(снижается от 5 % до нуля) и допустимой статической ошибке ε (снижается от 10 % до нуля).

Таблица

Основные показатели качества переходных процессов

Параметр	Система	При управлении				При возмущении			
		$t_{пп}$, с	σ, %	ε, %	M	$t_{пп}$, с	σ, %	ε, %	M
Ток якоря	САУ с МР	0,7	45	0	1,5	0,8	25	0	1,5
	САУ с СПР	1,8	35	0	9	6,0	35	0	12
Скорость $w2$	САУ с МР	0,7	0	0	0,5	0,8	5	5	1,5
	САУ с СПР	1,8	5	-5	9	6,0	15	10	12

Выводы:

1. Разработана математическая модель системы управления двухмассовой электромеханической системы с использованием модального регулятора желаемой эталонной формы на примере электропривода рольганга широкополосного листового прокатного стана.

2. Проведено исследование показателей качества переходных процессов САУ нелинейной двухмассовой ЭМС традиционной структуры подчиненного регулирования и с модальным регулятором.

3. Показана высокая эффективность использования модального управления электроприводами в металлургических агрегатах с нежесткой механикой по сравнению с традиционными регуляторами и способами управления.

Литература

1. *Григорьев, В.В.* Синтез систем автоматического управления методом модального управления / [В.В. Григорьев и др.]. – СПб., 2007.

2. *Кочнева, Т.Н.* Модальное управление электромеханическими системами в металлургии / Т.Н. Кочнева, А.В. Кожевников, Н.В. Кочнев // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2013. – № 1 (45). – Т. 1. – С. 14 – 19.

УДК 541.124

П.А. Марьяндышев, А.А. Чернов, Н.В. Шкаева, В.К. Любов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ БИОТОПЛИВА

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП НО «Арктика» при частичной финансовой поддержке Минобрнауки РФ

Проведен термический анализ древесной биомассы для определения кинетических характеристик основных процессов термического разложения биотоплива. Экспериментальные исследования проводились на синхронном термоанализаторе STA 449 F3 Jupiter фирмы “Netzsch Geratebau GmbH. Selb” (Германия). По результатам экспериментальных исследований определены значения кинетических констант, температурные интервалы начала выхода и максимальной скорости выделения летучих веществ в инертной среде, получены оптимальные диапазоны для энерготехнологической переработки древесных отходов.

Древесная биомасса, термический анализ, синхронный термоанализатор, термический эффект, энергия активации, предэкспоненциальный множитель.

Thermal analysis of the wood biomass was carried out for the definition of kinetic characteristics of the basic processes of thermal decomposition of biofuels. Experimental researches were done on the synchronous thermoanalyzer Netzsch F3 Jupiter STA 449. Values of kinetic constants, temperature intervals of the devoltalization beginning and maximum speed of the volatiles thermal decomposition in the inert environment, optimum ranges for energy technological processing of the wood waste were defined.

Wood biomass, thermal analysis, synchronous thermoanalyzer, thermal effect, activation energy, pre-exponential factor.

Одним из приоритетных направлений развития энергетики является использование возобновляемых источников энергии. К таким источникам относится древесная биомасса, использование которой в регионах с развитым лесопромышленным комплексом является перспективным решением, позволяющим обеспечить энергетическую независимость региона. Кроме того, энергетическое использование древесных отходов позволяет решить многие проблемы, такие как: утилизация побочных продуктов лесозаготовительных и деревообрабатывающих предприятий, получение более дешевой энергии, снижение вредного воздействия на окружающую среду и др. [1].

В процессе термического разложения твердого топлива определяющим фактором является выход летучих веществ. Поэтому для расчета процесса тер-

мического разложения топлива необходимо знать кинетические характеристики этого процесса [2]. Принципиальная схема установки для проведения комплексного термического анализа биотоплива приведена на рис. 1.

Экспериментальные исследования проводились на синхронном термоанализаторе STA 449 F3 Jupiter фирмы “Netzsch Geratebau GmbH. Selb” (Германия), работающем в интервале температур 20 – 1400 °С (рис. 1). Термоанализатор STA 449 F3 Jupiter работает под управлением программного пакета Proteus, с помощью которого проводились все необходимые измерения и обработка полученных результатов. Результатом термической обработки образцов являлись данные термогравиметрического (ТГ) анализа и дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК), строящиеся в автоматическом режиме и обрабатываемые с помощью программного пакета Proteus, поставляемого совместно с установкой. Далее ТГ-кривые импортировались в программное обеспечение Netzsch Thermokinetics 3, также поставляемое совместно с установкой, где и происходила обработка полученных результатов: определение кинетических параметров процесса выхода летучих веществ.

Предварительно экспериментальные образцы были подвергнуты размолу в шаровой барабанной мельнице, просеяны на ситовом анализаторе до гранулометрического состава от 63 до 125 мкм. Средняя масса образца для наполнения тигля, помещаемого в экспериментальную установку, была выбрана 5 мг. Каждая фракция исследуемого материала подвергалась термической обработке в диапазоне температур 20 – 1300 °С в среде аргона с расходом газа 20 $см^3$/мин. При температурах выше 1300 °С процесс термолиза можно считать практически законченным.

Исследование процесса термического разложения проводилось для проб древесины разной породы; пеллет, полученных из разных пород древесины; сухостоя. Экспериментальные данные по всем видам исследуемых образцов сведены в таблицу.

Используя программное обеспечение Netzsch Thermokinetics 3, были получены значения энергии активации для заданного диапазона температур – процесса выхода летучих веществ. Согласно [3], введение полюса, в котором сходятся линии логарифма константы скорости реакции от обратной температуры по мере роста температуры, позволяет связать между собой энергию активации и предэкспоненциальный множитель с помощью зависимости Аррениуса либо выразить константу скорости реакции, зная только энергию активации. Анализ экспериментальных данных приводит к выводу, что полюс должен быть расположен в области достаточно высоких температур [3]. По мере повышения температуры линии констант скоростей сближаются и, начиная с некоторой температуры, близкой к температуре сублимации углерода, должны сливаться в одну, так как исчезают различия, вызванные разной структурой кокса и строением решетки углерода кокса. Для расчета предэкспоненциального множителя использовались следующие координаты полюса, предложенные Шестаковым С.М.: k^*=100 м/с, T^* = 2600 °К. В этом случае связь между k_0 и E описывается уравнением:

$$\lg k_0 = 0,2 \cdot 10^{-4} E + 2 .$$

Некоторые результаты термического анализа для различных материалов, полученные при скорости нагрева 10 °С в минуту, приведены в таблице, а изменение массы испытуемых образцов при разной скорости нагрева показано на рис. 2, 3.

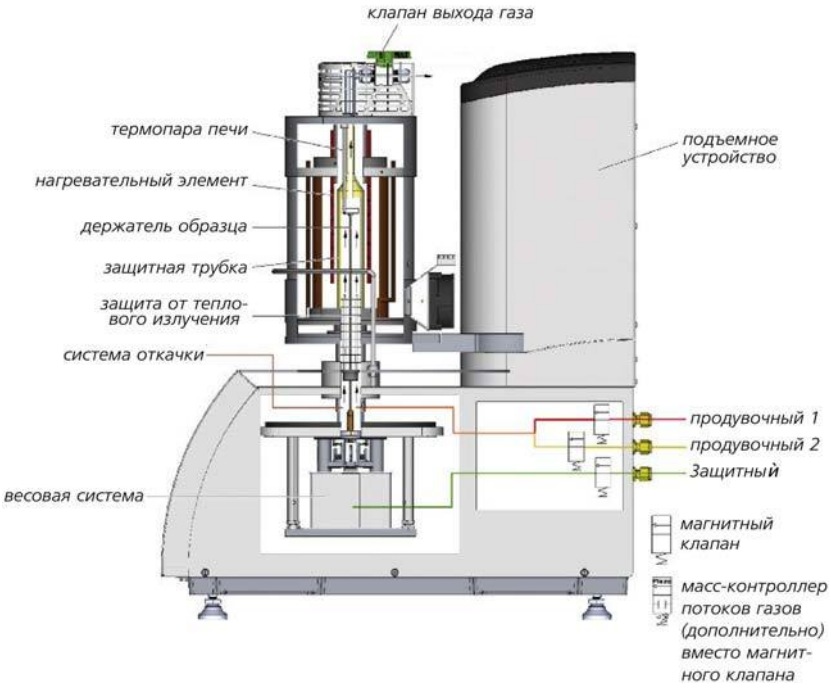


Рис. 1. Синхронный термоанализатор STA 449 F3 Jupiter

Таблица

Результаты комплексного термического анализа биотоплива разного происхождения

Исследуемый образец	Температурные диапазоны, °С		Тепловыделение, Дж/г	Изменение c_p, Дж/(г•°С)	E, кДж/моль	k_0, м/с
	Сушка	Выход летучих				
1 серия опытов для сухостоя						
Сухостой сосны (вверх)	20…118	212…381 (356)*	22008	39,429	73,18	2908,04
Сухостой сосны (середина)	20…122	217…379 (365)	26959	36,635	73,69	2977,15
Сухостой сосны (низ)	20…126	220…377 (330)	22974	48,103	76,17	3337,34
2 серия опытов для гранул						
Исследуемый образец	Температурные диапазоны, °С		Тепловыделение, Дж/г	Изменение c_p, Дж/(г•°С)	E, кДж/моль	k_0, м/с
	Сушка	Выход летучих				
Гранулы из торфа	20…111	225…489 (292)	22125	45,070	72,23	2783,56
Гранулы из сосны	20…123	219…381 (357)	19309	37,611	72,69	2843,15
Гранулы из березы	20…119	214…381 (362)	16932	37,747	72,05	2760,58
Гранулы из ели	20…123	223…377 (355)	16167	35,515	73,15	2904,02
Гранулы из коры	20…115	211…376 (356)	14409	34,499	65,51	2042,68
3 серия опытов для разных пород древесины						
Исследуемый образец	Температурные диапазоны, °С		Тепловыделение, Дж/г	Изменение c_p, Дж/(г•°С)	E, кДж/моль	k_0, м/с
	Сушка	Выход летучих				
Береза	20…123	227…371 (356)	27322	37,222	74,21	3049,30
Ель	20…120	221…377 (356)	19434	48,989	71,99	2752,96
Осина	20…120	222…369 (348)	35337	51,329	71,61	2705,20
Сосна	20…120	223…375 (355)	33982	63,136	74,12	3036,69

Изменение массы образцов в процессе нагрева можно разбить на несколько характерных областей. Первая область, соответствующая интервалу температур от 20 до 120 °С, связана с выходом физической влаги. В зависимости от исследуемого образца температура завершения процесса сушки меняется. Далее до температуры 200 °С изменение массы стабилизируется. При дальнейшем повышении температуры происходит резкое уменьшение массы, связанное с выходом летучих веществ (рис. 2, 3). При достижении температур 380 °С процесс термического разложения замедляется, а при температурах выше 500 °С практически прекращается.

Для образцов, полученных из еловых гранул, изменение массы происходит более интенсивно при данных скоростях нагрева, чем для различных пород древесины (березы, ели, осины, сосны), что видно на рис. 2, 3.

Значения энергии активации практически для всех образцов, исследованных биотоплив, имеют близкие значения (см. таблицу), изменяясь в диапазоне от 65 до 74,21 кДж/моль, что соответствует данным [4].

Исходя из того, что процесс термолиза топлива представляет собой разрыв физико-химических связей внутри его составляющих с последующим весьма быстрым образованием конечных продуктов разложения, можно выделить отдельные группы связей, которые разрушаются при определенных условиях с определенной скоростью, примерно одинаковой для данной группы. Рассматривая торфяные гранулы, можно сделать вывод, что связи периферийной части макромолекул наименее слабые, так как энергия активации имеет меньшее значение по сравнению с древесными породами и гранулами, полученными из них. Древесина березы имеет самые прочные связи, так как разрыв данных связей происходит при значении энергии активации 74,21 кДж/моль. Остальные породы древесины имеют примерно равные по прочности межмолекулярные связи, так как энергии активации имеют близкие значения.

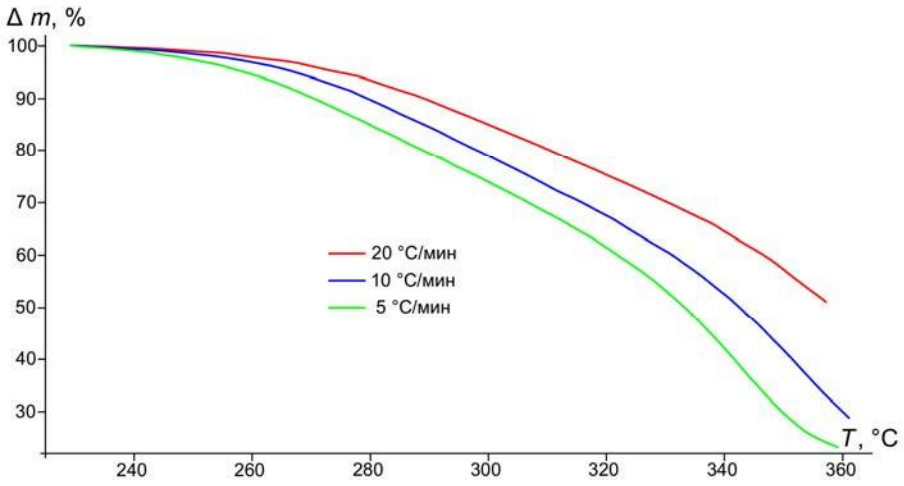


Рис. 2. Изменение относительной массы образца березы в процессе выхода летучих веществ при разных скоростях нагрева

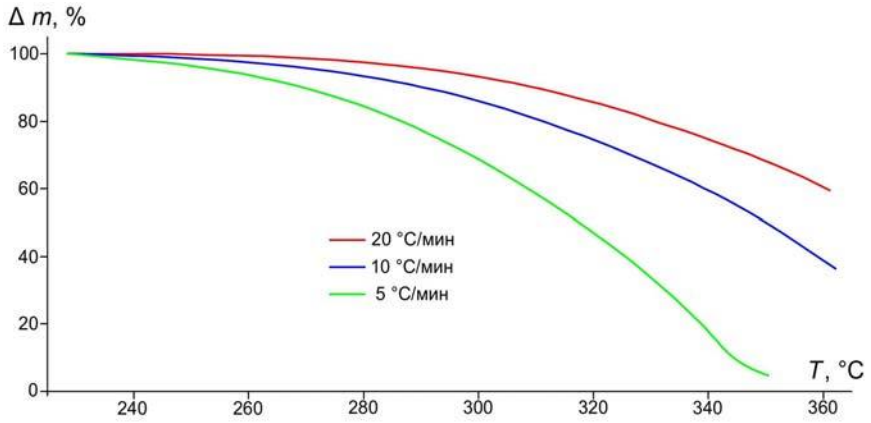


Рис. 3. Изменение относительной массы еловых гранул в процессе выхода летучих веществ при разных скоростях нагрева

Полученные результаты показали, что процесс производства гранулированного топлива оказывает влияние на прочность межмолекулярных связей в древесине, при этом значения энергии активации снижаются, особенно сильно для коры (см. таблицу). Для сухостойной древесины сосны наблюдается незначительное повышение энергии активации, однако данный вывод требует дополнительной проверки. Наименьшую прочность межмолекулярных связей из исследованных пород древесины имеет осина.

Выводы:

1. Исследован процесс термического разложения и выхода летучих веществ для биотоплив различного происхождения.

2. Определены значения кинетических констант, температурные интервалы начала выхода и максимальной скорости выделения летучих веществ в инертной среде, получены оптимальные диапазоны для энерготехнологической переработки древесных материалов.

3. Результаты выполненных исследований следует использовать при расчетах процессов и установок, связанных с термической подготовкой, энерготехнологической переработкой или сжиганием различных биотоплив, а также при проведении режимно-наладочных работ.

Литература

1. *Любов, В.К.* Повышение эффективности энергетического использования биотоплив / В.К. Любов, С.В. Любова. – Архангельск, 2010.

2. *Любов, В.К.* Совершенствование топливно-энергетического комплекса путем повышения эффективности сжигания топлива и вовлечения в энергетический баланс отходов переработки биомассы и местного топлива: дис. … д-ра техн. наук / В.К. Любов. – Астрахань, 2004.

3. *Померанцев, В.В.* Основы практической теории горения / В.В. Померанцев. – Л., 1986.

4. *Померанцев, В.В.* Сборник задач по теории горения / [В.В. Померанцев и др.]. – Л., 1983.