

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ

М.С. Василишин, О.С. Иванов, В.В. Будаева, Н.В. Бычин,
В.Н. Золотухин, Ю.А. Гисматулина

Экспериментально подтверждена возможность диспергирования технической целлюлозы, полученной из мискантуса в роторно-пульсационном аппарате (РПА). Выполнена оценка уровня напряжений, возникающих в обрабатываемой среде при её прохождении через радиальные зазоры многоступенчатого РПА.

Ключевые слова: техническая целлюлоза из мискантуса, диспергирование в роторно-пульсационном аппарате, оценка уровня напряжений в обрабатываемом материале.

Получение технической целлюлозы и продуктов её глубокой переработки из недревесных видов сырья является одним из перспективных направлений развития химической и других отраслей промышленности. В этой связи, высокопродуктивная растительная культура мискантус (российской селекции) [1, 2] может найти широкое применение в качестве промышленного источника целлюлозосодержащего сырья для производства специальных сортов бумаги [3, 4], эфиров целлюлозы [5] и ряда других востребованных продуктов.

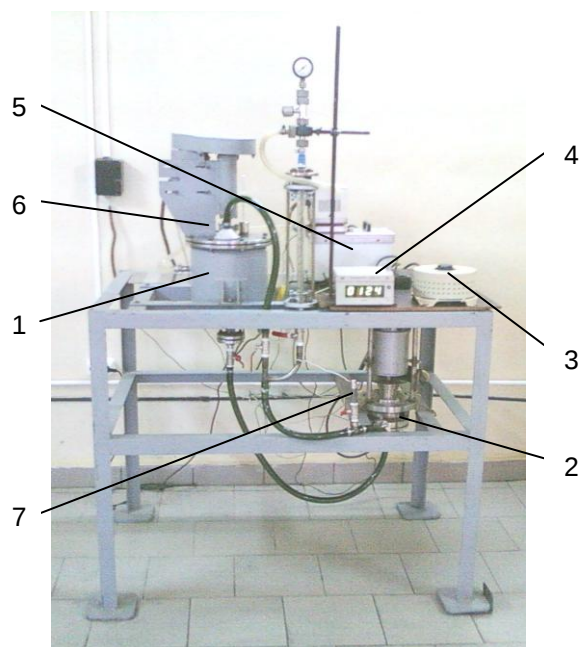
Производственный процесс получения технической целлюлозы из мискантуса включает несколько стадий: подготовку сырья, удаление из него лигнина, отмывку целлюлозы от водно-щелочного раствора и финишные операции с продуктом. Для обеспечения высоких технико-экономических показателей производства и требуемого качества обработки целлюлозы на отдельных стадиях процесса должно использоваться универсальное высокопроизводительное оборудование. В частности, для производства, например, эфиров целлюлозы исходный материал необходимо подвергать дополнительному измельчению (диспергированию) с целью придания ему комплекса специфических свойств (необходимая удельная поверхность, смачиваемость кислотами и др.). Эта операция может быть осуществлена с применением аппаратуры роторно-пульсационного типа (РПА), которая широко используется для решения различных технологических задач [6, 7].

Работа РПА базируется на использовании таких мощных факторов внешнего физического воздействия на обрабатываемую среду, как гидравлический удар, знакопеременное поле скоростей и давлений, кавитационные эффекты, вызывающих в ней значительные скорости сдвига. При этом в материале возникают напряжения, которые наряду со сдвиговыми, ис-

тирающими и другими нагрузками обеспечивают его эффективное диспергирование.

Целью настоящей работы является изучение возможности диспергирования технической целлюлозы, полученной из мискантуса и оценка уровня напряжений, возникающих в обрабатываемой суспензии при её прохождении через радиальные зазоры многоступенчатого РПА.

Диспергирование целлюлозы в воде проводили на лабораторной установке, внешний вид которой показан на рисунке 1.



- 1 – аппарат с перемешивающим устройством;
2 – роторно-пульсационный аппарат;
3 – автотрансформатор; 4 – тахометр;
5 – термостат; 6 – загрузочный люк;
7 – патрубок для отбора проб

Рисунок 1 – Внешний вид лабораторной установки

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ

В состав установки входит аппарат 1 с перемешивающим устройством. Ёмкость аппарата составляет $8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Основным элементом установки является РПА 2, который связан с аппаратом 1 трубопроводом в единый циркуляционный контур. Частота вращения ротора РПА регулируется при помощи автотрансформатора 3 и контролируется тахометром 4. В установке поддерживаются необходимый температурный режим обработки за счёт подачи нагретой воды в рубашку аппарата 1 от термостата 5. Загрузка воды и целлюлозы в аппарат 1 производится через люк 6, а отбор проб суспензии – через патрубок 7 в напорной линии установки.

Внутреннее устройство многоступенчатого РПА показано на рисунке 2.

Основным рабочим органом РПА является пара «ротор–статор», причём ротор выполнен по двухцилиндровой схеме, а статорная крышка – по трёхцилиндровой, благодаря чему достигается требуемый уровень обработки суспензии. Комплект сменных роторов обеспечивает в различных сочетаниях получение радиальных зазоров между ступенями $\delta_1 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и $\delta_2 = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Основные геометрические размеры рабочих органов РПА представлены в таблице 1.



Рисунок 2 – Внутреннее устройство многоступенчатого РПА (статорная крышка снята)

Диспергированию подвергалась техническая целлюлоза, полученная азотнокислым способом из мискантуса. Концентрация твёрдой фазы в суспензии во всех экспериментах составляла $18,6 \text{ кг/м}^3$. Обработку проводили в течение одного часа при температуре среды в рабочей камере РПА 20°C . Число оборотов ротора составляло 42 об/с.

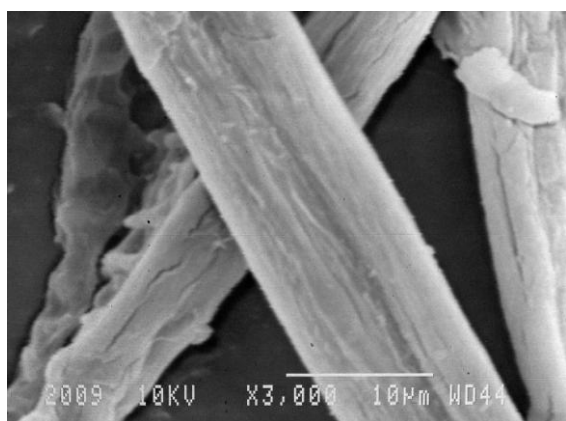
Таблица 1 – Основные геометрические размеры рабочих органов РПА

Часть РПА		Внутренний диаметр, 10^{-3} м	Наружный диаметр, 10^{-3} м	Число каналов, шт.	Ширина каналов, 10^{-3} м	Высота каналов, 10^{-3} м
Статор	Внутренний цилиндр	42	52	24	3	5
	Средний цилиндр	65	73	24	3	5
	Внешний цилиндр	85	93	48	3	5
Ротор*	Внутренний цилиндр	54	63	24	3	5
	Внешний цилиндр	75	83	36	3	5
Часть РПА	Число лопастей, шт.	Внутренний диаметр, 10^{-3} м		Наружный диаметр, 10^{-3} м	Высота лопасти, 10^{-3} м	Длина лопасти, 10^{-3} м
Крыльчатка	6	27		40	4	6,5
Часть РПА		Внутренний диаметр, 10^{-3} м				
Входной патрубок		27				
Выходной патрубок		22				

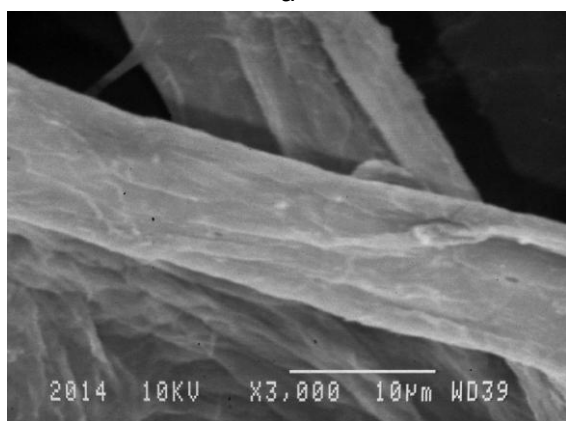
* – размеры для радиального зазора $\delta_1 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Отобранные пробы подвергались исследованию микроструктуры методом растровой электронной микроскопии. Микрофотографии

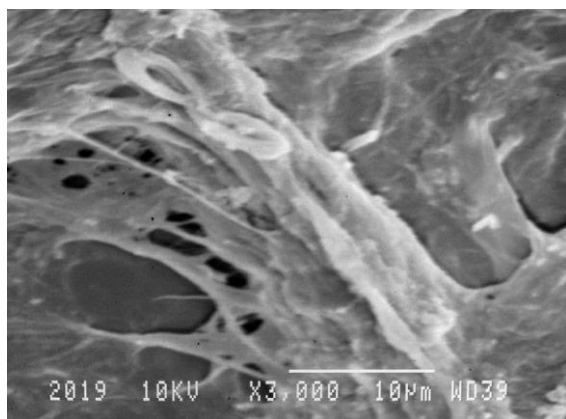
образцов целлюлозы до и после обработки в РПА представлены на рисунках 3 а, б, в.



а



б



в

Рисунок 3 – Микрофотографии образцов исходной целлюлозы (а), подвергнутой обработке в РПА с $\delta_1 = 1 \cdot 10^{-3}$ м (б) и $\delta_2 = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м (в)

Анализ микрофотографий показывает, что исходная целлюлоза (см. рисунок 3а) представляет собой волокнистый материал с достаточно гладкой наружной поверхностью и диаметром индивидуального волокна 25–30 мкм.

В результате обработки в РПА (см. рисунки 3б, в) морфология образца частично нарушается, при этом от исходных волокон отделяются индивидуальные фибриллы диа-

метром от 3 мкм (при $\delta_1 = 1 \cdot 10^{-3}$ м) до 0,4 мкм ($\delta_2 = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м). Между волокнами появляется достаточно гладкая плёнка, не имеющая ярко выраженной структуры.

Вместе с тем, в пробах присутствуют волокна, поверхность которых не претерпела существенных изменений в ходе обработки. Очевидно, что для увеличения эффекта диспергирования время обработки суспензии в РПА должно быть увеличено.

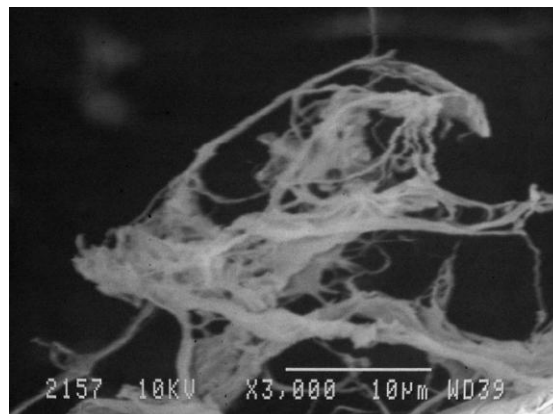


Рисунок 4 – Микрофотография образца целлюлозы после обработки в РПА (при $\delta_2 = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м) и последующей отмывки

Образец, полученный путём диспергирования в РПА с радиальным зазором $\delta_2 = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м (см. рисунок 4) был многократно промыт дистиллированной водой. В результате, присутствовавшая между волокнами плёнка исчезла и появилось большое количество тонких волокон диаметром 1 мкм и менее при их средней длине до 100–150 мкм.

Сравнение образцов целлюлозы, полученных при диспергировании в РПА с радиальными зазорами $\delta_1 = 1 \cdot 10^{-3}$ м и $\delta_2 = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м показывает, что с увеличением δ степень диспергирования снижается. Представляет интерес выполнить количественную оценку напряжений, возникающих в обрабатываемой среде при её прохождении через рабочие органы РПА.

Исследованиями [8, 9] установлено, что наибольшие значения диссипации энергии, вводимой в рабочую камеру РПА, имеют место в радиальных зазорах между цилиндрами ротора и статора. Очевидно, что здесь же обрабатываемый материал подвергается и максимальным разрушающим воздействиям. Представляет интерес оценить величину этих воздействий и возникающих в материале напряжений.

Сдвиговая скорость в соответствующих радиальных зазорах определяется геометри-

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ

ей рабочих органов аппарата и может быть рассчитана по зависимости:

$$G = R_i \omega / \delta, \quad (1)$$

где R_i – радиус соответствующей поверхности цилиндров ротора, м; ω – угловая скорость вращения ротора, рад/с; δ – радиальный зазор, м.

В [10] показано, что растягивающие усилия, действующие на частицы твёрдой фазы суспензии со стороны дисперсионной среды определяется выражением:

$$F = \xi \rho S_m^2 G^2, \quad (2)$$

где $\xi = f(Re)$ – коэффициент гидродинамического сопротивления; ρ – плотность суспензии, кг/м³; S_m – площадь сечения частицы плоскостью, перпендикулярной потоку, м².

Критерий Рейнольдса для сдвиговых течений рассчитывается по соотношению:

$$Re = \rho G R_i^2 / \mu, \quad (3)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости суспензии, Па·с.

Течение обрабатываемой среды через рабочие органы РПА происходит в развитом турбулентном режиме. В этом случае коэффициент гидродинамического сопротивления потоку может быть определён по зависимости [11]:

$$\xi = 1,09 / Re^{0,14}. \quad (4)$$

Суспензия технической целлюлозы характеризуется следующими параметрами: $\rho = 1033$ кг/м³; $\mu = 1,76 \cdot 10^{-3}$ Па·с; $d_c = 5 \cdot 10^{-5}$ м. С учётом выражений (1)–(4) получены оценочные значения нагрузок и растягивающих напряжений для отдельных волокон материала при прохождении через радиальные зазоры РПА (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Оценочные значения нагрузок и растягивающих напряжений в волокнах технической целлюлозы при радиальных зазорах $\delta_1 = 1 \cdot 10^{-3}$ м и $\delta_2 = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м

№ зазора	$G \cdot 10^{-3}, \text{ с}^{-1}$		$F \cdot 10^5, \text{ кН}$		$Re \cdot 10^{-6}$		$\sigma, \text{ Па}$	
	δ_1	δ_2	δ_1	δ_2	δ_1	δ_2	δ_1	δ_2
1	6,83	68,3	2,5	180	2,92	27,3	26	1830
2	8,48	84,8	3,6	260	5,55	52,3	35	2610
3	9,58	95,8	4,3	310	7,91	75,3	43	3130
4	11,09	110,9	54	400	12,26	117,0	54	3960

Анализ данных таблицы 2 подтверждает экспериментально обнаруженный факт сни-

жения степени диспергирования твёрдой фазы суспензии целлюлозы в радиальных зазорах РПА «больших» размеров. Это объясняется снижением сдвиговой скорости и соответствующим уменьшением (на два порядка) возникающих в объёме суспензии растягивающих напряжений.

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность эффективного диспергирования целлюлозы из мискантуса с использованием аппаратуры роторно-пульсационного типа. Выполнена оценка уровня возникающих в обрабатываемой среде растягивающих напряжений.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта № II.2 Комплексной программы СО РАН «Интеграция и развитие».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шумный, В. К. Новая форма мискантуса китайского (веечника китайского, *Miscanthus sinensis* Anders) как перспективный источник целлюлозосодержащего сырья / В. К. Шумный, С. Г. Вепрев, Н. Н. Нечипоренко, Т. Н. Горячковская, Н. М. Слинько, Н. А. Колганов, С. Е. Пельтек // Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2010. – Т. 14, № 1. – С. 122–126.
2. Будаева, В. В. Показатели качества целлюлозы, полученной азотнокислым способом в лабораторных и опытно-промышленных условиях из мискантуса / В. В. Будаева, Ю. А. Гисматулина, В. Н. Золотухин, Г. В. Сакович, С. Г. Вепрев, В. К. Шумный // Ползуновский вестник. – 2013. – № 3. – С. 162–168.
3. Jones, M. B. *Miscanthus: For Energy and Fibre* / M. B. Jones, M. Walsh. – Published by Earthscan, 2001. – 192 p.
4. Гисматулина, Ю. А. Структурно-размерные характеристики целлюлозы из мискантуса / Ю. А. Гисматулина, Ю. В. Севастьянова, В. В. Будаева, В. Н. Золотухин // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2-16. – С. 3523–3526.
5. Гисматулина, Ю. А. Азотнокислый способ получения целлюлозы из мискантуса – предшественника нитратов целлюлозы / Ю. А. Гисматулина, В. В. Будаева, Г. В. Сакович // Известия академии наук. Серия химическая. – 2015. – № 12. – С. 2949–2953.
6. Балабудкин, М. А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности / М. А. Балабудкин. – М.: Медицина, 1983. – 159 с.
7. Василишин, М. С. Экстракция арабиногалактана из опилок лиственницы сибирской в аппарате роторно-пульсационного типа / М. С. Василишин, В. В. Будаева, А. А. Кухленко, А. Г. Карпов, О. С. Иванов, С. Е. Орлов, В. А. Бабкин, Е. Н. Медведева // Ползуновский вестник. – 2010. – № 4-1. – С. 168–173.
8. Промтов, М. А. Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на

обрабатываемые вещества / М. А. Промтов. – М. : Машиностроение, 2004. – 136 с.

9. Богданов, В. В. Эффективные малообъемные смесители / В. В. Богданов, Е. И. Христофоров, Б. А. Клоцунг. – Л. : Химия, 1989. – 224 с.

10. Долинский, А. А. Использование механизмов ДИВЭ при роторно-пульсационной обработке гетерогенных сред / А. А. Долинский, Г. К. Иваницкий, А. Н. Ободович // Промышленная теплотехника. – 2008. – № 4, Т. 30. – С. 5–13.

11. Альтшуль, А. Д. Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтшуль. – М. : Недра, 1982. – 224 с.

Василишин Михаил Степанович, к.т.н., доцент, заведующий Лабораторией процессов и аппаратов химических технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, 659322, e-mail: ipcet@mail.ru.

Иванов Олег Сергеевич, к.т.н., научный сотрудник Лаборатории процессов и аппаратов химических технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, 659322, e-mail: ipcet@mail.ru.

Будаяева Вера Владимировна, к.х.н., доцент, заведующая Лабораторией биоконверсии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института про-

блем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, 659322, e-mail: budaeva@ipcet.ru.

Бычин Николай Валерьевич, старший научный сотрудник Лаборатории физико-химических основ создания энергетических конденсированных систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, 659322, e-mail: ipcet@mail.ru.

Золотухин Владимир Николаевич, к.т.н., старший научный сотрудник Лаборатории биоконверсии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, 659322, e-mail: ipcet@mail.ru.

Гисматулина Юлия Александровна, аспирант, младший научный сотрудник Лаборатории биоконверсии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, 659322, e-mail: julja.gismatulina@rambler.ru.