

УДК 676.157

ВЛИЯНИЕ ОКРУЖНОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ПОДВИЖНОЙ ПРЕГРАДЫ ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ТЕХНИЧЕСКУЮ КОНОПЛЮ

© М.М. Литвинова*, Ю.Д. Алашкевич, Р.А. Марченко, Д.Г. Болгов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, пр. имени газеты «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, 660037, Россия, marg32883@gmail.com

Работа посвящена исследованию гидродинамического размола технической конопли в установке типа «струя-преграда» с целью оптимизации процесса для производства бумажной продукции. Цель исследования – определить влияние окружной скорости вращения подвижной преграды и ее конструкции на бумагообразующие свойства волокнистого полуфабриката и физико-механические показатели готовой продукции. Экспериментально изучено влияние скорости вращения (900 и 2000 об./мин) и количества лопастей турбины (12 и 24) на степень помола по Шоппер-Риглеру, водоудерживающую способность, разрывную длину и сопротивление продавливанию.

Установлено, что увеличение времени размола приводит к увеличению степени помола, а характер зависимостей водоудерживающей способности, разрывной длины и сопротивления продавливанию от варьируемых параметров существенно различается. Выявлены различные типы зависимостей (линейные, параболические, обратно-параболические), что указывает на сложный характер влияния гидродинамических факторов на свойства волокна. Полученные результаты позволяют выявить тенденции для определения оптимальных режимов размола технической конопли для достижения необходимых характеристик бумажной продукции.

Ключевые слова: размол технической конопли, целлюлозно-бумажное производство, гидродинамика, безножевой размол, частота вращения.

Для цитирования: Литвинова М.М., Алашкевич Ю.Д., Марченко Р.А., Болгов Д.Г. Влияние окружной скорости вращения подвижной преграды при гидродинамическом воздействии на техническую коноплю // Химия растительного сырья. 2025. №2. С. 391–398. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250216968>.

Введение

Размол – это процесс механического воздействия, который приводит к разрезанию волокон, дроблению, расчесыванию, разделению пучков волокон. Кроме того, процесс размола приводит к образованию отдельных ворсинок на поверхности волокон или называемой – внешней фибрилляция [1].

Современная теория размола объясняет не только изменения, происходящие с волокном в процессе размола волокнистой массы, но и показывает влияние этих изменений на бумагообразующие и физико-механические свойства.

Гидродинамическое воздействие на волокна выражается как удары волокнистой суспензии о размалывающие органы и стенки размалывающего аппарата. Одновременно при этом имеет место трение волокон друг о друга и трение их о размалывающие органы.

К силовым факторам гидродинамического воздействия можно отнести: напряжения сдвига в градиентном потоке, кавитацию, пульсации, гидродинамическое давление, удары и трения волокон друг о друга и о твердые элементы машин.

На самом деле разрушение материалов происходит за счет ультразвуковой кавитации, эффект которой определяется волновым характером движения струи [2].

При движении волокнистой суспензии с увеличением скорости начиная от состояния покоя происходит изменение структуры потока. В неподвижном состоянии покоя суспензия имеет пространственную

* Автор, с которым следует вести переписку.

сетчатую структуру в виде крупных соединений из переплетенных волокон с прослойками чистой воды. Сцепление волокон происходит как между собой, так и за счет сил трения. Для того чтобы такая суспензия начала двигаться, необходимо приложить к ней начальный напор, который с увеличением концентрации будет также расти. Приложить воздействие напора необходимо на отрыв волокон от стенок трубы и преодоления сил трения. Увеличение скорости потока возле стенок канала сопровождается появлением прослойки чистой воды. При малых значениях скоростей наблюдается стержень из переплетенных волокон, который уплотняется в радиальном направлении. Из-за градиента скоростей между стержнем и прослойкой чистой воды волокна отрываются от стержня. С увеличением скорости стержень уменьшается, прослойка чистой воды увеличивается. При дальнейшем увеличении скорости увеличиваются силы трения между стержнем и слоем чистой воды и внутри происходит разрушение сначала более слабых связей стержня. Стержень разрушается и поток из структурированного вида переходит в диспергированный [2, 3].

В зависимости от вида воздействия на волокно гидродинамические установки делятся на различные типы: газоструйные диспергаторы – использующие принцип межвального дробления; центробежно-пульсационные; ультразвуковые методы и струйно-барьерный тип. Безножевые струйно-барьерные установки играют важную роль в исследовании оптимальных условий размола волокнистой суспензии для производства бумажной продукции. По мнению таких исследователей как В.Г. Марков, Ю.Д. Алашкевич, В.Г. Васютин, эти установки позволяют получать массу с более развитыми волокнами без значительного укорочения. Основным принципом работы таких установок является выбрасывание волокнистой суспензии через сопло на преграду различной конфигурации. Струя не сразу погружается в воду. Выделяют три участка в зависимости от расстояния сопла: компактный, частично фрагментированный и распыляемый [4, 5].

Немаловажную часть в целлюлозно-бумажном производстве также играет вид размалываемого материала. В основном это биополимеры с клеточным строением. На данный момент в производствах используют такой растительный полимер как древесина хвойных и лиственных пород. В древесине основным содержится целлюлоза, лигнин, зола, полисахариды и т.д., что делает необходимым использование химического воздействия, так как содержание лигнина ухудшает конечную готовую продукцию. Для того чтобы минимизировать применение химического воздействия на производстве бумажной продукции, в СибГУ им. М.Ф. Решетнёва на кафедре машин и аппаратов промышленных технологий ведутся исследования в области размола однолетних растительных полимеров. Это лен, хлопок, техническая конопля, джут, топиамбур и мискантус. У этих однолетних растений большое содержание целлюлозных волокон и сравнительно небольшое содержание лигнина в сравнении с древесиной. Большой интерес для нас представляет техническая конопля. У растения прямой стебель с характерными запоминающимися листьями с пильчатыми краями. Вегетационный период конопли – от 80 до 160 дней. Конопля легко приспосабливается к различным почвам, освещению и температурам. Культурные виды конопли делятся на европейские и более высокие (4 м и более) восточноазиатские формы. Европейские, в свою очередь, состоят из северных низкорослых и скороспелых сортов, среднерусских и высокорослых позднеспелых южных сортов. Ее волокна очень прочные, предел прочности при растяжении составляет 550–900 МПа [6–10].

Стебли конопли состоят из длинных лубяных волокон и древесной сердцевины (костры), причем последней в четыре раза больше по весу, чем лубяного волокна. Центральная древесная часть конопли содержит 36% целлюлозы и 27% лигнина, тогда как лубяное волокно содержит 72% целлюлозы и 4% лигнина. Целый стебель конопли содержит 47% целлюлозы и 18% лигнина. Стебель конопли содержит самый высокий процент целлюлозы при самом низком содержании лигнина почти среди всех недревесных стеблей. Из длинных лубяных волокон конопли получают бумагу прекрасного качества, не содержащую кислоты. В производстве конопляной бумаги используется меньше химикатов, чем в бумаге на основе дерева. Она не становится желтой, ломкой и не распадается со временем, как обычная бумага. Конопляная бумага применяется в таких изделиях как технические фильтры, банкноты, библейская бумага, диэлектрическая и медицинская бумага, а также сигаретная бумага, из-за высокой цены на конопляную целлюлозу. Специальная бумага также включает бумагу для чайных пакетиков, фильтры для кофе, специальные нетканые материалы, жиронепроницаемую бумагу, углеродные салфетки и уплотняющие салфетки. В настоящее время единственным хорошо зарекомендовавшим себя рынком конопляной целлюлозы является рынок сигаретной бумаги. При производстве сигаретной бумаги можно использовать все волокна стебля [11–17].

Экспериментальная часть

Принимая во внимание вышесказанное относительно использования технической конопли при гидродинамической обработке на установке типа «Струя-преграда», были поставлены следующие задачи:

1. Определить влияние окружной скорости подвижной преграды на изменение степени помола волокнистого полуфабриката по шкале Шоппер-Риглера и интенсивность его обработки при размоле.

2. Проанализировать отдельные физико-механические показатели готовой продукции при различных окружных скоростях в процессе обработки волокнистой суспензии.

Установка безножевого размола волокнистых полуфабрикатов (Патент № 2363792 С1) имеет следующие основные характеристики: давление в рабочем цилиндре для выбрасывания волокнистой суспензии через сопло на преграду регулировалось от минимального значения до максимального – 12 МПа.

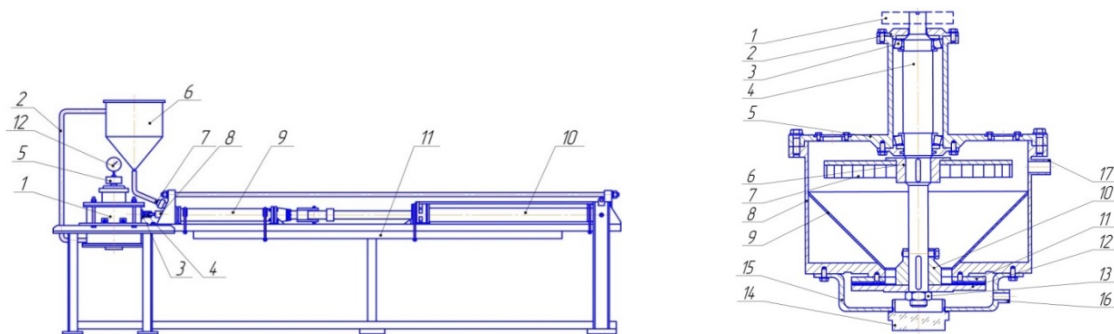
Эксперимент проводился при давлении в рабочем цилиндре 12 МПа. Внутренний диаметр сопла для выбрасывания струи суспензии на преграду составляет 2 мм. Скорость истечения струи суспензии из рабочего цилиндра составляла 130 м/с [18].

На начальном этапе приготовления лубяная часть конопли подвергается измельчению. Это необходимо, поскольку волокна конопли исключительно длинные, достигая 2–4 м в длину, что делает непрактичным их непосредственный размол с помощью безножевой установки. Следовательно, первый этап включает в себя процесс предварительного измельчения для укорачивания волокон на более мелкие фрагменты. В упомянутом исследовании для этой цели был использован дезинтегратор-дробилка, известный как «Рекорд», облегчающий измельчение стебля конопли. Укорочение волокон происходит примерно до 3 мм [19].

При размоле волокон оценивались бумагообразующие свойства и физико-механические показатели готовых изделий.

Исследовались следующие бумагообразующие свойства волокнистых полуфабрикатов: прирост степени помола по шкале Шоппер-Риглера, водоудерживающая способность. Определялись следующие физико-механические показатели готовых отливок после размола: разрывная длина и сопротивление к продавливанию. На рисунке 2 показана зависимость степени помола волокнистой массы от времени размола по шкале Шоппер-Риглера при отдельных значениях скорости вращения приемного устройства и двумя вариантами конструкции приемного устройства (различное количество лопостей турбины).

Как следует из рисунка 2, зависимости прироста степени помола от времени размола волокнистого полуфабриката и конструкции приемного устройства носят близкие качественные характеристики в виде параболы. Что касается количественных зависимостей для исследуемых параметров, они по значениям близки друг к другу.



1 – узел безножевого размола; 2 – трубопровод возврата; 3 – раструб; 4 – насадка; 5 – тормозное устройство; 6 – емкость; 7 – всасывающий клапан; 8 – выпускной клапан; 9 – рабочий цилиндр; 10 – приводной цилиндр; 11 – рама; 12 – тахометр

1 – тормозное устройство; 2 – крышка подшипника; 3 – подшипник; 4 – вал; 5 – крышка корпуса; 6 – ступица турбины; 7 – турбина; 8 – корпус; 9 – конус; 10 – ступица подвижного диска ножевой гарнитуры; 11 – неподвижный диск ножевой гарнитуры; 12 – подвижный диск гарнитуры; 13 – прижимная гайка; 14 – крышка; 15 – днище; 16 – патрубок выхода волокнистой массы; 17 – патрубок подачи волокнистой массы

Рис. 1. Схема экспериментальной установки «Струя-преграда» с узлом безножевого размола

На рисунке 3 представлена зависимость водоудерживающей способности полуфабриката от степени помола по шкале Шоппер-Риглера при двух значениях конструкции приемного устройства и двух значениях скорости приемного устройства.

Как следует из рисунка 3, наблюдаются значительные изменения качественных и количественных зависимостей исследуемых величин. Так, характер исследований водоудерживающей способности при использовании приемного устройства с 12 лопастями и частотой вращения 900 об./мин, а также при исследовании 24 лопастей приемного устройства, вращающегося со скоростью 2000 об./мин, изменения исследуемых значений носят линейный характер.

При использовании приемного устройства с 24 лопастями, вращающихся со скоростью 900 об./мин, зависимость представляет собой параболу. Для исследования приемного устройства с 12 лопастями, вращающихся со скоростью 2000 об./мин, характер качественных зависимостей носит вид обратной параболы. Что касается количественных значений исследуемых величин, наблюдается следующая картина: во всех случаях, как и следовало ожидать, значения водоудерживающей способности с ростом степени помола по шкале Шоппер-Риглера увеличиваются. При увеличении прироста степени помола по шкале Шоппер-Риглера выше 50°ШР наблюдается снижение значений водоудерживающей способности по параболической зависимости для кривой №4 и резкое увеличение исследуемой зависимости №1, что можно объяснить увеличением частоты вращения лопастей приемного устройства в независимости от снижения количества лопастей на турбине.

На рисунке 4 представлены показатели зависимостей изменения величины разрывной длины от степени помола по шкале Шоппер-Риглера при двух значениях конструкции приемного устройства и двух значениях скорости приемного устройства.

Качественные показатели всех образцов показывает их увеличение с ростом степени помола по шкале Шоппер-Риглера. Прямолинейный характер имеет зависимость № 1 и 4. А вот очень похожие по траектории зависимости, имеющие вид обратной параболы, как и в предыдущих графических исследованиях, представляют № 2 и 3. Количественные показатели для всех зависимостей близки друг к другу.

Очень интересная ситуация наблюдается при рассмотрении рисунка 5, где указаны показатели сопротивления продавливания от степени помола по шкале Шоппер-Риглера при двух значениях конструкции приемного устройства и двух значениях скорости приемного устройства.

Как следует из рисунка 5, с увеличением степени помола по шкале Шоппер-Риглера и увеличением скорости вращения турбины, наблюдается увеличение количественных значений сопротивлению продавливания. Причем качественные показатели № 1 и 2 изменяются по линейной зависимости, а № 3 и 4 – изменяются в виде обратной параболы.

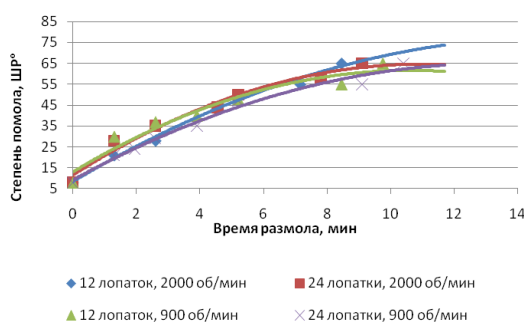


Рис. 2. Степень помола от времени размола по шкале Шоппер-Риглера: №1 – 12 лопаток, 2000 об./мин; №2 – 24 лопатки, 2000 об./мин; №3 – 12 лопаток, 900 об./мин; №4 – 24 лопаток, 900 об./мин



Рис. 3. Водоудерживающая способность от степени помола по шкале Шоппер-Риглера: №1 – 12 лопаток, 2000 об./мин; №2 – 24 лопатки, 2000 об./мин; №3 – 12 лопаток, 900 об./мин; №4 – 24 лопаток, 900 об./мин

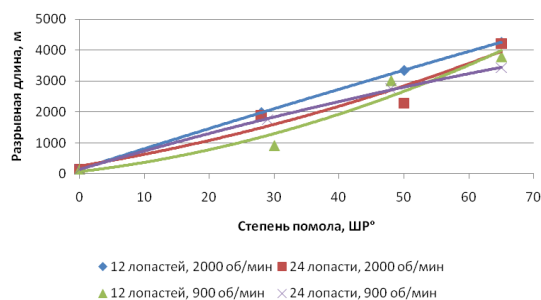


Рис. 4. Изменение величины разрывной длины от степени помола по шкале Шоппер-Риглера: №1 – 12 лопаток, 2000 об./мин; №2 – 24 лопатки, 2000 об./мин; №3 – 12 лопаток, 900 об./мин; №4 – 24 лопаток, 900 об./мин

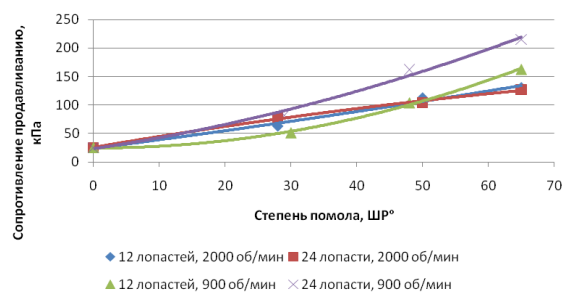


Рис. 5. Сопротивление продавливанию от степени помола по шкале Шоппер-Риглера: №1 – 12 лопаток, 2000 об./мин; №2 – 24 лопатки, 2000 об./мин; №3 – 12 лопаток, 900 об./мин; №4 – 24 лопаток, 900 об./мин

Выводы

1. С увеличением времени размола волокнистых полуфабрикатов от степени помола по шкале Шоппер-Риглера имеет тенденцию роста для всех значений по параболической траектории.
2. Изменения водоудерживающей способности в зависимости от степени помола и частотой вращения ротора имеют различные значения, как качественные, так и количественные. Для зависимости №1 – параболический вид, №4 – носит вид обратной параболы.
3. Изменение величины разрывной длины от степени помола по шкале Шоппер-Риглера и изменения скорости вращения турбины осуществляется с увеличением их роста, причем для №1 и 4 зависимость имеет прямолинейный характер. Что касается №2 и 3, зависимости изменяются по траектории обратной параболы.
4. Изменение величины сопротивления продавливанию осуществляется для №1 и 2 значений по линейной зависимости, а №3 и 4 – по зависимости в виде обратной параболы.

Финансирование

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник, предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Корда Ж., Либнар З., Прокоп Ю. Размол бумажной массы. М., 1967. 421 с.
2. Алашкевич Ю.Д. Основы теории гидродинамической обработки волокнистых материалов в размольных машинах: дис. ... докт. техн. наук. Красноярск, 1987. 361 с.
3. Марченко Р.А. Интенсификация безножевого размола волокнистых полуфабрикатов в целлюлозно-бумажном производстве: дисс. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2016. 161 с.
4. Ерофеева А.А. Безножевой размол волокнистых полуфабрикатов с учетом реологических особенностей суспензий: дисс. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2012. 134 с.
5. Кутовая Л.В. Комплексный параметр процесса обработки волокнистых суспензий безножевым способом в установке типа «Струя-Преграда»: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Красноярск, 1998. 20 с.
6. Литвинова М.М., Алашкевич Ю.Д., Марченко Р.А. Особенности безножевого размола волокнистых полуфабрикатов из однолетних растений в целлюлозно бумажном производстве // Хвойные бореальные зоны. 2024. Т. 42, №3. С. 29–38. <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-2-88-94>.

7. Franc J.-P., Michel J.-M. Fundamentals of Cavitation. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2005. 306 p. <https://doi.org/10.1007/1-4020-2233-6>.
8. Brennen C.E. Cavitation and Bubble Dynamics. Oxford University Press, 1995. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195094091.001.0001>.
9. Redlinger-Pohn J.D., Petkovšek M., Gordeyeva K., Zupanc M., Gordeeva A., Zhang Q., Dular M., Söderberg L.D. Cavitation Fibrillation of Cellulose Fiber // *Biomacromolecules*. 2022. Vol. 23(3). Pp. 847–862. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.1c01309>.
10. Li T., Chen C., Brozena A.H., Zhu J.Y., Xu L., Driemeier C., Dai J., Rojas O.J., Isogai A., Wagberg L., Hu L. Developing Fibrillated Cellulose as a Sustainable Technological Material // *Nature*. 2021. Vol. 590. Pp. 47–56. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-03167-7>.
11. Лиходеевский А.В. К вопросу о возрождении незаслуженно забытых технологий: техническая конопля // *Теория и практика мировой науки*. 2021. №3. С. 29–38.
12. Desanlis F., Cerruti N., Warner P. Hemp agronomics and cultivation // *Hemp: Industrial Production and Uses*. CAB International: Wallingford, UK; Boston, MA, USA, 2013. Pp. 98–124. <https://doi.org/10.1079/9781845937935.0098>.
13. Rijavec T., Janjić S., Ačko D.K. Revitalization of Industrial Hemp *Cannabis sativa* L. var. *sativa* in Slovenia: A Study of Green Hemp Fibres // *Tekstilec*. 2017. Vol. 60. Pp. 36–48. <https://doi.org/10.14502/Tekstilec2017.60.36-48>.
14. Visković J., Zheljaskov V.D., Sikora V., Noller J., Latković D., Ocamb C.M., Koren A. Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) agronomy and utilization: a review // *Agronomy*. 2023. Vol. 13. 931. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030931>.
15. Salmén L. Wood Cell Wall Structure and Organisation in Relation to Mechanics // *Plant Biomechanics: From Structure to Function at Multiple Scales*. Springer International Publishing: Cham, 2018. Pp. 3–19. https://doi.org/10.1007/978-3-319-79099-2_1.
16. Mittal V., Panghal A., Gupta R. Hemp (*Cannabis sativa* L.) agronomic practices, engineering properties, bioactive compounds and utilization in food processing industry // *Harvesting Food from Weeds*. 2023. Pp. 143–181. <https://doi.org/10.1002/9781119793007.ch5>.
17. Литвинова М.М., Алашкевич Ю.Д., Марченко Р.А., Савенков С.С. Анализ прироста степени помола однолетних растительных полимеров в целлюлозно-бумажном производстве // *Хвойные бореальной зоны*. 2024. Т. 42, №5. С. 61–65. <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-5-61-65>.
18. Патент №2363792 С1 (РФ). Установка для измельчения волокнистого материала / Ю.Д. Алашкевич, В.И. Ковалев, А.И. Невзоров, Р.А. Марченко. – 10.08.2009.
19. Карелина А.А., Алашкевич Ю.Д., Кожухов В.А. Предподготовка однолетних растений для размола массы высокой концентрации в дисковых мельницах // *Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VII Всероссийской научно-технической конференции*. СПб, 2022. С. 176–179.

Поступила в редакцию 10 марта 2025 г.

После переработки 15 мая 2025 г.

Принята к публикации 15 мая 2025 г.

Litvinova M.M.*, Alashkevich Yu.D., Marchenko R.A., Bolgov D.G. THE INFLUENCE OF THE CIRCUMFERENTIAL ROTATION SPEED OF A MOVABLE BARRIER DURING HYDRODYNAMIC ACTION ON INDUSTRIAL HEMP

Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, Krasnoyarskiy rabochiy ave., 31, Krasnoyarsk, 660037, Russia, marg32883@gmail.com

The work is devoted to the study of the hydrodynamic grinding of industrial hemp in a "jet-barrier" type plant in order to optimize the process for the production of paper products. The purpose of the study is to determine the influence of the circumferential rotation speed of a movable barrier and its structure on the paper-forming properties of a fibrous semi-finished product and the physico-mechanical properties of the finished product. The effect of the rotational speed (900 and 2000 rpm) and the number of turbine blades (12 and 24) on the Shopper-Rigger grinding degree, water retention capacity, breaking length and penetration resistance has been experimentally studied. It has been found that an increase in the grinding time leads to an increase in the degree of grinding, and the nature of the dependences of water retention, breaking length and penetration resistance on the variable parameters varies significantly. Various types of dependencies (linear, parabolic, and inversely parabolic) have been identified, indicating the complex nature of the influence of hydrodynamic factors on fiber properties. The results obtained make it possible to identify trends for determining the optimal grinding modes of industrial hemp in order to achieve the necessary characteristics of paper products.

Keywords: Milling of industrial hemp, pulp and paper production, hydrodynamics, knife-free grinding, rotational speed.

For citing: Litvinova M.M., Alashkevich Yu.D., Marchenko R.A., Bolgov D.G. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2025, no. 2, pp. 391–398. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250216968>.

References

1. Korda Zh., Libnar Z., Prokop Yu. *Razmol bumazhnoy massy*. [Paper pulp grinding]. Moscow, 1967, 421 p. (in Russ.).
2. Alashkevich Yu.D. *Osnovy teorii gidrodinamicheskoy obrabotki voloknistykh materialov v razmol'nykh mashinakh: diss. ... dokt. tekhn. nauk*. [Fundamentals of the theory of hydrodynamic processing of fibrous materials in grinding machines: diss. ... Doctor of Technical Sciences]. Krasnoyarsk, 1987, 361 p. (in Russ.).
3. Marchenko R.A. *Intensifikatsiya beznozhevogo razmola voloknistykh polufabrikatov v tsellyulozno-bumazhnom proizvodstve: diss. ... kand. tekhn. nauk*. [Intensification of knifeless grinding of fibrous semi-finished products in pulp and paper production: diss. ... Cand. of Technical Sciences]. Krasnoyarsk, 2016, 161 p. (in Russ.).
4. Yerofeyeva A.A. *Beznoshevyy razmol voloknistykh polufabrikatov s uchetom reologicheskikh osobennostey suspenziy: diss. ... kand. tekhn. nauk*. [Knifeless grinding of fibrous semi-finished products taking into account the rheological properties of suspensions: diss. ... Cand. of Technical Sciences]. Krasnoyarsk, 2012, 134 p. (in Russ.).
5. Kutovaya L.V. *Kompleksnyy parametr protsessy obrabotki voloknistykh suspenziy beznozhevym sposobom v ustanovke tipa "Struya-Pregrada": avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk*. [Complex parameter of the process of processing fibrous suspensions by a knifeless method in a "Struya-Pregrada" type installation: author's abstract. diss. ... candidate of technical sciences]. Krasnoyarsk, 1998, 20 p. (in Russ.).
6. Litvinova M.M., Alashkevich Yu.D., Marchenko R.A. *Khvoynyye boreal'nyye zony*, 2024, vol. 42, no. 3, pp. 29–38. <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-2-88-94>. (in Russ.).
7. Franc J.-P., Michel J.-M. *Fundamentals of Cavitation*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2005, 306 p. <https://doi.org/10.1007/1-4020-2233-6>.
8. Brennen C.E. *Cavitation and Bubble Dynamics*. Oxford University Press, 1995. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195094091.001.0001>.
9. Redlinger-Pohn J.D., Petkovšek M., Gordeyeva K., Zupanc M., Gordeeva A., Zhang Q., Dular M., Söderberg L.D. *Biomacromolecules*, 2022, vol. 23(3), pp. 847–862. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.1c01309>.
10. Li T., Chen C., Brozena A.H., Zhu J.Y., Xu L., Driemeier C., Dai J., Rojas O.J., Isogai A., Wagberg L., Hu L. *Nature*, 2021, vol. 590, pp. 47–56. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-03167-7>.
11. Likhodeyevskiy A.V. *Teoriya i praktika mirovoy nauki*, 2021, no. 3, pp. 29–38. (in Russ.).
12. Desanlis F., Cerruti N., Warner P. *Hemp: Industrial Production and Uses*. CAB International: Wallingford, UK; Boston, MA, USA, 2013, pp. 98–124. <https://doi.org/10.1079/9781845937935.0098>.
13. Rijavec T., Janjić S., Aćko D.K. *Tekstilec*, 2017, vol. 60, pp. 36–48. <https://doi.org/10.14502/Tekstilec2017.60.36-48>.
14. Visković J., Zheljazkov V.D., Sikora V., Noller J., Latković D., Ocamb C.M., Koren A. *Agronomy*, 2023, vol. 13, 931. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030931>.
15. Salmén L. *Plant Biomechanics: From Structure to Function at Multiple Scales*. Springer International Publishing: Cham, 2018, pp. 3–19. https://doi.org/10.1007/978-3-319-79099-2_1.
16. Mittal V., Panghal A., Gupta R. *Harvesting Food from Weeds*, 2023, pp. 143–181. <https://doi.org/10.1002/9781119793007.ch5>.
17. Litvinova M.M., Alashkevich Yu.D., Marchenko R.A., Savenkov S.S. *Khvoynyye boreal'nyye zony*, 2024, vol. 42, no. 5, pp. 61–65. <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-5-61-65>. (in Russ.).
18. Patent 2363792 C1 (RU). 10.08.2009. (in Russ.).
19. Karelina A.A., Alashkevich Yu.D., Kozhukhov V.A. *Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazova-niye: materialy VII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. [Forests of Russia: policy, industry, science, education: materials of the VII All-Russian scientific and technical conference]. St. Petersburg, 2022, pp. 176–179. (in Russ.).

* Corresponding author.

Received March 10, 2025

Revised May 15, 2025

Accepted May 15, 2025

Сведения об авторах

Литвинова Маргарита Максимовна – аспирант,
marg32883@gmail.com

Алашкевич Юрий Давыдович – доктор технических наук,
профессор, академик РАО, alashkevichud@sibsau.ru

Марченко Роман Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой МАПТ,
marchenkora@sibsau.ru

Болгов Дмитрий Геннадьевич – аспирант,
dima.bolgov99@mail.ru

Information about authors

Litvinova Margarita Maksimovna – postgraduate student,
marg32883@gmail.com

Alashkevich Yuri Davydovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Education, alashkevichud@sibsau.ru

Marchenko Roman Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of MAPT, marchenkora@sibsau.ru

Bolgov Dmitry Gennadievich – postgraduate student,
dima.bolgov99@mail.ru