

УДК 674.04  
ББК 37.130.3  
В40

*Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Казанского национального исследовательского технологического университета*

*Рецензенты:*  
*д-р техн. наук Е. Ю. Разумов*  
*главный инженер ООО «НПП «ТермоДревПром» А. А. Сычев*

**Авторы: С. А. Пушкин, А. А. Макаров, А. Н. Грачев,  
Г. М. Бикбулатова**

**В40** Взаимодействие компонентов клеточной стенки древесины березы и сосны при термической обработке в режиме торрефикации : монография / С. А. Пушкин, А. А. Макаров, А. Н. Грачев, Г. М. Бикбулатова; Минобрнауки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2023. – 100 с.

ISBN 978-5-7882-3381-9

Рассмотрены различные виды термохимической переработки древесины, дан анализ современного состояния техники и технологий торрефикации, описаны научные основы торрефикации как метода обработки древесных отходов. Представлена физико-химическая картина процесса, выдвинуто предположение о капсуляции микрофибрилл целлюлозы, и описаны методы исследования торрефикации образцов. Проанализированы результаты экспериментальных исследований процесса торрефикации древесины сосны и березы и промышленной реализации полученных данных в области торрефикации отходов древесины. Приведены конструкции пилотной и промышленной установок, итоги промышленных испытаний, предложены рекомендации по использованию торрефицированной древесины в качестве сырья, произведена оценка экономической эффективности процесса.

Предназначена для бакалавров и магистрантов, обучающихся по направлению 18.03.01 и 18.04.01 «Химическая технология». Может также использоваться при проведении практических занятий и при самостоятельном изучении предмета.

Подготовлена на кафедре химической технологии древесины.

**УДК 674.04  
ББК 37.130.3**

ISBN 978-5-7882-3381-9

© Пушкин С. А., Макаров А. А., Грачев А. Н.,  
Бикбулатова Г. М., 2023

© Казанский национальный исследовательский  
технологический университет, 2023

# СОДЕРЖАНИЕ

Список сокращений и условных обозначений .....	5
Введение .....	6
<b>1. НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОЦЕССА ТОРРЕФИКАЦИИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ .....</b>	<b>8</b>
1.1. Структура клеточной стенки древесины и ее биохимический состав .....	8
1.2. Существующие термохимические способы переработки древесных отходов.....	13
1.3. Современные исследования и научные основы процесса торрефикации .....	17
1.4. Современное состояние техники и технологии процесса торрефикации.....	20
<b>2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ТОРРЕФИКАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ.....</b>	<b>28</b>
2.1. Физико-химическая картина процесса торрефикации.....	28
2.2. Выбор объекта исследования .....	36
2.3. Экспериментальные стенды для исследования процесса торрефикации древесных материалов.....	37
2.4. Экспериментальные методы анализа торрефицированных образцов и компонентов клеточной стенки.....	38
2.4.1. Экспериментальный метод исследования торрефицированных образцов методом синхронного термического анализа .....	39
2.4.2. Экспериментальный метод определения теплоты сгорания образцов древесины при торрефикации .....	39
2.4.3. ИК-спектроскопический анализ торрефицированных образцов древесины.....	41
2.4.4. Экспериментальный метод анализа экстрактивных веществ торрефицированных образцов в полярном растворителе .....	42
2.4.5. Экспериментальный метод анализа моносакхаридного состава углеводов торрефицированных образцов, гидролизуемых трифторуксусной кислотой .....	42
2.4.6. Экспериментальный метод определения содержания кристаллической целлюлозы в торрефицированных образцах .....	43
2.4.7. Экспериментальный метод определения гемицеллюлоз в торрефицированных образцах путем щелочного гидролиза .....	43
2.4.8. Экспериментальный метод оценки целлюлозных полисахаридов торрефицированных образцов путем делигнификации .....	44
2.4.9. Методы статистической обработки результатов экспериментов.....	45

<b>3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ТОРРЕФИКАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ И БЕРЕЗЫ .....</b>	<b>46</b>
3.1. Анализ материального баланса и теплоты сгорания при торрефикации древесины сосны и березы.....	46
3.2. Анализ результатов экспериментальных исследований компонентов клеточной стенки древесины березы и сосны при торрефикации.....	47
3.2.1. Влияние процесса торрефикации на углеводные компоненты клеточной стенки древесины сосны и березы.....	47
3.2.2. Анализ результатов экспериментального исследования содержания кристаллической целлюлозы при торрефикации древесины сосны и березы.....	51
3.2.3. Анализ результатов экспериментального исследования процесса торрефикации древесины методом синхронного термического анализа.....	52
3.2.4. Анализ результатов исследования компонентов клеточной стенки древесины березы и сосны методом инфракрасной спектроскопии .....	54
3.2.5. Анализ результатов исследования экстрактивных веществ в полярном растворителе .....	60
3.2.6. Анализ результатов исследования делигнификации древесины березы и сосны в процессе торрефикации.....	63
3.2.7. Анализ изменений, происходящих с компонентами клеточных стенок древесины сосны и березы при торрефикации .....	66
<b>4. ПРОМЫШЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ТОРРЕФИКАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ОТХОДОВ ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА.....</b>	<b>72</b>
4.1. Оценка путей промышленной реализации технологии торрефикации отходов лесопромышленного комплекса .....	72
4.2. Пилотная установка торрефикации древесных материалов .....	75
4.3. Оценка энергетических затрат на измельчение исходной и торрефицированной древесины .....	80
4.4. Промышленная реализация стадии торрефикации при производстве древесного угля из отходов лесопромышленного комплекса.....	82
4.5. Техничко-экономическая оценка промышленной реализации технологии торрефикации отходов лесопромышленного комплекса .....	87
Заключение .....	89
Список литературы.....	90