

УДК 621.926.8

А.Б. ЛИПИЛИН, генеральный директор, М.В. ВЕКСЛЕР, технический директор, Н.В. КОРЕНЮГИНА, главный технолог, завод «ТЕХПРИБОР»;
А.М. МОРОЗОВ, канд. техн. наук, научный консультант ООО «БИОВЕТ-ФЕРМЕНТ» (Тульская обл.)

Тонкий помол и кинетическая сушка растительного сырья в комбинированной мельнице-нагревателе

Одним из перспективных направлений совершенствования технологии переработки растительного сырья являются методы, основанные на физических эффектах использования внутренних и внешних источников энергии. Соответствующее аппаратное оформление открывает широкие возможности повышения экономичности переработки природных материалов, в том числе органических отходов, за счет уменьшения его энерго- и металлоемкости, а также увеличения КПД оборудования, основанное на совмещении нескольких процессов в одном.

Принцип действия комбинированной мельницы-нагревателя (рис.1) основан на том, что аппарат реализует метод дискретного многофакторного энергетического воздействия на обрабатываемое сырье, а также на использовании пульсаций давления в локальных объемах камеры помола и высоких сдвиговых усилий, возникающих при относительном движении сред и фаз. Для комбинированной мельницы-нагревателя характерны ярко выраженные трибофизические эффекты.

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 методически допустимо их раздельное описание.

В ряду технологий переработки растительного сырья естественной влажности особый интерес представляет высокая эффективность комбинированной мельницы-нагревателя в получении сухих порошков, преобладающий размер частиц которых составляет десятки микрон. 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 позиции нагрева-испарения жидкости.

На первый взгляд такое утверждение нарушает закон сохранения энергии, однако никакого противоречия в данном случае нет: основная часть свободной влаги удаляется за счет ее центробежного отжима и «кинетического» съема влаги с поверхности частиц измельчаемого материала, что исключает затраты энергии на испарение.

Более экономичным по сравнению с нагревом и последующим испарением жидкости является ее механический отжим, который 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, молотковых дробилках. Однако в отличие от шнек-прессов или центрифуг, где отделение жидкости от твердой фазы происходит на перфорированной по-

верхности корпуса, быстроходные мельницы не имеют 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 сушки растительного сырья одновременно с его тонким помолом было необходимо интенсифицировать процесс образования новых поверхностей, чтобы связанная влага из внутренних слоев оказывалась на вновь образованных поверхностях доступной для «кинетического» съема, а также обеспечить эффективное отделение воздушно-капельной дисперсии от твердой фазы без ее повторного увлажнения.

Если первое требование связано в основном с количественными и качественными показателями (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.

Для нагрева воздуха в комбинированной мельнице-нагревателе используется принцип температурного раз-



Рис. 1. Мельница-нагреватель для переработки растительного сырья

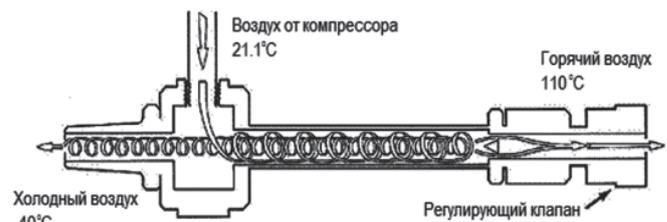


Рис. 2. Схема вихревой трубки Ранка

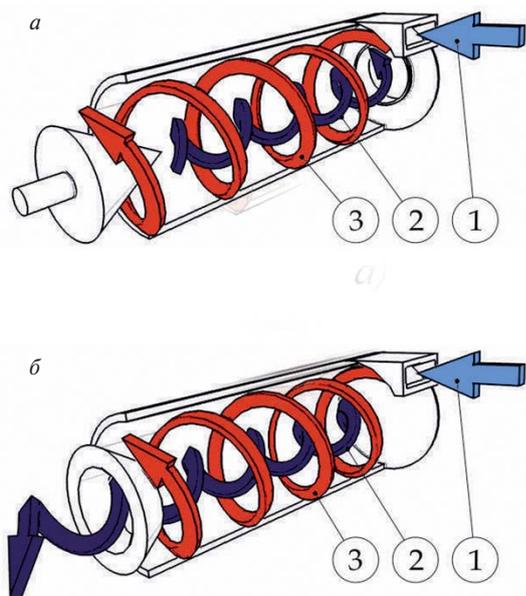


Рис. 3. Схема вихревого холодильно-нагревательного аппарата: а – противоточного типа; б – проточного типа; 1 – воздух от компрессора; 2 – холодный воздух; 3 – горячий воздух

деления потоков, аналогичный эффекту Ранка, который заключается в том, что в вихревой трубе достаточно простой геометрической формы (рис. 2) происходит разделение потока воздуха на два: один имеет температуру выше температуры исходного воздуха, а второй – ниже.

Хотя эффект температурного разделения газов был обнаружен французским инженером Жозефом Ранком еще в 1931 г., однозначного научного объяснения данному объективному явлению не существует и в настоящее время. По мнению ведущих специалистов по аэродинамике вихревых течений, эффект Ранка является «неожиданным явлением», природа которого «до сих пор недостаточно изучена» [2]. Несмотря на это, вихревые холодильно-нагревательные аппараты как противоточного, так и проточного типов (рис. 3) 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 др. [3]. Именно конструкция вихревых трубок-энергоделителей дает наиболее полное представление о реализованной в комбинированной мельнице-нагревателе модели осушения растительного сырья.

В энергетическом сепараторе, схема которого приведена на рис. 4, 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 3, не участвующий в дальнейшем процессе (может быть утилизирован); внешний 4, температура которого выше, чем у входящего газа, через дроссельный клапан 5 направляемый 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 генерации 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

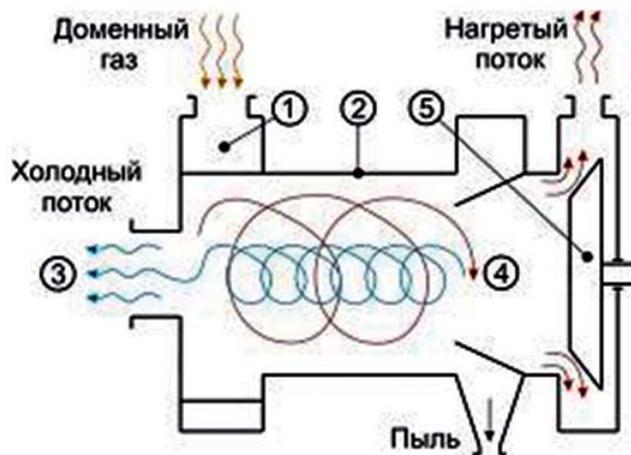


Рис. 4. Схема энергетического сепаратора: 1 – улитка соплового входа; 2 – вихревая трубка; 3 – внутренний холодный поток; 4 – внешний нагретый поток; 5 – дроссельный клапан

рассматривать как частный случай проточной вихревой трубы с замкнутым горячим контуром и открытым холодным (рис. 5).

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.

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 борьбы с чрезмерным нагревом аппарат оснащается водяной рубашкой охлаждения и устройством регулирования границы терморазделения путем изменения радиального зазора в дроссельном клапане (рис. 6).

Если механизмы «кинетического» удаления свободной влаги с поверхности частиц растительных материалов и испарения внутренней капиллярной влаги в комбинированной мельнице-нагревателе достаточно хорошо понятны, то эффект, обнаруженный в ходе отработки данной конструкции мельницы, представляется более сложным многофакторным процессом, оптимизация которого происходила в ходе испытаний аппарата. Насколько известно авторам данной работы, в настоящее время не существует общепринятой теории, способной обосновать аномально низкий расход энергии, затрачиваемой комбинированной мельницей-нагревателем на измельчение и сушку растительного сырья.

Согласно данным, приведенным в монографии д-ра физ.-мат. наук профессора Г.С. Ходакова «Тонкое измельчение строительных материалов» [4], расход энергии на получение древесной муки с размерами частиц ≤ 100 мкм у вибрационных мельниц составляет 1000–1200 кВт·ч на 1 т. При этом одним из обязательных условий применения вибромельниц является предварительное дробление сырья, а также его сушка до влажности $\leq 4\%$, что еще больше увеличивает энергозатраты на получение порошков. Эксперименты с воздуходувными 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.

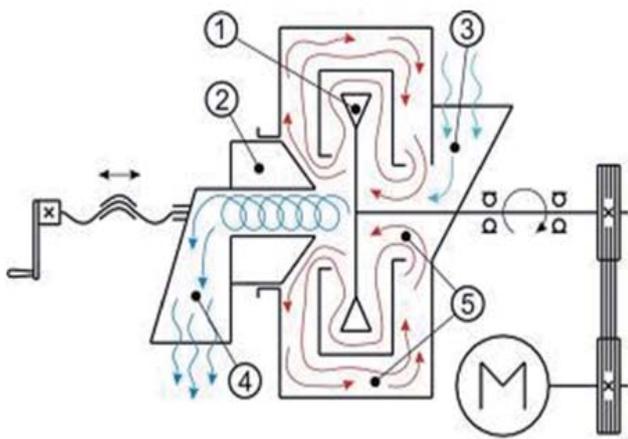


Рис. 5. Принципиальная схема комбинированной мельницы-нагревателя: 1 – ротор-импеллер; 2 – дроссельный клапан и механизм его осевого перемещения; 3 – наружный воздух; 4 – холодный поток; 5 – горячий поток

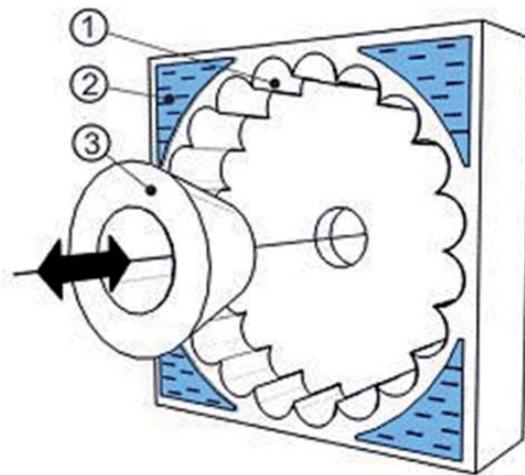


Рис. 6. Схема охлаждения комбинированной мельницы нагревателя: 1 – профилированная камера помола с 20 пульсационными камерами; 2 – рубашка охлаждения; 3 – дроссельный клапан

Комбинированная мельница-нагреватель на получение 1 т древесной муки указанных марок из неподготовленного влажного сырья затрачивает в среднем 300 кВт·ч электроэнергии, что в 3,3–4 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 и воздушоструйных мельницах и др.). К сожалению, на сегодняшний день ни одна из классических теорий измельчения не позволяет установить четкую количественную связь между затратами энергии и размерами начальных и конечных частиц измельчаемого материала, особенно если эти размеры находятся в диапазоне десятков микрон. 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 приводящих к его разрушению. При этом разница между расчетным и фактическим энергозатратам мельниц тонкого помола может превышать 500% [5].

Необычно высокая степень помола ($ДС > 200$) 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.

Для того чтобы обосновать полученный эффект, авторы были вынуждены обратиться к относительно молодому разделу науки – механохимии, изучающей изменение свойств веществ в результате интенсивного механического воздействия при их деформировании.

По мнению В.В. Болдырева [6], а также ряда других исследователей [7], существуют два основных физических процесса, которые возбуждают механохимические реакции в твердых телах: деформация кристаллов (для растительного сырья, очевидно, волокон) и их излом. В ходе этих процессов выделяется тепло, возникают сдвиговые напряжения, обычно сопровождающиеся локальным подъемом температуры и давлением, разрывом хи-

мических связей на вновь образованных поверхностях, и формирование 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 помоле [7]. Результаты исследований по механохимии полимеров и высокомолекулярных соединений обобщены в обзорных работах А.А. Берлина [8], Н.К. Барамбойма [9].

Большинство исследователей механохимии твердых тел в качестве первоочередной задачи признают определение запаса избыточной энергии и установление вида, концентрации и характера распределения дефектов. При этом наибольшее количество дефектов структуры материала 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 вышеизложенного, а также обширного экспериментального материала, полученного в ходе разработки и отладки 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 в виде 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. Л.Б. Левенсон, основываясь на теории Кирпичева – Кикка, предложил следующий упрощенный путь определения энергии, затрачиваемой на измельчение материала

$$A = \frac{\sigma^2 v}{2E} = \frac{\sigma^2 G}{2Er}$$

где σ – механическое напряжение; v – объем измельчаемого материала; E – модуль Юнга; G – модуль сдвига; r – плотность материала.

Если вместо напряжения в выражении работы упругой деформации подставить разрушающее напряжение (предел прочности материала), может быть получена работа, затраченная на разрушение всего деформируемого



Рис. 7. Электронно-микроскопическое изображение древесной муки, полученной на комбинированной мельнице-нагревателе с 20 пульсационными камерами (увеличение 1000х, размерная шкала 130 мкм)

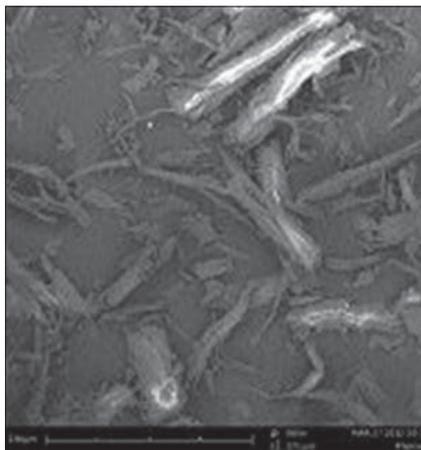


Рис. 8. Электронно-микроскопическое изображение древесной муки, полученной на комбинированной мельнице-нагревателе с 50 пульсационными камерами статора (увеличение 980х, размерная шкала 130 мкм)

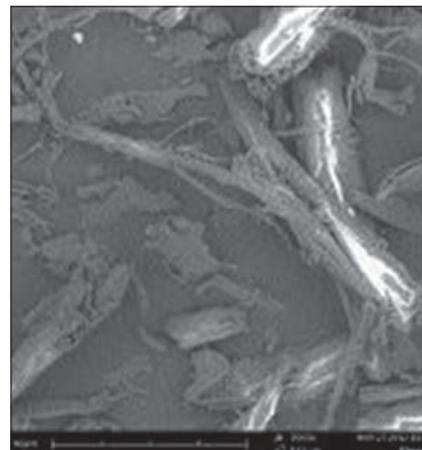


Рис. 9. Электронно-микроскопическое изображение древесной муки, полученной на комбинированной мельнице-нагревателе с 50 пульсационными камерами статора (увеличение 2000х, размерная шкала 60 мкм)

материала до продукта с частицами минимальных размеров. При этом степень измельчения теоретически достигает бесконечности.

Обоснованная Л.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 разным 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 Министерством образования и науки РФ 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, представлена частицами чешуйчатой формы без явных следов отделения волокон (рис. 7).

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 (рис. 8, 9).

Полученные порошки существенно отличались и по внешнему виду. В первом случае продукт помола представлял собой хорошо сыпучую массу цвета исходной древесины (рис. 10), во втором — это была рыхлая, «ватная» масса серо-бурого цвета (рис. 11). Возможность загрязнения образцов другими материалами полностью исключалась: после обратной установки статора с 20 пульсационными камерами из разгрузочного окна комбинированной мельницы-нагревателя снова выходила древесная мука светлых тонов. Температурный режим аппарата также был постоянным в обоих случаях, что исключает вероятность изменения цвета в результате обугливания образцов.

Наиболее вероятной причиной изменения цвета, формы и структуры поверхности частиц древесины является локальное повышение давления, вызванное быстрым вскипанием внутренней влаги материала или «парового взрыва». Пусковым 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 существенное ослабление (на рабочих режимах) связей между основными элементами растительного сырья — целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина значительно облегчает их дальнейшее измельчение, что и объясняет необычно высокую энергоэффективность комбинированной мельницы-нагревателя при получении сухих тонкодисперсных порошков органики.

Представленный материал является результатом работы специалистов завода «ТЕХПРИБОР» (г. Щекино, Тульской области), которые на протяжении последних пяти 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, 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: № 2411082, № 80773, № 110661, № 109420.

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



Рис. 10. Древесная мука, полученная в аппарате с 20 пульсационными камерами статора



Рис. 11. Древесная мука, полученная в аппарате с 50 пульсационными камерами статора

В итоге комбинированная мельница-нагреватель «С.А.М.П.О.-2012» представляет собой сейчас относительно простую механическую конструкцию, своего рода симбиоз роторной мельницы-дезинтегратора и механической сирены, для изготовления которой в условиях современного механосборочного производства не требуется сложных технологий и специализированного оборудования. 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.

Список литературы

1. Геррман Х. Шнековые машины в технологии. Л.: Химия, 1975. 232 с.
2. Гольдштик М.А., Штерн В.Н., Яворский Н.И. Вязкие течения с парадоксальными свойствами. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1989. 336 с.
3. Суслов А.Д., Иванов С.В., Мурашкин А.В., Чижиков Ю.В. Вихревые аппараты, 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, 112 с.
9. Барамбойм Н. К. Механохимия высокомолекулярных соединений. М.: Химия, 1978. 384 с.
10. Ильген З. и др. Поглощение энергии твердыми телами при измельчении в калориметрической мельнице. Тезисы докладов VIII Всесоюзного симпозиума, Таллин, 1981. С. 155–15.

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



ЗАВОД
«ТЕХПРИБОР»
г. ЩЕКИНО, ТУЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ

- демонстрация работы
- пробные помолы
- обучение

1 300 000 рублей в базовой комплектации

Инновационная разработка -
микронный помол и сушка без топлива!

www.tpribor.ru



Р
Е
К
Л
А
М
А

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



Оборудование сертифицировано