

Оценка удельной энергии разволокнения при механической обработке листовой целлюлозы применительно к расчёту мельницы ударного действия*

Чашилов Д.В.

Институт проблем химико-энергетических технологий
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИПХЭТ СО РАН)
г. Бийск, Российская Федерация
dmitry.chashchilov@mail.ru

Манухина К.С., Злочевский Л.А., Павлов И.Н.
Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова
Бийский технологический институт (филиал)
г. Бийск, Российская Федерация
mahipp@bti.secna.ru

Аннотация. Полимерные композиционные материалы (ПКМ), армированные натуральными волокнами – перспективный вид конструкционных и функциональных материалов XXI века. Растительные волокна могут быть получены, например, из плодовых оболочек овса, массового отхода переработки зерен овса в овсяные хлопья. Близкими по форме и размерам являются волокна древесной целлюлозы. Проблемой является отсутствие специализированного оборудования для механической обработки таких волокнистых материалов. Актуальность проблемы обусловлена текущим использованием общепромышленных молотковых мельниц, с большими затратами энергии на обработку сырья, а также расширением области применения целлюлозы, как армирующего наполнителя ПКМ. Проблема может быть решена созданием специализированного оборудования для механической обработки волокнистого сырья. Этому препятствует отсутствие методики расчёта такого оборудования, скудость информации об удельных затратах энергии на механическую обработку целлюлозы. В работе проведено исследование механических свойств при растяжении листовой целлюлозы на универсальной разрывной машине. Получена прочность $\sigma=12,3$ МПа, модуль упругости $E=2,91$ ГПа, относительное удлинение при разрушении $\varepsilon=5,4$ %. Расчётным путем оценена удельная энергия разрушения листовой целлюлозы $E_{расч}=15,0$ Дж/г. Экспериментально на специальном стенде определена удельная энергия разволокнения $E_{\Sigma}=75$ Дж/г. Полуэмпирическим методом установлен энергетический баланс процесса обработки листовой целлюлозы в измельчителе ударного действия. Впервые показана энергетическая эффективность конструкции мельницы ударного действия при механической обработке целлюлозы. Доля полезной энергии составляет 20 % в общем балансе энергии. Впервые оценена энергия разрушения связей между волокнами целлюлозы 2,37 кДж/моль. Впервые показано, что удельная энергия механоактивации при механической обработке более, чем в три раза превышает энергию, необходимую для разрыва связей между волокнами целлюлозы. Результаты исследования могут быть применены для разработки метода расчёта мельниц при механической обработке целлюлозы из различных видов растительного сырья, для применения продукта в качестве армирующего наполнителя ПКМ.

Ключевые слова: целлюлоза листовая, механическая обработка, измельчитель ударного действия, энергетический баланс, армирующий наполнитель, полимерные композиционные материалы.

ВВЕДЕНИЕ

В мире в последнее время активно расширяется исследование и использование природных биополимеров. Такие материалы обладают воспроизводимостью сырьевой базы, биоинертностью и биоразлагаемостью, в отличие от весьма распространённых ныне синтетических полимеров. Природные биополимеры отвечают требованиям перспективной формы хозяйственной деятельности человека – циркулярной, или круговой, экономики [0].

Одним из наиболее освоенных человеком биополимеров является целлюлоза. Это жесткоцепный линейный биополимер на основе D-глюкозы. Целлюлоза является силовой основой клеточной стенки растений, выполняя в ней роль армирующего элемента [0].

Принципиально, целлюлоза может быть выделена из практически любого растительного сырья [0]. Наиболее распространена в настоящее время древесная целлюлоза, вырабатываемая из стволов лиственных и хвойных деревьев. Одной из наиболее качественных, с точки зрения потенциальных возможностей, является хлопковая целлюлоза, получаемая из хлопкового лinta – пушистых волокон, покрывающих семена хлопчатника [0]. В Юго-Восточной Азии используют бамбуковую целлюлозу, вырабатываемую из стеблей бамбука.

Перспективно получение целлюлозы и из других растений – льна, конопли, крапивы, мискантуса, соломы злаковых культур и т.п. В частности, возможно получение целлюлозы из плодовых оболочек овса (ПОО) [0]. В настоящее время ПОО являются массовым отходом переработки зерна овса посевного *Avena sativa L.* При лущении зерна, в производстве овсяных хлопьев или овсяной крупы, на овсозаводах России образуется около 1,5 млн. т/год ПОО. Эти отходы возможно использовать, как потенциальное лигноцеллюлозное сырье, содержание целлюлозы в них составляет от 35 до 40 %. Для выделения целлюлозных волокон используют комбинированную химическую обработку, обрабатывая ПОО в два этапа, проводя варку в азотнокислом растворе, а затем – в щелочном, или в обратном порядке [0]. Обработка может быть проведена с требуемой степенью воздействия [0].

* Работа выполнена в рамках госзадания на тему «Фундаментальные основы создания интегрированной технологии переработки легко-возобновляемого непищевого растительного сырья в востребованные экономикой РФ продукты», № госрегистрации 121061500030-3, при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск). Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", <https://icie-rus.org>

Целлюлоза находит широкое применение, как технический полуфабрикат. В частности, целлюлоза, а также растительные волокна, состоящие, в основном, также из целлюлозы, это эффективный армирующий наполнитель для полимерных композиционных материалов (ПКМ) [0]. Для сравнительно коротких волокон, например, полученных из ПОО, или для волокон древесной целлюлозы, возможно неупорядоченное расположение армирующего наполнителя в толще ПКМ.

Для этого необходима предварительная механическая обработка, проводимая, например, при помощи мельниц ударного, истирающего или ударно-истирающего действия. Однако измельчение целлюлозы является специфическим процессом механической обработки. Целлюлоза имеет волокнистое строение. Волокна – специфические удлиненные клетки, многоугольного или уплощенного поперечного сечения. Концы волокон заострены. Подобная форма обусловлена строением механических тканей растения, в которых развиваются эти клетки [0].

Целлюлоза выпускается в форме кип – спрессованных блоков уплотнённого диспергированного волокна, или в форме листов, полученных по технологии целлюлозно-бумажной промышленности, путем отливки, прессования и сушки [0]. Для разволокнения кип целлюлозы имеется хорошо себя зарекомендовавшее оборудование ударного и ударно-истирающего действия [0]. Проблемой является отсутствие специализированного оборудования ударного действия для предварительной обработки листовой целлюлозы. Для этой цели обычно используют измельчители или мельницы ударного действия общетехнического назначения [0]. В то же время уже существуют мельницы истирающего или раздавливающе-истирающего действия, специализированные именно для механической обработки растительного сырья [0].

Сущность обозначенной выше проблемы обусловлена скудостью информации о энергоёмкости процесса механической обработки целлюлозы [0]. Это не позволяет, с одной стороны, энергетически эффективно использовать имеющееся измельчительное оборудование. С другой стороны, затруднён подход к расчёту и проектированию специализированного оборудования. В любом из случаев сложно говорить о рациональности затрат энергии при механической обработке целлюлозы.

Актуальность проблемы обусловлена высокой энергоёмкостью процесса подготовки целлюлозы путём механической обработки, а также расширением области применения целлюлозы, как армирующего наполнителя ПКМ. Также знание поведения целлюлозы при механическом воздействии важно с научной точки зрения. Подведённая механическая энергия, позволяет активировать целлюлозу, как сырьё [0]. Активированная целлюлоза быстрее и полнее вступает во взаимодействие с химическими реагентами [0]. Однако степень эффективности затрат механической энергии на активацию целлюлозы неясна. Известно, что активирование целлюлозы может быть реализовано и менее энергоёмкой обработкой, например, водой, водяным паром, слабыми растворами реагентов [0]. Одним из наиболее активных способов активации целлюлозы, особенно для последующей химической переработки, является мерсеризация – получение так называемой щелочной целлюлозы, проводимое путём обработки раство-

рами NaOH [0]. Поэтому роль механической обработки в активации целлюлозы ещё только предстоит количественно оценить.

Определённое применение имеет механоактивация – обработка целлюлозы или целлюлозного сырья в специальных мельницах. Для этого могут быть применены эффективные машины истирающего действия [0] или машины ударно-истирающего действия. Подобный подход позволяет применять измельчительные машины наиболее эффективно и, в целом, либо снизить общее потребление энергии на единицу обработанного сырья, либо обеспечить наиболее эффективную отдачу от затраченной энергии – в ускоренной, наиболее полной и равномерной обработке целлюлозного сырья [0, 0].

Цель настоящего исследования – оценка баланса энергетических затрат на разволокнение целлюлозы. Задачи исследования

- экспериментальное определение механических характеристик целлюлозы в лабораторных условиях;
- экспериментальное определение энергоёмкости процесса механической обработки целлюлозы в измельчителе ударного действия;
- оценка энергетической эффективности работы мельницы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве испытуемого материала использовали древесную целлюлозу отбеленную, для химической переработки, в форме листов. Поставщик – ОАО «Сясьский ЦБК» (г. Сясьстрой, Ленинградская обл., Российская Федерация). Размеры листов измеряли линейкой, толщину – штангенциркулем. Влажность определяли весовым методом, высушивая образцы в сушильном шкафу при температуре 105 °С до постоянного веса.

Из листов целлюлозы вырезали образцы для испытаний на растяжение в форме прямоугольника размером 20x130 мм. Готовили для испытаний 10 образцов. На лицевую поверхность образцов наносили контрольные метки, расположенные на расстоянии 50 мм друг от друга. Также наносили метки для установки образцов в зажимы испытательной машины на расстоянии 100 мм друг от друга. Толщину и ширину образцов измеряли штангенциркулем с точностью 0,01 мм. Измерения проводили в середине образца и в 5 мм от контрольных меток.

Образцы маркировали, для индивидуальной идентификации. Образцы высушивали в сушильном шкафу в течение 12 часов при температуре 105 °С. Каждый из образцов взвешивали на технических весах с точностью 0,01 г. До испытаний образцы хранили в герметичном полиэтиленовом мешке, для исключения возможного увлажнения.

Для проведения экспериментов по определению прочности образцов на растяжение использовали универсальную испытательную разрывную машину Р-0,5 (Россия, ООО «РСЦИМ», г. Нефтекамск). Температура в помещении для испытаний составляла 18 °С, влажность воздуха – 25 % (отн.).

Образцы закреплялись в зажимах, расстояние между зажимами составляло 100 мм. Предварительно была подобрана скорость перемещения траверсы таким образом, чтобы разрушение образцов происходило в течение порядка 20 секунд. Этому условию удовлетворяла скорость 12 мм/мин. При проведении испытаний контролировалась сила растяжения и определялось перемещение траверсы.

Для оценки удельной энергии измельчения также готовили специальные образцы. Они представляли собой узкие полоски, вырезанные из листа целлюлозы вдоль машинного направления. Ширина полосок составляла 35 мм, длина соответствовала длине листа – 860 мм. Остальную подготовку сырья проводили аналогично описанной выше.

Для экспериментов использовали специальный исследовательский стенд для разволокнения листовой целлюлозы на основе мельницы ударного действия [0]. Стенд оборудован блоком питания, позволяющим определять количество электрической энергии, потребляемой электроприводом, а также определять количество механической энергии, подводимой к ротору в зависимости от скорости вращения ротора и нагрузки на электропривод.

Мельница работала при окружной скорости ротора 150 ± 5 м/с. Подачу целлюлозного сырья обеспечивали на уровне $1 \pm 0,05$ г/с. В ходе экспериментов определяли величину питающего электродвигателя напряжения и силу тока.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Размеры листа составили 690×860 мм, масса листа 560 ± 10 г. Поверхностная плотность определялась, как отношение массы листа к его площади и составила 940 ± 20 г/м². Влажность материала листа составила $5,0 \pm 0,2$ %. Толщина образцов составила $1,15 \pm 0,01$ мм. Кажущаяся плотность образца определялась расчетом, как отношение массы листа к его объему (произведение длины, ширины и толщины листа), и составила 815 ± 15 г/дм³.

Поведение образцов при испытаниях показано на рис. 1, представленное в виде графической зависимости нормального напряжения от относительной деформации. Механические свойства образцов при испытании на растяжение приведены в табл. 1.

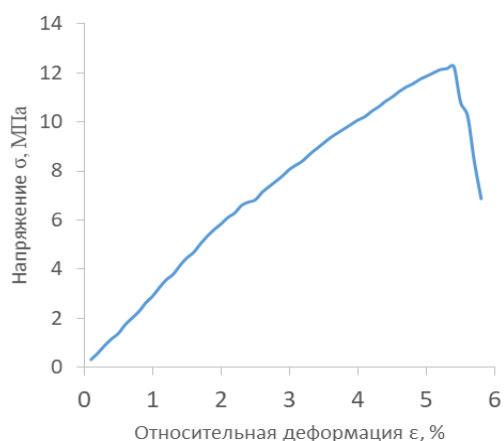


Рис. 1. Пример зависимости нормальных напряжений от относительной деформации для образца

Таблица 1

Механические свойства образцов

Механические свойства образцов	Величина	Стандартное отклонение
Нормальное напряжение при растяжении σ , МПа	12,26	0,96
Модуль упругости при растяжении E , МПа	2906,9	20,5
Относительное удлинение при разрушении ϵ , %	5,40	0,16

Величина нормального напряжения при растяжении, определенная в настоящем исследовании, соответствует разрывной длине на уровне 1720 ± 135 м. Это сравнительно небольшая величина, она заметно меньше разрывной длины многих видов бумаги и картона. Однако, к целлюлозе, для химической переработки, в отличие от бумаги или картона, не предъявляется высоких требований по механическим свойствам.

Особенность испытаний в том, что происходит однократное разрушение, предварительно перед этим образец механически нагружается и находится в состоянии растяжения, испытывая упругие деформации. По контрольным меткам, нанесённым на образцы до испытаний на расстоянии 50 мм друг от друга, была оценена остаточная деформация. После испытаний для образцов, разрушившихся вне этого контрольного участка между контрольными метками, было определено расстояние. Это расстояние составляло также 50 мм. Таким образом, можно заключить, что образец не испытывал остаточных деформаций. Все деформации до момента разрушения были только упругими.

Под нагрузкой образец запасал некоторую энергию упругой деформации, сопротивляясь движению траверсы испытательной машины. Эта энергия сможет быть определена как произведение силы растяжения на половину перемещения траверсы. Последняя определяется как произведение относительного удлинения на расстояние между зажимами (100 мм). С учётом этого расстояния, перемещение траверсы испытательной машины и относительная деформация, выраженная в процентах, количественно равны друг другу. Например, для испытанного образца, перед моментом разрушения, сила составила 275 Н, относительная деформация 5,4%. Соответственно, перемещение траверсы испытательной машины также составило 5,4 мм. Тогда энергия упругой деформации составила $0,5 \times 275 \times 0,0054 = 0,743$ Дж. Эта энергия была израсходована на разрушение образца. То есть энергия однократного разрушения E_1 целлюлозного материала составила 0,743 Дж.

Испытуемый материал представляет собой множество переплетённых, запутанных целлюлозных волокон. Между этими волокнами действуют силы трения, обусловленные многочисленными водородными связями. При разрушении образца, как правило, не происходит механического разрушения самих волокон. Разрушается сетка этих волокон, волокна от различных частей разрушающегося образца (условно – от верхней и нижней, соответственно верхнему и нижнему зажимам испытательной машины) смещаются друг относительно друга, преодолевая сопротивление сил трения.

В разрушенных образцах эти волокна выступают из толщи образца на некоторую длину. Разрушение образца происходит, как правило, по криволинейной наклонной плоскости, под малым углом к лицевой и обратной стороне образца. Можно отметить, что есть некоторая площадь области разрушения – она распространяется на некоторую длину вдоль длинной стороны образца. Также имеет место распространение области разрушения на некоторую глубину в толщу образца.

Разрушение происходит в некотором объёме образца. Этот объём ограничен верхней и нижней стороной образца, обеими боковыми кромками. Длина максимально вы-

ступающих из плоскости отдельных волокон составляет величину порядка 2,5 мм. Соответственно, средняя длина выступающих волокон составляет половину этой длины. В то же время, общая глубина зоны разрушения, с обеих сторон разрушенного образца, равна удвоенной длине средней длины выступающих волокон. Поэтому общая глубина t зоны разрушения, вдоль продольной оси образца составляет величину порядка 2,5 мм.

Объём зоны разрушения может быть определен как произведение ширины b и толщины h образца на глубину зоны разрушения t

$$V=b \cdot h \cdot t. \quad (1)$$

При подстановке получим $V=0,0575 \text{ см}^3$. В этом объеме происходит рассеяние всей энергии разрушения образца. При кажущейся плотности в $0,885 \text{ г/см}^3$ масса материала в области разрушения m составит $0,0509 \text{ г}$. Тогда удельная энергия разрушения $E_{уд}$ может быть определена как отношение энергии однократного разрушения E_1 к массе материала в области разрушения m

$$E_{уд}= E_1/m. \quad (2)$$

При подстановке получаем $E_{уд}=15,0 \text{ Дж/г}$. По результатам энергоёмкости процесса разволокнения на лабораторном стенде экспериментально определённая величина удельной энергии разволокнения E_{Σ} составляет $75,0 \text{ Дж/г}$, т.е. превышает расчетную величину в пять раз или на 400 %. Причиной этого является то, что, очевидно, материал подвергается многократному воздействию рабочих органов в рабочей камере мельницы. Материал после разволокнения должен пройти через отверстия решета. Перед этим порции разволокненного материала некоторое время движутся вместе с ротором, скользя по внутренней поверхности решета, преодолевая силы трения. Также есть ещё затраты энергии на сообщение кинетической энергии движущемуся материалу (со скоростью, равной окружной скорости ротора).

Например, для разгона целлюлозного материала до скорости, равной скорости ротора необходима удельная энергия $E_{ск}$, определяемая половиной произведения массы (для одного грамма материала) $m_1=0,001 \text{ кг}$ и квадрата окружной скорости ротора $v=150 \text{ м/с}$

$$E_{ск}= 0,5 \cdot m_1 \cdot v^2. \quad (3)$$

При подстановке получаем $E_{ск}=11,3 \text{ Дж/г}$.

Аналогично, часть энергии расходуется на преодоление силы трения $F_{тр}$, возникающей вследствие действия центробежной силы $F_{цб}$, и равной произведению последней на коэффициент трения φ

$$F_{тр}= \varphi \cdot F_{цб}. \quad (4)$$

Центробежная сила определяется как половина произведения массы m_1 , квадрата угловой скорости ω и радиуса вращения r

$$F_{цб}= m_1 \cdot \omega^2 \cdot r/2. \quad (5)$$

Радиус вращения может быть принят равным половине диаметра ротора, $r=0,075 \text{ м}$. Угловая скорость при окружной скорости на этом радиусе составит $\omega \approx 2000 \text{ рад/с}$. Тогда центробежная сила по выражению (5) составит $F_{цб}=150 \text{ Н}$. Коэффициент трения сухой целлюлозы по стали $\varphi=0,2$, тогда сила трения $F_{тр}$, определяемая по выражению (3) составит 30 Н . Энергия, затрачиваемая на преодоление силы трения $E_{тр}$, будет определяться, как произведение силы на путь её действия l . Однако постепенно, по мере движения материала вдоль решета, целлюлоза про-

ходит через отверстия решета и масса ее уменьшается, поэтому примем за расчетное значение лишь половину этого произведения

$$E_{тр}= F_{тр} \cdot l/2. \quad (6)$$

Исходя из общих энергозатрат на механическую обработку в мельнице $E_{\Sigma}=75 \text{ Дж/г}$, работа сил трения составит остаток от разности этих общих энергозатрат, $E_{ск}$ и $E_{уд}$, согласно уравнению энергетического баланса процесса механической обработки материала в мельнице

$$E_{\Sigma}=E_{уд}+E_{ск}+E_{тр}. \quad (7)$$

Исходя из уравнения энергобаланса (7), получим, что энергия на преодоление силы трения составит $48,7 \text{ Дж/г}$. Тогда путь, который проходит обрабатываемый материал вместе с ротором, прежде чем покинет рабочую камеру мельницы, по уравнению (6) составит, в среднем, $3,25 \text{ м}$. Этот путь соответствует примерно $6,9$ оборота материала вместе с ротором.

Сумма всех видов удельной энергии приведена в табл. 2.

Таблица 2

Энергетический баланс механической обработки целлюлозного материала

Вид удельной энергии	Величина энергии, Дж/г	Относительная доля вида удельной энергии в общем балансе энергии, д.е.
Удельная энергия разрушения $E_{уд}$ (до необходимой крупности)	15,0	0,200
Удельная энергия разгона до скорости, равной окружной скорости ротора $E_{ск}$	11,3	0,151
Удельная энергия, затрачиваемая на преодоление силы трения $E_{тр}$	48,7	0,649
Сумма всех видов удельной энергии	75,0	1,000

Удельная энергия на преодоление силы трения более, чем втрое превышает удельную энергию разрушения, что может свидетельствовать, о том, что имеет место весьма значительное истирающее воздействие на обрабатываемый материал.

Таким образом, минимально необходимая энергия на разрушение составляет лишь 20 % от всей затрачиваемой энергии. Удельная энергия трения приводит к избыточному переизмельчению обрабатываемого материала. Также, фактически, можно говорить, что измельчительное оборудование работает в режиме ударно-истирающего действия.

Также, по результатам испытаний может быть количественно оценена сила связей между волокнами в образце, с учётом направления. Эта сила соответствует силе разрушения, отнесенной к 1 моль материала. Для целлюлозы мольная масса составляет 162 г/моль . Это соответствует силе связей между волокнами порядка $19,4 \text{ кН/моль}$. Энергия разрушения этих связей, аналогично, составит $2,37 \text{ кДж/моль}$. Также для испытанного материала разрывная нагрузка составляет $13,75 \text{ кН/пог.м}$. Для испытанного режима удельная энергия механоактивации целлюлозы в $3,25$ раз превышает удельную энергию разрушения.

Предложенный алгоритм расчета может быть положен в основу расчетной методики мельниц для механической обработки целлюлозных материалов. Это может быть применимо как к ныне действующим мельницам, так и к вновь разрабатываемым. Также анализ энергетического баланса позволит наметить пути для совершенствования процесса механической обработки целлюлозных материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Апробирована методика определения удельной энергии измельчения для листовой целлюлозы. Экспериментально получена прочность при растяжении образцов воздушно-сухой листовой целлюлозы $\sigma=12,26\pm 0,96$ МПа, модуль упругости $E=2906,7\pm 20,5$ МПа, относительное удлинение при разрушении $\varepsilon=5,40\pm 0,15$ %. Удельная энергия разрушения образцов составила $15,0\pm 2,9$ Дж/г. Экспериментально на специальном стенде определена удельная энергия разволокнения $E_{\Sigma}=75$ Дж/г. Впервые полуэмпирическим методом установлен энергетический баланс процесса обработки листовой целлюлозы в измельчителе ударного действия. Впервые количественно оценена энергетическая эффективность мельницы ударного действия при механической обработке целлюлозы. Для испытанной конструкции, энергоэффективность находится на уровне на уровне 20 %. Впервые, на основе выполненных экспериментов, оценена энергия для разрушения связей между волокнами целлюлозы на уровне 2,37 кДж/моль. Результаты исследования могут быть применены для разработки метода расчёта мельниц при механической обработке целлюлозы из различных видов растительного сырья, для применения продукта в качестве армирующего наполнителя ПКМ. Метод анализа баланса энергии может быть использован для определения удельной энергии механоактивации целлюлозы и выбора путей повышения эффективности мельниц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhou Y.H. A circular economy use of recovered sludge cellulose in wood plastic composite production: Recycling and eco-efficiency assessment / Y.H. Zhou, P. Stanchev, E. Katsou, S. Awad, M.Z. Fan // Waste Management. – 2019. – Vol. 99. – P. 42-48. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.08.037.
2. Горшкова Т.А. Формирование надмолекулярной структуры растительной клеточной стенки. Обзор / Т.А. Горшкова, П.В. Микшина, О.П. Гурьянов, С.Б. Челнокова // Биохимия. – 2010. – Т.75, №2. – С. 196-213.
3. Lev-Yadun S. Plant fibers: initiation, growth, model plants, and open questions // Физиология растений. – 2010. – Т.57, №3. – С.323-333.
4. Keijsers E.R.P. The cellulose resource matrix / E.R.P. Keijsers, G. Yilmaz, J.E.G. Van Dam // Carbohydrate Polymers. – 2013. – Vol.93, is.1. – P. 9-21. DOI: 10.1016/j.carbpol.2012.08.110.
5. Кухленко А.А. Исследование процесса щелочной делигнификации плодовых оболочек овса в роторно-пульсационном аппарате методами математического планирования эксперимента / А.А. Кухленко, С.Е. Орлов, А.Г. Карпов, Д.Б. Иванова, О.С. Иванов, М.С. Василишин, М.Н. Берещинова // Химическая технология. – 2015. – Т. 16, №7. – С. 443-447.

6. Skiba E.A. Pilot technology of ethanol production from oat hulls for subsequent conversion to ethylene / E.A. Skiba, O. Baibakova, V.V. Budaeva, I.N. Pavlov, M.S. Vasilishin, E. Makarova, G.V. Sakovich, E.V. Ovchinnikova, S.P. Banzaraksyaeva, N.V. Vernikovskaya, V.A. Chumachenko // Chemical Engineering Journal. – 2017. – Vol. 329. – P. 178-186.

7. Pedersen M. Lignocellulose pretreatment severity - relating pH to biomatrix opening / M. Pedersen, A. S. Meyer // New Biotechnology. – 2010. – Vol. 27, is. 6. – P. 739-750. DOI: 10.1016/j.nbt.2010.05.003.

8. Bourmaud, A., Shah, D.U., Beaugrand, J., Dhakal, H.N. Property changes in plant fibres during the processing of bio-based composites / A. Bourmaud, D.U. Shah, J. Beaugrand, H.N. Dhakal // Industrial Crops and Products. – 2020. – Vol. 154, 112705. DOI: 10.1016/j.indcrop.2020.112705.

9. Антонова Н.М. Сравнительный анализ структуры листовой и модифицированной целлюлозы / Н.М. Антонова, А.С. Пузанова, А.А. Небрат // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 3 (63). – С. 39-46.

10. Шамин К.И., Чернов А.А., Зотов В.Г., Смирнов А.В., Чижевский О.Т. Устройство для распушивания целлюлозы из спрессованных кип. Патент России на полезную модель №149010. 2014. Бюл. №35.

11. Чащилов Д. В. Опыт исследования процесса разволокнения целлюлозных материалов и анализ работы оборудования: от лабораторного стенда - к промышленной установке // От химии к технологии шаг за шагом. – 2021. – Т. 2, № 1. – С. 29-39. DOI: 10.52957/27821900_2021_01_29. – EDN TIQZYB.

12. Подгорбунских Е.М. / Разупорядочение кристаллической структуры целлюлозы при механической активации / Е.М. Подгорбунских, Н.В. Блиная, А.Л. Бычков, О.И. Ломовский // Журнал структурной химии. – 2018. – Т. 59, № 1. – С. 197-204. DOI: 10.1134/S0022476618010328

13. Логинова С.В. Модель структуры измельчённой целлюлозы / С.В. Логинова, А.А. Латуга // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2016. – Т. 20, № 2. – С. 132-136.

14. Huang L. Mechanical activation and characterization of micronized cellulose particles from pulp fiber / L. Huang, Q. Wu, Q. Wang // Industrial Crops and Products. – 2019. – Vol. 141, 111750. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111750.

15. Lee H. Mechanical pretreatment of cellulose pulp to produce cellulose nanofibrils using a dry grinding method / H. Lee, S. Mani // Industrial Crops and Products. – 2017. – Vol. 104. – P. 179-187. DOI:10.1016/j.indcrop.2017.04.044.

16. Веселов В.М., Абрамов Я.К., Залевский В.М., Тамурка В.Г., Вагуева О.Б., Володин В.С., Гукасов Н.А., Маршаникова Л.М. Способ повышения качества и реакционной способности целлюлозы. Патент России №2609803. 2017. Бюл. №4.

17. Светлов С.А. Разработка оборудования производства натрий-карбоксиметилцеллюлозы / С.А. Светлов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2019. – Т.55, №6. – С.3-6.

18. Юсупов Ф.Т. Совершенствование технологий разволокнения, агрегирования и кондиционирования целлюлозных материалов / Ф.Т. Юсупов, А.А. Саетшин, З.Т. Валишина, В.Г. Борбузанов, Е.Л. Матухин // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20, № 6. – С. 76-78.

19. Борбузанов В.Г. Автоматизированный комплекс подготовки целлюлозного сырья новой физической формы / В.Г. Борбузанов, Е.Л. Магухин, Ф.Т. Юсупов, З.Т. Валишина, А.В. Косточко // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т.18, №1. – С. 297-299.

20. Чашилов Д.В. Исследование плотности волокнистой целлюлозной матрицы для теплоизоляционного полимерного композиционного материала при малых давлениях прессования / Д. В. Чашилов, Л. А. Злочевский, А. Е. Струкова, И. Н. Павлов // Южно-Сибирский научный вестник. – 2021, № 5(39). – С. 118-125. DOI 10.25699/SSSB.2021.39.5.009. – EDN ROXBDW.

DOI: 10.24892/RIJIE/20230303

Evaluation of the Specific Energy of the Defibration of Sheet Cellulose in Relation to the Calculation of the Impact Miller

Chashchilov D.V.

Institute of Problems of Chemical and Energy Technologies
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
(IPCET SB RAS)
Biysk, Russian Federation
dmitry.chashchilov@mail.ru

Manukhina K.S., Zlochevsky L.A., Pavlov I.N.

Altai State Technical University named after I. I. Polzunov
Biysk Technological Institute (branch)
Biysk, Russian Federation
mahipp@bti.secna.ru

Abstract. Natural fibers reinforced composites (NFRCS) with are a promising type of structural and functional materials of the XXI century. Vegetable fibers can be obtained, for example, from the fruit shells of oats, the mass waste of processing oat grains into oat flakes. Similar in shape and size are the fibers of wood pulp. The problem is the lack of specialized equipment for the machining of such fibrous materials. The urgency of the problem is due to the current use of general industrial hammer mills, with high-energy costs for processing raw materials, as well as the expansion of the field of application of cellulose as a reinforcing filler of NFRCS. The problem can be solved by creating specialized equipment for the mechanical processing of fibrous raw materials. This is hindered by the lack of a methodology for calculating such equipment, the paucity of information about the specific energy costs for the mechanical processing of pulp. The study of mechanical properties during stretching of sheet cellulose on a universal breaking machine is carried out. The strength $\sigma = 12.3$ MPa, elastic modulus $E = 2.91$ GPa, elongation at fracture $\varepsilon = 5.4$ % were obtained. The specific energy of destruction of sheet cellulose $E_{\text{срст}} = 15.0$ J/g was calculated by calculation. The

specific energy of defibration $E_{\Sigma} = 75$ J/g was determined experimentally on a special stand. By a semi-empirical method, the energy balance of the process of processing sheet cellulose on the impact grinding body has been established. For the first time, the energy efficiency of the impact mill design during the mechanical processing of cellulose is shown. The share of useful energy is 20% in the total energy balance. For the first time, the energy of breaking bonds between cellulose fibers was estimated at 2.37 kJ/mol. It is shown for the first time that the specific energy of mechanical activation during machining is 3.25 times higher than the energy required to break the bonds between cellulose fibers. The results of the study can be used to develop a method for calculating strands in the mechanical processing of cellulose from various types of vegetable raw materials, for the use of the product as a reinforcing filler of NFRCS.

Keywords: sheet cellulose, mechanical processing, impact shredder, energy balance, reinforcing filler, polymer composite materials.

Библиографическое описание статьи

Чашилов Д.В. Оценка удельной энергии разволокнения при механической обработке листовой целлюлозы применительно к расчёту мельницы ударного действия / Д.В. Чашилов, К.С. Манухина, Л.А. Злочевский, И.Н. Павлов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2023. – Т.10, №3. – С. 14-19. DOI: 10.24892/RIJIE/20230303

Reference to article

Chashchilov D.V., Manukhina K.S., Zlochevsky L.A., Pavlov I.N. Evaluation of the specific energy of the defibration of sheet cellulose in relation to the calculation of the impact miller, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2023, vol.10, no.3, pp. 14-19. DOI: 10.24892/RIJIE/20230303