

УДК 676.154.3

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССА РОСПУСКА ДРЕВЕСНОВОЛОКНИСТЫХ ОТХОДОВ В АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СРЕДАХ

© *Н.Г. Чистова<sup>1,2</sup>, В.Н. Матыгулина<sup>1\*</sup>*

<sup>1</sup> *Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газ. Красноярский рабочий, 31 Красноярск, 660049 (Россия), e-mail: caress-lsib@rambler.ru*

<sup>2</sup> *Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, ул. Новая заря, 2г, Красноярск, 660028 (Россия)*

В работе рассмотрены результаты исследования по использованию принципиально нового оборудования (роторно-ножевой мельницы) для подготовки вторичных древесноволокнистых отходов в воздушной среде и возможности их использования в полном объеме в готовой продукции различного назначения. С целью обоснования эффективности подготовки и целесообразности использования вторичных древесноволокнистых полуфабрикатов сухим способом размола определены и исследованы физические явления и закономерности механизма процесса подготовки вторичных древесноволокнистых полуфабрикатов предлагаемым способом, характеризующие технологический процесс подготовки в воздушной среде и возможного использования их в дальнейшем в качестве полуфабрикатов или при изготовлении готовой продукции.

Исследован процесс роспуска древесноволокнистых отходов, описано механическое воздействие на древесноволокнистые отходы за счет торцово-поперечного резания (резание, мятие, сплющивание, разбивание) и аэродинамических явлений (разбивание, соударение, роспуск, фибриллирование), способствующие образованию внешнего и внутреннего фибриллирования вторичного древесного волокна, увеличение удельной поверхности при отсутствии высоких температур и давления, без добавления химических добавок, без использования воды и пара.

Выполненные исследования позволяют предложить новый способ и систему подготовки древесноволокнистых отходов сухим способом размола, обосновывая их экономическую и экологическую целесообразность.

*Ключевые слова:* древесноволокнистые отходы, размол, роспуск, фибриллирование, аэродинамическая среда, кусковые древесные отходы, древесноволокнистые полуфабрикаты.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективом научной лаборатории «Глубокой переработки растительного сырья» проекта «Технология и оборудование химической переработки биомассы растительного сырья» (Номер темы FEFE-2020-0016).*

### **Введение**

В настоящее время проблеме ресурсосбережения и повышения качественных показателей готовой продукции уделяется пристальное внимание, что подтверждается многочисленными исследованиями по поиску альтернативных решений и условий широкого вовлечения в различные производства разнотипных древесных отходов и низкокачественной продукции [1–3].

Рециклинг древесных отходов лесной промышленности тесно связан с возможностью их эффективного повторного использования в основных производствах с сохранением основных лесоматериалов, а также снижением нагрузки на экобиосферу в процессе их утилизации [4–10].

---

*Чистова Наталья Геральдовна* – профессор, доктор технических наук, e-mail: chistova\_n\_g@mail.ru  
*Матыгулина Венера Нуруллоевна* – кандидат технических наук, e-mail: caress-lsib@rambler.ru

Реально обозначается проблема не только снижения расхода сырья и материалов без снижения качества готовой продукции, но и улучшения качественных характеристик готовой продукции.

---

\* Автор, с которым следует вести переписку.

Это обусловлено постоянным ростом стоимости первичного сырья, что неизменно требует научного подхода к вопросам его комплексного использования.

Процесс подготовки древесноволокнистых отходов различных свойств и размерно-качественных характеристик оказывает определяющее влияние на показатели готовой продукции [2, 11-15]. Для размола древесного сырья используют размольные агрегаты различного типа и принципов действия. Основная задача размольных установок – это измельчение волокна и придание древесноволокнистой массе определенных свойств, обеспечивающих связеобразование в готовой продукции или другие немаловажные свойства. В зависимости от используемого способа получения древесного или целлюлозного волокна, а также вида исходного растительного сырья применяют различные типы ножевого, безножевого и комбинированного оборудования. К ножевым машинам относятся роллы, конические мельницы, молотковые мельницы, быстроходные дисковые мельницы и т.д.

Если для подготовки исходного волокнистого сырья использование ножевых размалывающих машин оправдано, то при подготовке вторичного волокна использование этих машин, на наш взгляд, нецелесообразно по следующим причинам: ранее обработанное древесное волокно вновь подвергается дополнительной рубке в рабочих органах ножевых машин; волокно с признаками ороговения не фибриллируется, исключается возможность использования вторичного сырья в полном объеме, что подтверждается результатами исследований [2, 16, 17].

Древесноволокнистые кусковые отходы, подвергавшиеся термической обработке при высоких значениях температуры и давления, представляют собой так называемое «инактивированное» волокно, при повторной обработке в быстроходных ножевых мельницах не способное вновь образовывать прочные межволоконные связи в получаемой готовой продукции ввиду так называемого «необратимого ороговения» [2, 19].

Цель настоящего исследования – научно обосновать эффективность подготовки и целесообразность использования вторичных древесноволокнистых полуфабрикатов, подготовленных сухим способом размола, при отсутствии высоких температур и давления, без добавления химических добавок, без использования пара и воды.

### ***Исследовательская часть***

Устройство для измельчения и подготовки древесноволокнистых отходов, работающее по сухому способу размола, представляет собой корпус, в котором установлен вал 3 с закрепленными на нем ножами ротора 2, расположенными в шахматном порядке. На боковых крышках корпуса регулировочными удерживающими устройствами крепится нож статора 1, имеющий два угла скоса. Внутри корпуса по образующей цилиндра устанавливается сепаратор 4 для осуществления процесса роспуска вторичных древесных волокон после размола, регулирующий время размола. Сепаратор представляет собой перфорированную металлическую сетку с разными размерами ячеек, выполняющую роль сортировочного устройства для размолотого волокна по фракциям. Сырьем для исследования были выбраны кусковые древесноволокнистые отходы (биобрак) которые подавались в виде обрезков в зазор между ножом статора 1 и ножами ротора 2, где происходил роспуск древесноволокнистых отходов в воздушной среде [19-23].

Общий вид и технические характеристики мельницы представлены на рисунке 1 и в таблице 1.

Измельчаемые отходы в виде пяточков или продольных полос подаются через загрузочное устройство в рабочую полость машины, первоначально попадая между ножами ротора и ножом статора. При этом каждый выступающий нож отрезает полоску от отходов, ширина которой равна величине установленного зазора между ножом ротора и ножом статора и толщине пяточка. В дальнейшем отрезанный слой попадает в рабочее пространство между ротором и сепаратором, где происходит разбивание, истирание, фибриллирование отрезанных пластов вдоль волокон.

В процессе разработки вторичной массы в роторно-ножевой мельнице происходит разделение полуфабрикатов на отдельные волокна без значительного их повреждения.

На рисунке 2 представлены фотографии вторичных древесных волокон, полученных размолем в воздушной среде на лабораторной установке МР-4.

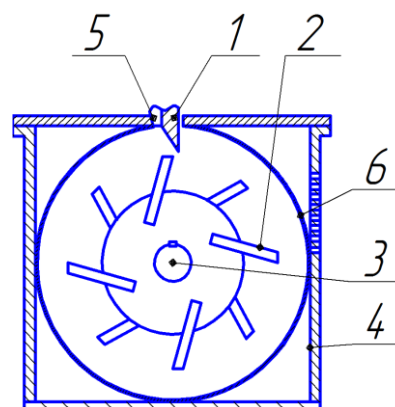


Рис. 1. Схема лабораторной размольной камеры роторно-ножевой мельницы: 1 – нож статора, 2 – нож ротора, 3 – вал, 4 – корпус, 5 – загрузочное устройство, 6 – сепаратор

Таблица 1. Техническая характеристика устройства для размола МР-4

Параметр	Значение
Высота с питателем для крупных габаритов измельчаемого материала, мм	550
Высота с питателем для широкого листового материала, мм	310
Ширина машины, мм	360
Длина машины, мм	750
Частота вращения, об/мин	980
Электродвигатель трехфазного тока:	
напряжение, В	220
мощность, кВт	2
частота вращения ротора электродвигателя, об/мин	1500
частота вращения ведущего вала устройства, об/мин	900
Масса, кг	55



а



б

Рис. 2. Фотографии вторичных древесных волокон, подготовленных размолом в воздушной среде: а – вторичное древесное волокно; б – вторичное древесное волокно при увеличении 1500 крат

Как следует из фотографий, вторичная древесноволокнистая масса, полученная из кусковых древесноволокнистых отходов (имеет в своем составе большое количество фибриллплазмы группы А и мелштоффа группы Б), хорошо разработана, встречаются волокна, у которых хорошо видны внутренние слои, внутреннее и внешнее фибриллирование, сплюснутость волокон в виде плоских лент, хорошо видны смоляные ходы. Внешнее и внутреннее фибриллирование древесных волокон, которое хорошо видно при исследовании размолотого волокна под микроскопом при увеличении 1500 крат, способствует увеличению удельной поверхности древесных волокон.

### Результаты и обсуждение исследований

В процессе исследований установлено, что процесс подготовки древесноволокнистых отходов в размольной установке, работающей по сухому способу размола, условно можно разделить на две зоны: *I* – механическое воздействие на древесноволокнистые отходы ФОС и их разделение за счет резания, мятия, сплющивания между ножами ротора и статора; *II* – роспуск, мятие, разбивание и фибриллирование вторичных древесных волокон в пространстве между ножами ротора и поверхностью сепаратора, сопровождающиеся аэродинамическими процессами.

Рабочий орган машины представляет собой сплошную ось с закрепленными на ней ножами ротора, расположенными в шахматном порядке, в процессе вращения оси с ножами ротора образуется рабочая линия цилиндра в виде очерковой, по которой осуществляется процесс измельчения в зоне I – процесс резания.

Процесс подготовки древесноволокнистых отходов в I зоне размола осуществляется по принципу торцово-поперечного резания (рис. 3).

Ножи машины 1, выступающие над поверхностью очерковой цилиндра 2 на величину  $h$  по радиусу  $R$ , вращаются с постоянной угловой скоростью  $\omega$ . Измельчаемые древесноволокнистые отходы подаются под углом  $\alpha_x$  к горизонтальной плоскости, проходящей через центр вращения  $O$  и точку встречи ножа ротора  $a$ , с древесноволокнистыми отходами.

Предположим, что в процессе резания кусковые древесноволокнистые отходы опираются на нож статора 3, имеют скорость подачи  $Vn=0$ . Тогда нож будет перемещаться в обрезке плиты (пяточке) по дуге  $ab$ , образованной кромкой ножа ротора с радиусом вращения  $R$ . Следующий нож ротора подойдет к пяточку, перемещающемуся по загрузочному устройству на величину  $aa'$ , торцовый срез при этом составит  $a'b'$ . При входе ножа ротора в древесноволокнистые отходы в виде пяточков или продольных полос длина отделяемого по направлению пучка вторичных древесных волокон составит  $l_0=h/\cos\alpha_x$ . В процессе дальнейшего перемещения ножа ротора по очерковой линии угол встречи ножа сырьем  $\varepsilon$  будет постепенно уменьшаться на величину  $\omega t$ . А угол схода древесноволокнистых отходов, который вначале был равным  $\alpha_x$ , напротив, будет постепенно увеличиваться на величину  $\omega t$ . Получаемые в размольном устройстве МР-4 вторичные древесные волокна, переменная длина которых составит  $l_0=h/\cos(\alpha_x+\omega t)$ , будут иметь переменный угол среза и будут неоднородны по размерам. С поворотом ножа статора на угол  $\varphi$ , угол встречи в точке  $b$  станет равным  $\varepsilon-\varphi$ , угол среза волокон возрастает до величины  $\alpha_x+\varphi$ . Поэтому наименьшая длина вторичного древесного волокон будет получаться на входе ножа ротора в пяточок или продольные полосы, а наибольшая – на выходе. В реальных условиях в размольной машине осуществляется непрерывная гравитационная подача сырья с определенной линейной скоростью  $Vn$  пяточка на древесные волокна в зазоре между ножами ротора и статора.

При этом каждому окружному перемещению ножа ротора по торцу пяточка соответствует определенное линейное его перемещение. Через время  $t$  от начала отсчета положение точки кромки ножа ротора определяют уравнениями параметрической форме:  $x=Vnt$ ;  $y=R \sin \omega t$ .

На наш взгляд, именно особенностью перемещения ножа ротора по торцу пяточка и разницы длины отделяемого по направлению волокон в начале и конце врезания ножа получаются размерные параметры различных фракций вторичных древесных волокон по длине. Таким образом, регулируя (изменяя, устанавливая) зазор между ножом ротора и ножом статора и угол наклона ножа статора, можно обеспечивать преобладание той или иной фракции и влиять на удельную поверхность вторичных древесных волокон, обеспечивающую связеобразование в готовой продукции.

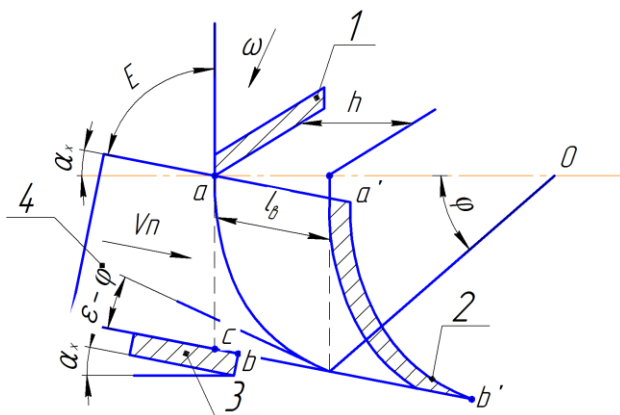


Рис. 3. Схема механизма разделения пяточка на древесные волокна в зазоре между ножами ротора и статора:  $\varepsilon-\varphi$  – угол среза волокна, град; 1 – нож ротора; 2 – цилиндр; 3 – нож статора; 4 – древесноволокнистые отходы ФОС

Вторичные древесные волокна с заданной длиной  $l_0$ , соответствующей величине отношения длины к диаметру волокна, можно получить в размольном устройстве МР-4, только с гравитационной подачей сырья, происходящей синхронно с вращением ротора, причем подача должна осуществляться в рабочую зону по касательной к корпусу машины. Скорость подачи  $Vn$  должна быть подобрана таким образом, чтобы древесноволокнистые отходы перемещались из точки  $a$  в точку  $a'$  на длину волокна  $l_0$  за время  $t=l_0/Vn$ . За этот же промежуток времени нож должен переместиться из точки  $a$  в точку  $b$  со скоростью  $Vp$ , при этом  $t=ab/Vp$ . Угол встречи контрножа с сырьем  $\varepsilon$  в данном случае останется постоянным в процессе размола. Траекторией движения ножа

в пяточке будет в этом случае не дуга, а прямая линия  $ac$ , которая через время  $t$  займет положение  $a'b$ . Таким образом, для стабильного процесса роспуска и получения заданных по длине вторичных древесных волокон в размольном оборудовании должны быть соблюдены определенные кинематические, геометрические и другие соотношения. При выходе ножа ротора из древесноволокнистых отходов в точке  $b$  следующий нож должен одновременно подойти в точку  $a$ . Если нож ротора в точку  $a$  придет с опозданием, толщина пяточка превышает величину зазора между ножами статора и ротора, то размер длины отрезаемых вторичных древесных волокон увеличится, а если раньше – уменьшится. Длина дуги  $ab$ , равная расстоянию между ножами ротора, определяется числом ножей ротора  $k$  и длиной окружности резания  $ab=2\pi R/k$ . Линейная скорость резания  $V_p$  определяется окружной скоростью  $\omega=\pi n/30$  и радиусом движения кромки ножа ротора, таким образом, основными технологическими факторами данного вида размола, оказывающим наибольшее влияние на роспуск древесноволокнистых отходов, будут являться показатели зазора между ножом ротора и ножом статора и угла встречи ножа статора с сырьем.

В процессе продвижения отрезаемого элемента пяточка между ножами ротора происходит разделение кускового элемента на пучки древесных волокон (вдоль волокна) и единичные древесные волокна, которые затем попадают в зону размола  $II$ . Движение волокон в зоне размола  $II$  осуществляется согласно законам аэродинамики.

С целью объяснения и оценки процесса подготовки вторичных древесных волокон в зоне  $II$  размольной камеры машины рассмотрены теоретические аспекты движения одномерного потока воздуха и обтекания тела вторичного древесного волокна набегающим потоком, условно приняв движение древесного волокна как жесткого кристаллического полимера.

Из зазора между ножами ротора и статора вылетают древесноволокнистые частицы различного гранулометрического состава, имеющий разный вес, объем, траекторию и скорость движения. Описать и оценить процесс движения каждого пучка древесных волокон и отдельного единичного волокна не представляется возможным. Поэтому подготавливаемый древесноволокнистый материал в размольной камере машины условно были разделены на две основные группы по их размерам: пучки и крупные древесные волокна более 1 мм и мелкие древесные волокна менее 1 мм. В процессе обработки кристаллического полимера в воздушной среде возможно формирование разнообразных надмолекулярных структур фибрилл, сферолитов, монокристаллов и т.д.

На рисунке 4 представлена схема векторов движения в воздушной среде вторичного древесного волокна как полимера (пучки и крупные древесные волокна более 1 мм).

Образование таких структур в значительной степени влияет на свойства жестких полимерных материалов, в том числе древесного волокна, переходящего из стеклообразного в высокоэластичное состояние при низкой температуре (в данном случае – комнатная температура), что обеспечивает в дальнейшем образование фибрилл при наличии ороговения. Древесное волокно с наличием ороговения состоит из более жестких цепей, которые соединяются между собой водородными связями. Разрушение водородных связей в процессе аэродинамических явлений способствует процессу фибриллирования волокон. Для крупных фракций волокна с размерами более 3 мм аэродинамические силы меньше, чем силы тяжести, таким образом, их траектория не будет совпадать с траекторией потоков внутри размольной камеры.

В зоне размола  $I$  происходит разделение вторичных древесных волокон за счет сил резания между ножами ротора и статора; зона  $II$  – роспуск, мятие, разбивание и фибриллирование вторичных древесных волокон в пространстве между ножами ротора и поверхностью сепаратора;  $\omega$  – направление вращения ротора;  $K$  – точка контакта древесного волокна;  $B_1, B_2 \dots B_n$  – точки соударения древесного волокна с поверхностью сепаратора;  $KV_k$  – вектор среднего наиболее вероятного направления полета древесного волокна;  $\delta_a$  – угол отражения вторичного древесного волокна, град.

Профиль поперечного сечения размольного сектора машины, зоны размола и распределения потока движения вторичных древесных волокон представлен на рисунке 4.

График, представленный на рисунке 5, дает представление о направлении выбрасываемого потока пучков древесных волокон, вышедших из зазора между ножами ротора и статора на внутреннюю поверхность сепаратора.

Сектор фибриллирования древесного волокна в роторно-ножевой мельнице принимаем как пространство между кромками ножами ротора и плоскостью сепаратора. В результате проникновения пяточков в рабочую зону размольной машины происходит движение древесноволокнистых отходов в зазоре между ножом

ротора и статора в зоне *I* и движение волокна после удара ножа ротора в зоне *II*. Единичное древесное волокно, как и пучок древесных волокон, является кристаллическим полимером, разрабатываемым при низких температурах. На рисунке 4 показан вектор движения скорости единичного волокна  $KV_k$  при выходе из зазора между рабочими кромками ножей ротора и статора, согласно условиям движения рабочих органов размольной машины.

Древесное волокно, попав в рабочую зону *II*, движется по касательной окружности ротора и ударяется о внутреннюю поверхность сепаратора, меняя направление движения вектора. Дальнейшее направление вектора движения вторичного древесного волокна будет определяться точками столкновения с ножом ротора, друг с другом, поверхностью тела ротора и сепаратора.

Линия  $KV_k$  есть среднее и наивероятнейшее направление полета единичного древесного волокна или пучка волокон, определяемое геометрической суммой скоростей  $V_k$  и  $V_{кр}$ . Средняя скорость вторичного древесного волокна по среднему и наивероятнейшему направлению  $KV_k$  определяется по формуле

$$v_k = \sqrt{2gH(1 - \mu \cos \alpha_x)}, \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с;  $H$  – высота падения вторичного древесного волокна по вертикали, м;  $\mu$  – коэффициент трения древесноволокнистых отходов по стенке загрузочного устройства;  $\alpha_x$  – угол падения древесноволокнистых отходов в размольную камеру, град.

Радиусы-векторы от точки  $K$  до пересечения с кривой *I* отображают величины плотностей вероятности полета древесного волокна в заданном направлении. Различные коэффициенты восстановления, зависящие не только от упругих свойств материала, но и от формы и массы соударяющихся тел, при неправильной форме и различных размерах древесных волокон обуславливают значительный разброс углов отражения, увеличивающийся в результате других случайных факторов процесса размола. При ударах со скоростями от 6 до 64 м/с и углах падения от 10 до 60 °С использованием скоростной киносъемки установлено, что между углом отражения и средним отношением с одной стороны и углом падения с другой стороны существует достаточно тесная стохастическая (вероятностная) связь [17].

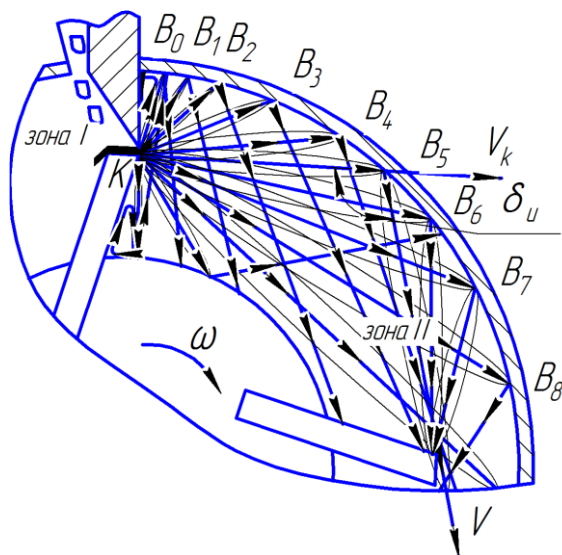


Рис. 4. Схема векторов движения в воздушной среде вторичного древесного волокна как элемента жесткого полимера

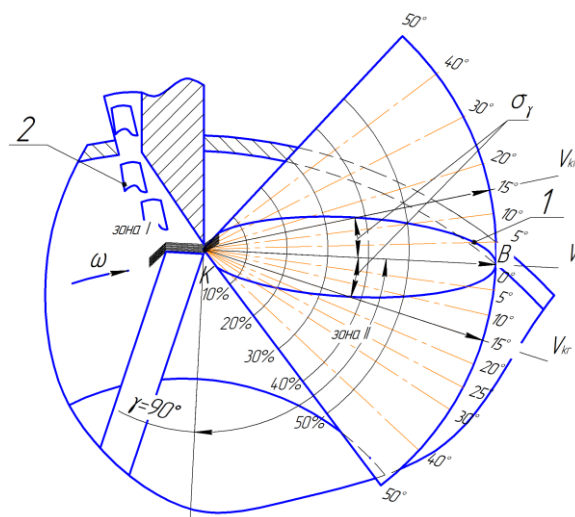


Рис. 5. График распределения потока крупных древесных волокон в зоне II:  $\sigma_\gamma$  – среднее квадратическое отклонение  $Kv$ ;  $V_{кр}$  – касательная скорость движения вторичного древесного волокна, м/с; *I* – кривая, обозначающая границы вероятностей полета вторичного древесного волокна в заданном направлении; *2* – древесноволокнистые отходы

$$K_v = v_k/v, \quad (2)$$

где  $K_v$  – коэффициент потери скорости вторичного древесного волокна при ударе о поверхность сепаратора;  $v$  – скорость древесного волокна, отраженного от сепаратора, м/с.

Как следует из формулы (2), стохастическая связь между средним значением отношения, которое можно назвать коэффициентом потери скорости вторичного древесного волокна при ударе о поверхность сепаратора  $K_v$  и углом падения  $\varphi$ , выражается эмпирической формулой

$$K_v = \frac{1-k}{90^\circ} \varphi + k, \quad (3)$$

где  $k$  – условный коэффициент восстановления;  $\varphi$  – угол падения вторичного древесного волокна, град.

Из формулы (3) следует, что  $K_v = k$  при  $\delta v = 0$  представляет собой величину, подобную коэффициенту восстановления упругих деформаций в полимере – в древесном волокне.

Направления полета вторичного древесного волокна при выходе из рабочего зазора между ножами ротора и статора распределяются по нормальному закону с центром распределения  $KV_k$ , направленным под углом  $\bar{\gamma} = 90^\circ$  к радиусу ротора, и средним квадратическим отклонением  $\sigma\gamma = 22.3^\circ$  [17], которое с достаточной точностью можно принять постоянными, не зависящими от частоты вращения ротора и зазора между ножами ротора и статора. Угол  $\bar{\gamma}$  при  $V_p = 30$  м/с составляет  $90^\circ$  и увеличивается с возрастанием окружной скорости примерно на  $4^\circ$  на каждые 10 м/с. Для практических расчетов можно принять  $\bar{\gamma} = 90^\circ$  независимо от величины  $V_p$ .

Фракционный состав древесных волокон, выбрасываемых из зазора между ножами ротора и статора, неодинаков и варьируется в широких пределах. Размеры фракций древесного волокна в значительной степени будут определять направление и скорость их движения.

Значения  $K_v$  для отдельных вторичных древесных волокон варьируются со средним квадратическим отклонением  $\sigma_{K_v}$ , убывающим с увеличением угла падения по следующей зависимости:

$$\sigma_{K_v} = 0,17 - \frac{\varphi^2}{46800}. \quad (4)$$

Кинетическая энергия ударяющегося вторичного древесного волокна о поверхность сепаратора и нож ротора, частично расходуется на его фибриллирование, чем значительнее эта потеря, тем больше расходуется энергия на разработку волокна. Уравнение (5) позволяет вычислить потерю энергии вторичного древесного волокна при ударе о внутреннюю поверхность сепаратора, т.е. энергию, расходуемую на фибриллирование. Отнеся потерянную энергию к запасу кинетической энергии до удара, получим коэффициент использования кинетической энергии вторичного древесного волокна (древесного пучка)  $m_k$  массой на разрушение:

$$K_3 = \frac{\frac{m_k v^2}{2} - \frac{m_k v_k^2}{2}}{\frac{m_k v^2}{2}} = 1 - K_v^2 = 1 - \left[ (1-k) \frac{\varphi}{90^\circ} + k \right]. \quad (5)$$

При углах падения  $0 < \varphi < 15^\circ$   $K_3 = 0.91-0.97$ , т.е. от 91–97% запаса энергии вторичного древесного волокна может быть использовано на разрушение. При углах  $\varphi < 15^\circ$  коэффициент  $K_3$  резко снижается. При угле  $\varphi = 0^\circ$  эффект использования кинетической энергии вторичного древесного волокна будет наибольшим.

Таким образом, можно отметить, что влияние процесса роспуска древесноволокнистых отходов в воздушной среде на размерно-качественные характеристики вторичных древесных волокон, по нашему мнению, осуществляется за счет соударения вторичного древесного волокна в размольной камере установки. Именно соударения, эффект накопления комплекса напряжений и энергии единичных вторичных древесных волокон позволяют получать магистральные трещины и способствовать образованию внешнего и внутреннего фибриллирования в отсутствие температуры и высоких давлений.

Траектория движения для мелких древесных волокон (менее 1 мм), вылетающих из зазора между ножами ротора и статора размольной гарнитуры мельницы, на наш взгляд, соответствует движению аэродинамических потоков, создаваемых размольными ножами роторно-ножевой мельницы. Для мелких фракций с

размерами менее 1 мм аэродинамические силы в десятки и сотни раз будут большими, чем силы тяжести, таким образом, их траектория будет совпадать с траекторией потоков внутри размольной камеры.

С целью описания траекторий движения потоков внутри размольной камеры были проведены наблюдения визуального характера (с подкрашиванием массы порошковой краской), на основании которых можно отметить, что потоки воздуха с древесными волокнами движутся хаотично, изменяя свое направление и плотность в зависимости от геометрии размольной гарнитуры. Таким образом, в камере размольной машины траектория движения потока приближена к турбулентному при установившемся режиме.

Экспериментальные исследования структуры потоков в аппаратах с перемешивающими устройствами различных авторов показали, что перемешивающие устройства создают сложный характер движения потоков в трехмерном пространстве [24]. По нашему мнению, именно сложный характер движения потоков большой скорости с древесными волокнами обеспечивает во второй зоне размольной установки образование вихревых потоков и зон циркуляции (в процессе чего за определенный промежуток времени происходит роспуск древесноволокнистых отходов). Более плотное движение потоков воздуха с древесными частицами сконцентрировано на кромках и пазах размольных ножей ротора. В углах движение воздушных потоков распространяется по эллипсоидной замкнутой траектории неправильной формы и условные радиусы этих эллипсоидов будут увеличиваться в зависимости от удаления движения волокна в потоке от конструктивных элементов рабочих органов ножа ротора (паз, выступ). Траектории движения древесных волокон по спиральям эллипса с неправильной формой неизбежно накладываются друг на друга. В результате происходит столкновение и соударение древесных волокон. В ходе вышеуказанных процессов возникают и накапливаются напряжения различного характера внутри древесных волокон, в результате чего образуется магистральная трещина на волокнах. В результате имеет место внутреннее и внешнее фибриллирование, способствующие увеличению удельной поверхности волокон, несмотря на то, что на них присутствует ороговение.

Сам факт движения вторичного древесного волокна в размольной камере роторно-ножевой мельницы можно понять, рассмотрев и приняв теоретические аспекты движения одномерного потока воздуха и обтекания тел древесных волокон набегающим потоком.

На основании изложенного подтверждаются наши предположения о том, что изменение скоростей и направление движение потока и соударение единичных древесных волокон позволяет получать фибриллированное вторичное древесное волокно в отсутствии высоких температур и давления, без добавления химических добавок, без использования воды и пара.

Согласно представленным теоретически исследованиям можно определить такие технологические и конструктивные параметры размольной установки, работающей по сухому способу размола, при которых процесс подготовки древесноволокнистых полуфабрикатов будет эффективен.

### **Выводы**

В процессе исследования определена сущность явлений процесса подготовки древесноволокнистых отходов в воздушной среде. Описано механическое воздействие на древесноволокнистые отходы за счет торцово-поперечного резания (резание, мятие, сплющивание, разбивание) и аэродинамических явлений (роспуск, фибриллирование), способствующие образованию внешнего и внутреннего фибриллирования вторичного древесного волокна, увеличивающих удельную поверхность в отсутствии высоких температур и давления, без добавления химических добавок, без использования воды и пара.

Теоретические исследования, подтвержденные экспериментально, позволяют обосновать использование предлагаемого способа и системы подготовки древесноволокнистых отходов в воздушной среде и в полном объеме использовать их при получении готовой продукции.

Данное оборудование возможно использовать в производственных условиях для подготовки вторичных древесноволокнистых полуфабрикатов. Данный способ размола позволит сократить трудозатраты на их подготовку, уменьшить удельный расход электроэнергии, в среднем, 4–6% и себестоимость готовой продукции в целом.

*Выражаем благодарность Красноярскому региональному центру коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН за поддержку в проведении исследований.*



**Список литературы**

1. Zhang D., Zhang A., Xue L. A review of preparation of binderless fiberboards and its self-bonding mechanism // Wood Sci Technol. 2015. Vol. 49. Pp. 661–679. DOI: 10.1007/s00226-015-0728-6.
2. Чистова Н.Г. Переработка древесных отходов в технологическом процессе получения древесноволокнистых плит: дис. ... докт. техн. наук. Красноярск, 2010. 415 с.
3. Чистова Н.Г. Производство древесноволокнистых плит сухим способом // Химия растительного сырья. 2009. №2. С. 141–144.
4. Ackermann K., Götsching L. and Pakarinen H. The Potential of Recycled Fiber in Papermaking // Recycled Fiber and Deinking. Ed. L. Götsching, H. Pakarinen. Papermaking Sci. Technol. Ser. 2000, Ch. 10, Pp. 358–438.
5. Nicewics D., Leszek D. Recycling of insulation boards by reuse // Ann Wars Univ Life Sci SGGW For Wood Technol. 2010. Vol. 72, Pp. 57–61.
6. Moezzi pour, B., Ahmadi, M., Abdolkhani, A. et al. Chemical changes of wood fibers after hydrothermal recycling of MDF wastes // J. Indian Acad Wood Sci. 2017. Vol. 14. Pp. 133–138. DOI:10.1007/s13196-017-0198-6.
7. Ihnát V., Lübke H., Russ A., Borůvka V. Waste agglomerated wood materials as a secondary raw material for chipboards and fibreboards part ii. Preparation and characterisation of wood fibres in terms of their reuse // Wood research. 2018. Vol. 63, no. 3. Pp. 431–442.
8. Wan H., Wang X.M., Barry A., Shen J. Recycling wood composite panels: characterizing recycled materials // BioResour. 2014. Vol. 9, no. 4. Pp. 7554–7565.
9. Przybysz et al. Effect of refining intensity // BioResources. 2020. Vol. 15, no. 1. Pp. 1482–1499. DOI: 10.15376/biores.15.1.1482-1499.
10. Hubbe M.A., Venditti R.A., Rojas O.J. What happens to cellulosic fibers during papermaking and recycling? A review // BioRes. 2007. Vol. 2, no. 4. Pp. 739–788.
11. Benthien J., Heldner S., Ohlmeyer M. Investigation of the interrelations between defibration conditions, fibre size and medium-density fibreboard (MDF) properties // European Journal of Wood and Wood Products. 2017. Pp. 215–232. DOI: org/10.1007/s00107-016-1094-2.
12. Benthien J. T., Bahnisch C., Heldner S. and Ohlmeyer M. Effect of fiber size distribution on medium-density fiberboard properties caused by varied steaming time and temperature of defibration process // Wood and Fiber Science. 2014. no. 2. Pp. 175–185.
13. Чистова Н.Г., Матыгулина В.Н. Влияние режимов размола на качество подготовки древесного волокна для изготовления ДВП // Вестник КрасГАУ. 2007. №4. С. 139–143.
14. Ferritsius O., Ferritsius R., Rundlof M. Average fibre length as a measure of the amount of long fibres in mechanical pulps – ranking of pulps may shift // Nord. Pulp Pap. Res. J. 2018. Vol. 33, no. 3. Pp. 468–481. DOI: org/10.1515/npprj-2018-3058.
15. Mcdonald D., Tchepel M., Ouellet D., Wild P., Jeffrey D., Provan J. Wood mechanics: from chips to flocs to fibres – part I // J – FOR. 2014. Vol. 4, no. 5. Pp. 23–30.
16. Гончаров В.Н. Теоретические основы размола волокнистых материалов в ножевых машинах: дис. ... доктора технических наук, Л., 1990. 433 с.
17. Зырянов М.А. Получение полуфабрикатов в одну ступень размола для производства древесноволокнистых плит мокрым способом: дис. ... канд. техн. Красноярск, 2012. 167 с.
18. Чистова Н.Г., Морозов И.М. Влияние технологических параметров размольной установки на свойства древесной массы и готовой древесноволокнистой плиты // Химия растительного сырья. 2015. №3. С. 185–191. DOI: 10.14258/jcprgm.201503543.
19. Чистова Н.Г., Морозов И.М., Якимов В.А., Алашкевич Ю.Д., Зырянов М.А. Получение древесноволокнистых плит сухим способом производства, изготовленных с использованием древесноволокнистых отходов от форматно-обрезных станков // Химия растительного сырья. 2015. №4. С. 119–124. DOI: 10.14258/jcprgm.201504852.
20. Морозов И. Подготовка и использование древесноволокнистых отходов в производстве древесноволокнистых плит: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2016. 173 с.
21. Патент 2647382 (RU). Устройство для фибриллирования и сепарирования древесноволокнистых материалов / Н.Г. Чистова, М.А.Зырянов, А.В. Рубинская, И.М.Морозов, А.А. Петрова. 2018.
22. Патент 2657685 (RU) Устройство для фибриллирования и сепарирования волокнистых материалов / Н.Г. Чистова, М.А.Зырянов, В. Матыгулина, Н.В. Аксенов, И.В. Шинкевич. 2018.
23. Патент 2671141 (РФ). Способ и устройство для подготовки сырья в производстве строительных материалов / Н.Г. Чистова, А. Рубинская, В. Матыгулина, М.А.Зырянов, Н.В. Аксенов, А.А. Петрова, И.М.Морозов. 2018.
24. Кугушев И.Д. Теория процессов отлива и обезвоживания бумажной массы. М., 1967. 267 с.

*Поступила в редакцию 5 июля 2020 г.*

*Принята к публикации 13 ноября 2020 г.*

**Для цитирования:** Чистова Н.Г., Матыгулина В.Н. Теоретические аспекты процесса роспуска древесноволокнистых отходов в аэродинамических средах // Химия растительного сырья. 2020. №4. С. 475–484. DOI: 10.14258/jcprgm.2020048188.

Chistova N.G.<sup>1,2</sup>, Matyugullina V.N.<sup>1\*</sup> THEORETICAL ASPECTS OF THE DISPOSAL OF WOOD FIBER WASTE IN AERODYNAMIC MEDIA

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31, Krasnoyarskii Rabochii pr., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation, e-mail: caress-lsib@rambler.ru

<sup>2</sup> Krasnoyarsk Institute of Railway Transport – a branch of the Irkutsk State University of Railways, Novaya zarya st., 2g, Krasnoyarsk, 660028 (Russia)

The paper discusses the results of a study on the use of fundamentally new equipment (rotary knife mill) for the preparation of secondary fiber waste in the air and the possibility of their full use in finished products for various purposes. In order to justify the effectiveness of the preparation and the feasibility of using secondary wood fiber semi-finished products by a dry grinding method, the physical phenomena and regularities of the mechanism for the preparation of secondary wood fiber semi-finished products by the proposed method are determined and investigated, which characterize the technological process of preparation in air and their possible future use as semi-finished products or in the manufacture of finished products products.

The process of dissolution of wood fiber waste was studied, the mechanical effect on wood fiber waste due to face-cross cutting (cutting, crushing, flattening, breaking) and aerodynamic phenomena (breaking, collision, dissolution, fibrillation), contributing to the formation of external and internal fibrillation of the secondary wood fiber, is described. Increase in specific surface in the absence of high temperatures and pressure, without the addition of chemical additives, without the use of water and steam.

The performed studies allow us to propose a new method and system for the preparation of wood fiber waste by dry grinding, justifying their economic and environmental feasibility.

**Keywords:** wood fiber waste, grinding, dissolution, fibrillation, aerodynamic medium, lumpy wood waste, wood fiber semi-finished products.

### References

- Zhang D., Zhang A., Xue L. *Wood Sci Technol.* 2015. Vol. 49. Pp 661–679. DOI: 10.1007/s00226-015-0728-6
- Chistova N. G. *Pererabotka drevesnyh otkhodov v tekhnologicheskom processe polucheniya drevesnovoloknistykh plit: dis. ... dokt. tekhn. nauk.* [Processing of wood waste in the technological process of obtaining wood-fiber boards: dis. ... doct. techn. sciences]. Krasnoyarsk, 2010, 415 p. (in Russ.).
- Chistova N.G. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2009, no. 2, pp. 141–144. (in Russ.).
- Ackermann K., Götsching L., Pakarinen H. *Papermaking Sci. Technol. Ser.2000*, Ch. 10, 358–438.
- Nicewics D., Leszek D. *Ann Wars Univ Life Sci SGGW For Wood Technol.*, 2010, vol. 72, pp. 57–61.
- Moazzipour B., Ahmadi M., Abdolkhani A. et al. *J. Indian Acad. Wood Sci.*, 2017, vol. 14, pp. 133–138. DOI: 10.1007/s13196-017-0198-6.
- Ihnát V., Lübke H., Russ A., Borůvka V. *Wood research*, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 431–442.
- Wan H., Wang X.M., Barry A., Shen J. *BioResources*, 2014, vol. 9, no. 4, pp. 7554–7565.
- Przybysz et al. *BioResources*, 2020, vol. 15, no. 1, pp. 1482–1499. DOI: 10.15376/biores.15.1.1482-1499
- Hubbe M.A., Venditti R.A., Rojas O.J. *BioRes.* 2007, vol. 2, no. 4, pp. 739–788.
- Benthien J., Heldner S., Ohlmeyer M. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2017. Pp. 215–232. DOI: org/10.1007/s00107-016-1094-2.
- Benthien J. T., Bahnisch C., Heldner S., Ohlmeyer M. *Wood and Fiber Science*, 2014, no. 2, pp. 175–185.
- Chistova N.G., Matyugullina V.N. *Vestnik KrasGAU*, 2007, pp. 139–143. (in Russ.).
- Ferritsius O., Ferritsius R., Rundlof M. *Nord. Pulp Pap. Res. J.*, 2018, vol. 33 no. 3, pp. 468–481. DOI: org/10.1515/npprj-2018-3058.
- McDonald D., Tchepel M., Ouellet D., Wild P., Jeffrey D., Provan J. *J – FOR.*, 2014, vol. 4, no. 5, pp. 23–30.
- Goncharov V.N. *Teoreticheskiye osnovy razmola voloknistykh materialov v nozhevykh mashinakh: dis. ... dokt. tekhn. nauk.* [Theoretical basics of grinding fibrous materials in cutting machines: dis. of Doctor of Engineering Science]. Leningrd, 1990, 433 p. (in Russ.).
- Zyryanov M.A. *Polucheniye polufabrikatov v odnu stupen' razmola dlya proizvodstva drevesnovoloknistykh plit mokrym sposobom: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Obtaining semi-finished products in one step of grinding for the production of wet fiber boards: dis. ... cand. tech. sciences]. Krasnoyarsk, 2012. 167 p. (in Russ.).
- Chistova N.G., Morozov I.M. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2015, no. 3, pp. 185–191. DOI: 10.14258/jcprm.201503543. (in Russ.).
- Chistova N.G., Morozov I.M., Yakimov V.A., Alashkevich YU.D., Zyryanov M.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2015, no. 4, pp. 119–124. DOI:10.14258/jcprm.201504852.
- Morozov I.M. *Podgotovka i ispol'zovaniye drevesnovoloknistykh otkhodov v proizvodstve drevesnovoloknistykh plit: dis. ... kand. tekhn. nauk.* [Preparation and use of fiberboard waste in the production of fiberboard: dis. ... cand. tech. sciences]. Krasnoyarsk, 2016. 173 p.
- Patent 2647382 (RU). 2018. (in Russ.).
- Patent 2657685 (RU). 2018. (in Russ.).
- Patent 2671141 (RU). 2018. (in Russ.).
- Kugushev I. D. *Teoriya protsessov otлива i obezvazhivaniya bumazhnoy massy.* [The theory of the processes of ebb and flow of paper pulp]. Moscow, 1967, 267 p. (in Russ.).

Received July 5, 2020

После переработки

Accepted November 13, 2020

**For citing:** Chistova N.G., Matyugullina V.N. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2020, no. 4, pp. 475–484. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2020048188.

\* Corresponding author.