с нем. Под ред. Л. М. Фридмана. – Л.: Химия, 1975. – 232 с.
2. Гольдштик М. А., Штерн В. Н., Яворский Н. И. Вязкие течения с парадоксальными свойствами. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. – 336 с.
3. Вихревые аппараты / А. Д. Сулов, С. В. Иванов, А. В. Мурашкин, Ю. В. Чижиков. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.
4. Ходаков Г. С. Тонкое измельчение строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1972. – 240 с.
5. Сиденко П. М. Измельчение в химической промышленности. – М.: Химия, 1977. – 368 с.
6. Болдырев В. В. О некоторых проблемах механохимии неорганических веществ // Изв. СО АН СССР. Серия хим. наук. Вып. 3. 1982. № 7. – С. 3–8.
7. Аввакумов Е. Г. Механические методы активации химических процессов. 2-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск: Наука, 1986. – 306 с.
8. Берлин А. А. Механохимические превращения и синтез полимеров // Успехи химии. 1958. Т. 27. № 1. – С. 94–112.
9. Барамбойм Н. К. Механохимия высокомолекулярных соединений. – М.: Химия, 1978. – 384 с.
10. Поглощение энергии твердыми телами при измельчении в калориметрической мельнице / З. Ильген и др. // Тез. докл. VIII Всесоюзного симпозиума, Таллин, 1981. – С. 155–156.
11. Новая технология сушки и измельчения древесных отходов // Полимерные материалы. 2010. № 12. – С. 18–19.

The Combined Mill-heater for Complex Processing of Vegetative Raw Materials

*A. B. Lipilin, M. V. Vexler,
N. V. Korenjugina, A. M. Morozov*

One of perspective directions of perfection of vegetative raw materials processing is the combination of physical effects with use internal and external energy sources. The new mill-heater, which work is based on combination in one process at once several mechanisms of drying and crushing, differs small power- and the metal consumption raised by productivity and, as a whole, by higher profitability and quality of a grinding. ■

MULTIPLAS®
Technical Milling Solutions Provider

Поставщик технических услуг по формованию

ПРИМЕНЕНИЕ

V3-R
Вертикальная литьевая машина с вращающимся столом

VC
Вертикальная машина без пологого ротора, горизонтальный впуск

SM-SDF-LSR
Горизонтальная машина для литья жидких силиконовых клеев

V4-SD
Вертикальная литьевая машина с двойным столом технологического типа

Multiplas Engineering Co., Ltd.
Tel: +886-3-318-0090 Fax: +886-3-357-5438
E-Mail: sales-gp@multiplas.com.tw
www.multiplas.com.tw