

УДК 674.04  
ББК 35.762  
Э65

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

*Рецензенты:  
канд. техн. наук П. А. Кайнов  
д-р техн. наук А. З. Халитов*

**Э65 Авторы: Г. М. Бикбулатова, С. А. Забелкин, В. Н. Башкиров,  
А. Р. Валеева, А. Н. Грачев**

Энергетическое использование древесины с применением технологии быстрого пиролиза : монография / Г. М. Бикбулатова, С. А. Забелкин, В. Н. Башкиров [и др.]; Минобрнауки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2022. – 156 с.

ISBN 978-5-7882-3084-9

Рассмотрены в совокупности процессы переработки древесины в жидкое топливо термохимическим методом и последующее энергетическое использование полученного топлива методом сжигания с применением существующего оборудования.

Предназначена для бакалавров направления 18.03.01 «Химическая технология» профиля «Химическая переработка древесины».

Подготовлена на кафедре химической технологии древесины.

**УДК 674.04  
ББК 35.762**

ISBN 978-5-7882-3084-9 © Бикбулатова Г. М., Забелкин С. А.,  
Башкиров В. Н., Валеева А. Р.,  
Грачев А. Н., 2022  
© Казанский национальный исследовательский  
технологический университет, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| Введение.....   | 7  |
| Глава I. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР И СОВРЕМЕННОЕ<br>СОСТОЯНИЕ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ<br>ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ<br>С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРОГО ПИРОЛИЗА ..... | 8  |
| 1.1. Роль биомассы дерева в мировой энергетике .....  | 8  |
| 1.2. Классификация древесных отходов .....  | 11 |
| 1.2.1. Лесосечные отходы при заготовке и транспортировке .....  | 12 |
| 1.2.2. Отходы при производстве лесоматериалов .....   | 13 |
| 1.2.3. Отходы производства целлюлозы .....  | 13 |
| 1.3. Технологии энергетического использования биомассы дерева .....   | 14 |
| 1.4. Энергетическое использование жидких продуктов термического<br>разложения древесины.....  | 20 |
| 1.4.1. Использование жидких продуктов термического разложения<br>древесины в котлах.....  | 20 |
| 1.4.2. Газификация пиролизной жидкости .....  | 23 |
| 1.4.3. Использование пиролизной жидкости в дизельных двигателях<br>.....  | 24 |
| 1.4.4. Использование пиролизной жидкости в газовых турбинах.....  | 31 |
| 1.4.5. Совмещенное сжигание пиролизной жидкости и ископаемых<br>топлив.....   | 39 |
| 1.4.6. Другие направления энергетического использования пиролиз-<br>ной жидкости .....  | 40 |

## Глава II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОВОКУПНОСТИ ПРОЦЕССОВ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ С ОБРАЗОВАНИЕМ ПИРОЛИЗНОЙ ЖИДКОСТИ И ЕЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ..... 42

- 2.1. Физико-химическая картина совокупности процессов термического разложения древесины с образованием пиролизной жидкости и ее энергетического использования..... 42
- 2.2. Формализация процессов энергетического использования древесины с применением технологии быстрого пиролиза ..... 49
- 2.3. Математическая модель процессов энергетического использования древесины с применением технологии быстрого пиролиза..... 52
- 2.4. Алгоритм расчета математической модели горения пиролизной жидкости ..... 66

## Глава III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ В ЖИДКОЕ ТОПЛИВО И ЕГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ..... 68

- 3.1. Экспериментальные стенды для исследования процесса переработки древесины в жидкое топливо и его энергетического использования..... 68
  - 3.1.1. Экспериментальный стенд для исследования процесса термического разложения древесины ..... 68
  - 3.1.2. Экспериментальный стенд для исследования процесса сжигания пиролизной жидкости ..... 73
- 3.2. Методика проведения исследований процесса переработки древесины в жидкое топливо и его энергетического использования..... 77
  - 3.2.1. Методика проведения исследований процесса термической переработки древесины ..... 77
  - 3.2.2. Методика проведения исследований процесса сжигания пиролизной жидкости ..... 78
- 3.3. Исследование свойств пиролизной жидкости..... 79

|   |            |
|---|------------|
| 3.3.1. Определение фракционного состава пиролизной жидкости ...   | 79         |
| 3.3.2. Исследование химического состава пиролизной жидкости ....  | 80         |
| 3.3.3. Исследование физических и топливных свойств пиролизной<br>жидкости .....   | 84         |
| 3.3.4. Исследование кинетики и выхода продуктов при термическом<br>разложении пиролизной жидкости.....  | 85         |
| 3.3.5. Исследование продуктов термического разложения пиролиз-<br>ной жидкости .....  | 89         |
| 3.4. Анализ результатов экспериментального исследования<br>и математического моделирования процесса переработки древесины<br>в жидкое топливо и его энергетического использования ..... | 90         |
| 3.4.1. Анализ результатов математического моделирования<br>и экспериментальных исследований процесса термического<br>разложения древесины.....  | 90         |
| 3.4.2. Анализ результатов исследования кинетики и выхода<br>продуктов при термическом разложении пиролизной жидкости .....  | 95         |
| 3.4.3. Анализ результатов экспериментальных исследований<br>и математического моделирования процесса сжигания пиролизной<br>жидкости .....  | 101        |
| <b>Глава IV. ПРОМЫШЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ<br/>ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ<br/>В ЖИДКОЕ ТОПЛИВО И ЕГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО<br/>ИСПОЛЬЗОВАНИЯ .....</b>                | <b>110</b> |
| 4.1. Промышленная реализация технологической стадии переработки<br>древесины в жидкое топливо.....  | 110        |
| 4.1.1. Разработка способа переработки древесины в пиролизную<br>жидкость .....  | 110        |
| 4.1.2. Опытнo–промышленная установка для переработки<br>древесных отходов методом термического разложения .....   | 114        |

|  |     |
|--|-----|
| 4.2. Промышленная реализация технологической стадии энергетического использования пиролизной жидкости .....                  | 119 |
| 4.2.1. Использование пиролизной жидкости в промышленной горелке испарительного типа .....                                    | 119 |
| 4.2.2. Опытнo–промышленная установка энергетического использования пиролизной жидкости .....                                 | 121 |
| 4.2.3. Использование пиролизной жидкости в горелке распылительного типа.....   | 125 |
| 4.2.4. Исследование состава продуктов сгорания пиролизной жидкости .....   | 128 |
| 4.3. Техничко-экономическая оценка технологии переработки древесины в жидкое топливо и его энергетического использования.... | 132 |
| Заключение.....  | 141 |
| Библиографический список .....   | 144 |