

УДК 662.7

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ И ВОСПЛАМЕНЕНИЯ БИОТОПЛИВА****Марьяндышев П.А., Чернов А.А., Шкаева Н.В., Любов В.К.***ГОУ ВПО «Северный Арктический федеральный университет им. М.В. Ломоносова»,  
Архангельск, e-mail: pte@narfu.ru*

Проведен термический анализ древесной биомассы для разработки способов повышения эффективности ее энергетического использования в котельных агрегатах малой и средней мощности. Экспериментальные исследования проводились на синхронном термоанализаторе STA 449 F3 Jupiter фирмы «Netzsch Geratebau GmbH, Selb» (Германия). В качестве экспериментальных образцов было выбрано гранулированное биотопливо с ЗАО «Лесозавод 25», расположенного в городе Архангельске, Россия. По результатам экспериментальных исследований определены: оптимальный гранулометрический состав древесных материалов и скорость их нагрева. Проведенные эксперименты позволили определить температурные диапазоны и скорость изменения массы древесного топлива при протекании процессов сушки и выхода летучих веществ, а также тепловые эффекты, сопровождающие данные процессы.

**Ключевые слова:** древесная биомасса, термический анализ, синхронный термоанализатор, термический эффект

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE PROCESS OF THERMAL PROCESSING AND BIOFUEL IGNITION****Maryandyshov P.A., Chernov A.A., Shkaeva N.V., Lyubov V.K.***Northern Arctic Federal University n.a. M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, e-mail: pte@narfu.ru*

Thermal analysis of the wood biomass is carried out for the development of ways of the efficiency increase of its energy use in boilers of low and average capacities. Experiments were made on synchronous F3 Jupiter STA 449 thermoanalyzer; company «Netzsch Geratebau GmbH, Selb» (Germany). Experimental samples are the granulated biofuel from Saw Mill № 25 located in the city of Arkhangelsk, Russia. Following results of the experimental research are defined: optimum granulometric structure of wood materials and speed of its heating up. Done experiments allowed determining temperature ranges, speed of the weight change of the wood fuel during the processes of drying and volatiles decomposition, thermal effects during these processes.

**Keywords:** wood biomass, thermal analysis, synchronous thermoanalyzer, thermal effect

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].

Оценка возможности переработки древесных отходов показывает широкие перспективы их энергетического использования, однако существует множество факторов оказывающих определенное влияние на эффективность использования древесной биомассы. Например, влажность древесных топлив может меняться в довольно широких пределах. Это приводит к определенным трудностям при их использовании в существующих топочных устройствах. Также существенное влияние на эффектив-

ность сжигания оказывает гранулометрический состав топлива. Отклонения в размерах частиц, как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения от оптимального для данного типа топочного устройства снижают эффективность его работы. Кроме того, физико-химические и теплотехнические свойства различных видов древесной биомассы имеют некоторые отличия, поэтому знание специфических особенностей древесной биомассы позволяет обеспечить квалифицированную разработку и проведение мероприятий для экономически и экологически эффективной работы котлоагрегатов [2, 7].

В связи с этим исследование процессов, протекающих при сжигании древесного топлива, изучение влияния различных факторов на эффективность сжигания древесного топлива является весьма актуальной задачей. Для ее решения используют методы термического анализа.

**Цель исследования.** Проведение термического анализа древесной биомассы для разработки способов повышения эффективности ее энергетического использования в котельных агрегатах малой и средней мощности.

### Материалы и методы исследования

Наиболее подходящими методами термического анализа для определения реакционной способности твердых биотоплив являются: термогравиметрический анализ (ТГ-анализ), дифференциально-термогравиметрический (ДТГ-анализ), ДТА (дифференциально-термический анализ), ДСК (дифференциально-сканирующая калориметрия) и хроматография газовых смесей (ГХ-анализ).

Термогравиметрией, или термогравиметрическим анализом (ТГ) называют непрерывную реги-

страцию изменения массы исследуемого образца при изменении его температуры. Дифференциально-сканирующей калориметрией (ДСК) называют метод непрерывной регистрации термических эффектов (экзо- и эндотермических), которыми сопровождаются фазовые или химические превращения образца при нагреве [3].

Экспериментальные исследования проводились на синхронном термоанализаторе STA 449 F3 Jupiter фирмы «Netzsch Gerätebau GmbH, Selb» (Германия), работающем в интервале температур 20-1400 °С (рис. 1).

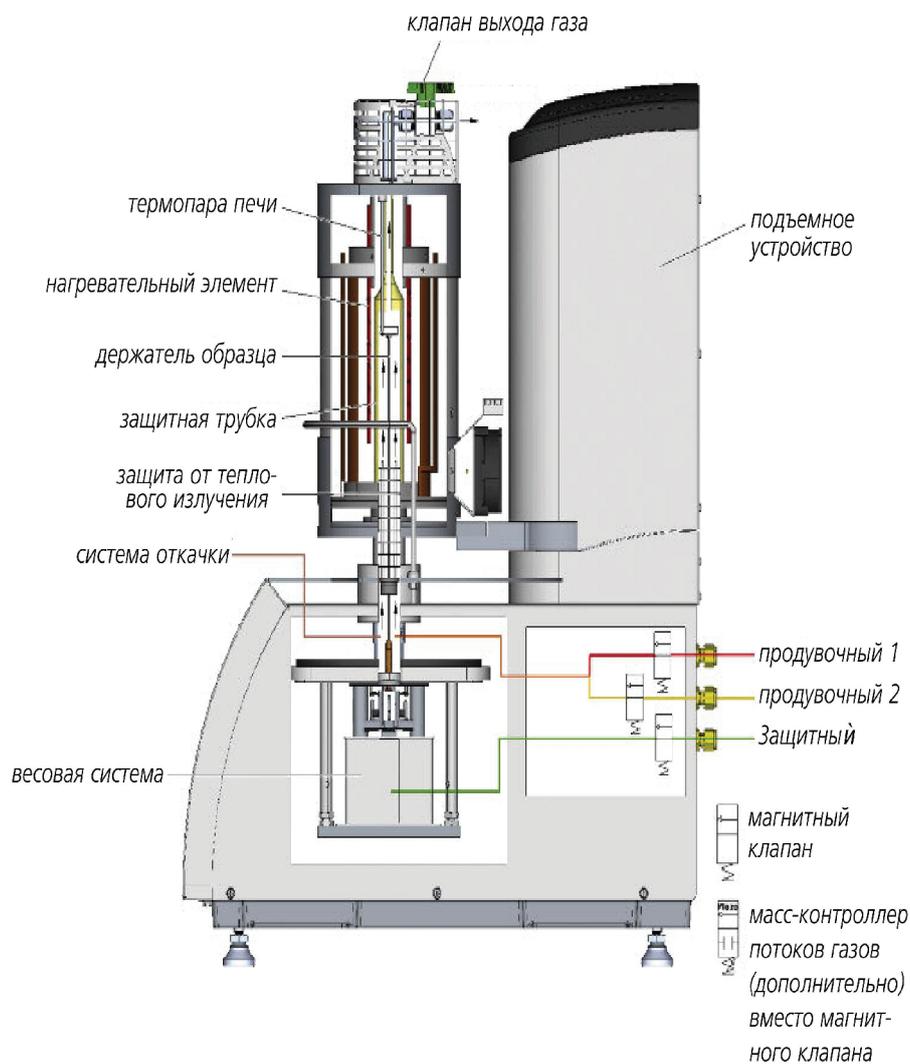


Рис. 1. Синхронный термоанализатор STA 449 F3 Jupiter

В качестве экспериментальных образцов было выбрано гранулированное биотопливо с ЗАО «Лесозавод 25», расположенного в городе Архангельске, Россия. Гранулированное топливо было произведено из еловой древесины и имело следующие теплотехнические характеристики: влажность  $W_i^r = 6,74\%$ ; зольность  $A^r = 0,37\%$ ;

выход летучих веществ  $V^{daf} = 84,59\%$ ; низшая теплота сгорания на рабочую массу  $Q_i^r = 17,384$  МДж/кг. Средняя масса образца для наполнения тигля, помещаемого в экспериментальную установку, была выбрана 5 мг. Предварительно биотопливо (пеллеты) были размолоты на шаровой барабанной мельнице (ШБМ) и был проведен гра-

нулометрический анализ, т.е. пробы были просеяны на ситовом анализаторе. Таким образом, были получены образцы фракций следующего гранулометрического состава: более 125 мкм, от 63 до 125 мкм, от 45 до 63 мкм и менее 45 мкм. Для каждой анализируемой фракции древесного материала был определен параметр исследования – это скорость нагрева образца. Каждая фракция исследуемого материала подвергалась термической обработке в диапазоне температур 20-1300 °С в среде аргона с расходом газа 20 см<sup>3</sup>/мин. При температурах выше 1300 °С процесс термоллиза можно считать практически законченным.

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 ТГ и ДСК кривые, строящиеся в автоматическом режиме, и обрабатываемые с помощью программного пакета Proteus, поставляемого совместно с установкой.

### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты термического анализа для образца, состоящего из частиц размером более 125 мкм при его нагреве со скоростью 10 °С/мин представлены на рис. 2.

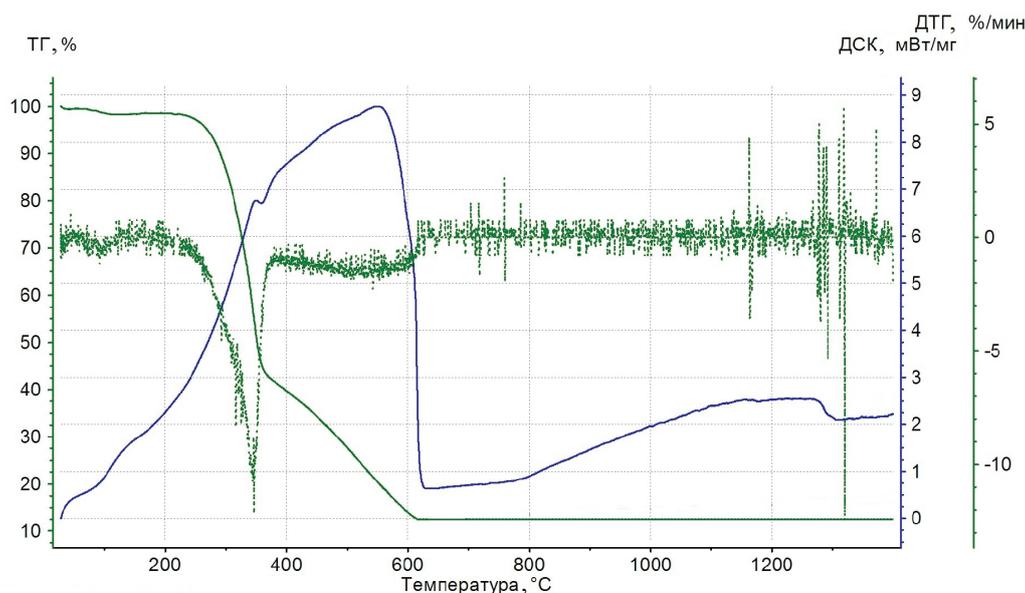


Рис. 2. Результаты ТГ, ДТГ и ДСК анализов размолотых древесных гранул с частицами размером более 125 мкм при скорости нагрева 10 °С/мин

На рис. 3, 4 представлены обобщенные данные. На одном графике размещены кривые термической обработки биотоплива (ТГ и ДСК) при разных скоростях нагрева: 5, 10 и 20 °С/мин.

Сводные данные по результатам проведенных экспериментов для образцов разного гранулометрического состава приведены в таблице.

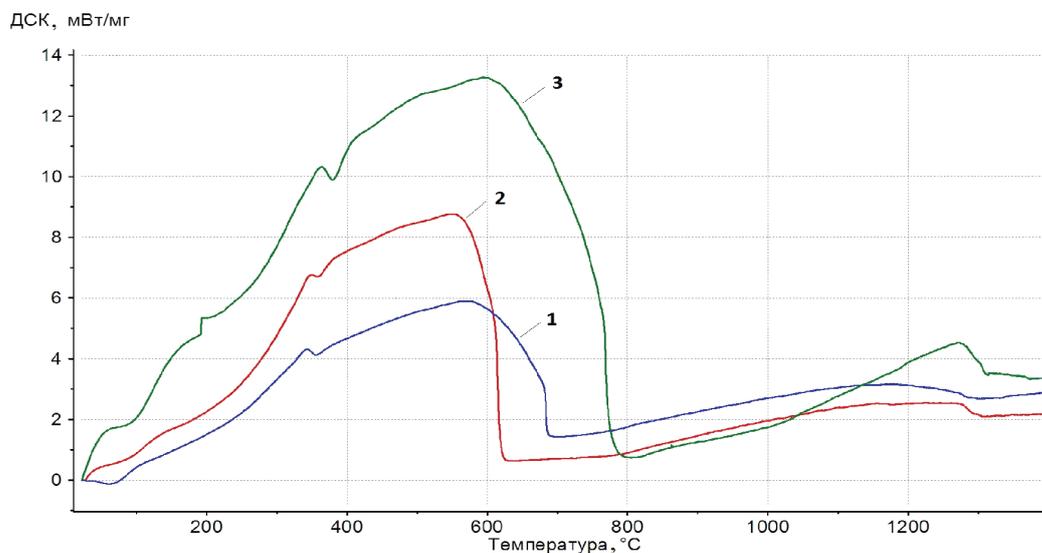


Рис. 3. Результаты ДСК анализов размолотых древесных гранул с размерами частиц более 125 мкм: 1 – при скорости 5 °C/мин; 2 – при скорости 10 °C/мин; 3 – при скорости 20 °C/мин

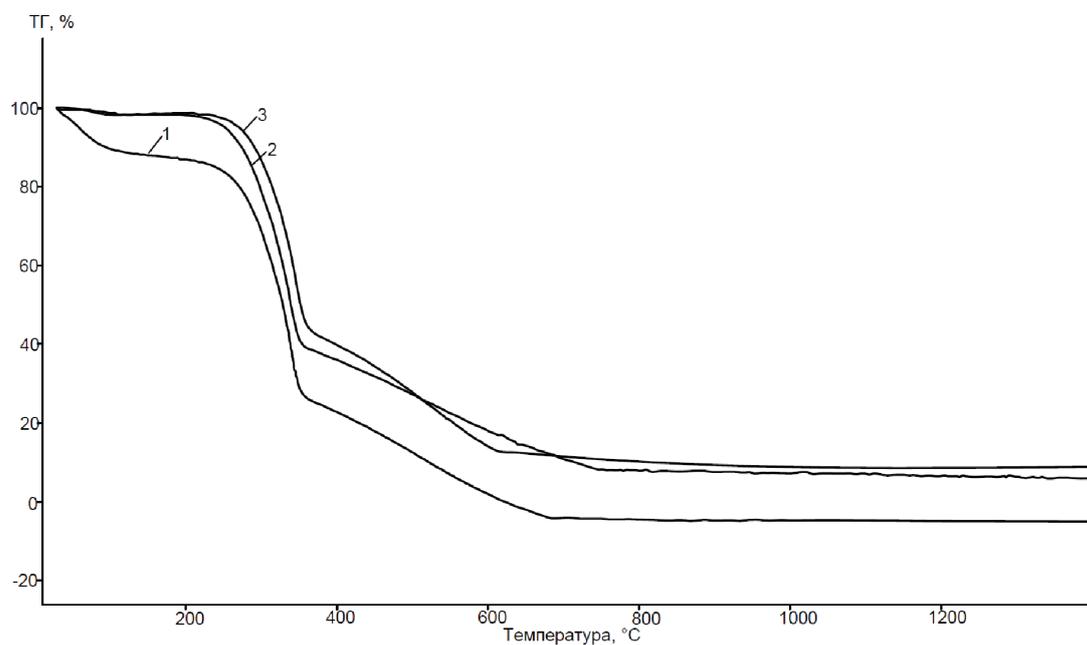


Рис. 4. Результаты ТГ анализов размолотых древесных гранул с размерами частиц более 125 мкм: 1 – при скорости 5 °C/мин; 2 – при скорости 10 °C/мин; 3 – при скорости 20 °C/мин

Основные результаты синхронного термического анализа

1 серия опытов с неоднородным гранулометрическим составом от 0 до 1000 мкм			
Скорость нагрева, °С/мин	Температурные диапазоны, °С		Тепловыделение, Дж/г
	Сушка	Выход летучих	
5	20...110	220...520 (334)*	18963
10	20...118	240...645 (348)	16222
20	20...125	260...825 (355)	15617
2 серия опытов с материалом, состоящим из частиц размером больше 125 мкм			
Скорость нагрева, °С/мин	Температурные диапазоны, °С		Тепловыделение, Дж/г
	Сушка	Выход летучих	
5	20...115	250...680 (338)	20897
10	20...125	265...620 (346)	18146
20	20...130	280...770 (362)	16717
3 серия опытов с материалом, состоящим из частиц размером от 63 до 125 мкм			
Скорость нагрева, °С/мин	Температурные диапазоны, °С		Тепловыделение, Дж/г
	Сушка	Выход летучих	
5	20...105	230...360 (348)	25917
10	20...115	250...380 (358)	22347
20	20...120	275...390 (356)	20535
4 серия опытов с материалом, состоящим из частиц размером от 45 до 63 мкм			
Скорость нагрева, °С/мин	Температурные диапазоны, °С		Тепловыделение, Дж/г
	Сушка	Выход летучих	
5	20...110	240...360 (346)	29226
10	20...115	250...380 (356)	26419
20	20...120	260...390 (368)	25,515
5 серия опытов с материалом, состоящим из частиц размером менее 45 мкм			
Скорость нагрева, °С/мин	Температурные диапазоны, °С		Тепловыделение, Дж/г
	Сушка	Выход летучих	
5	20...105	235...350 (331)	28175
10	20...110	245...380 (354)	25359
20	20...115	350...390 (365)	23705

\* В скобках указана температура, соответствующая максимальной скорости выхода летучих веществ.

Результаты термогравиметрических анализов показали, что снижение массы исследуемых образцов при температурах 20-120 °С вызвано испарением влаги при их подсушке. Затем снижение массы прекращается и возобновляется при температуре 225 °С. В интервале температур от 225 до 370 °С происходит резкое уменьшение массы образца, вызванное интенсивным выходом летучих веществ. Результаты ДТГ анализов показали, что выход летучих веществ достигает своей максимальной скорости при температурах 334-368 °С. При температуре ~ 370 °С кривая изменения массы имеет ярко выраженный изгиб, наличие которого свидетельствует о резком снижении скорости выхода летучих веществ. В зависимости от условий проведения эксперимента выход летучих веществ заканчивался при достижении температуры 610-770 °С.

Результаты ДСК анализов показали, что при температурах до ~ 120 °С в исследуемых образцах происходят эндотермические процессы, связанные с испарением влаги. При последующем подъеме температуры до 350 °С в образцах протекают экзотермические процессы. Затем наблюдается неярко выраженный эндотермический пик, имеющий точку экстремума при температуре ~ 360-380 °С. Далее скорость роста кривой ДСК несколько замедляется и экзотермический пик достигает своего максимума при температуре 550-580 °С. Затем ДСК кривая начинает убывать, это говорит о том, что интенсивность экзотермических процессов резко падает, и начинают происходить эндотермические процессы.

Изменение скорости нагрева образца является важным фактором, влияющим на результаты определения температур физи-

ко-химических превращений, протекающих в исследуемом образце. Изучению влияния скорости нагрева на ДСК кривые посвящено множество работ. В частности, в работах Л.Г. Берга и У. Уэндландта изучению этого фактора уделено особое внимание [4, 6]. И все исследователи сходятся на том, что с повышением скорости нагрева возрастают температура и амплитуда (высота) пика, соответствующего термическому эффекту. Кроме того, увеличение скорости нагрева повышает чувствительность дифференциальной записи [5]. Действительно, в ряде случаев при больших скоростях нагрева удавалось наблюдать эффекты, которые при медленном нагреве не обнаруживались. В то же время уменьшение скорости нагрева позволяет разделить накладывающиеся друг на друга термические эффекты, происходящие в близком температурном диапазоне. Все эти исследования нашли подтверждение в наших экспериментах, результаты которых представлены в таблице.

Из рисунка 3 видно, что увеличение скорости нагрева приводит к росту высоты пика, соответствующего термическому эффекту. Кроме того, увеличение скорости нагрева приводит к смещению эндо и экзотермических пиков в зону более высоких температур, при этом также увеличивается температура максимальной скорости выхода летучих (табл. 1). Эндотермический пик, соответствующий температуре 380 °С для кривой ДСК при скорости нагрева 20 °С/мин имеет более ярко выраженный вид, чем для кривых при меньших скоростях нагрева. Это говорит о том, что кривая ДСК, записываемая при более высоких скоростях нагрева имеет большую чувствительность.

Рассматривая кривые ТГ анализов можно заметить, что качественно они имеют сходный вид, но увеличение скорости нагрева приводит к некоторому смещению кривых относительно оси ординат. При понижении скорости нагрева процесс сушки заканчивается несколько раньше, чем при более высоких скоростях нагрева, а величина изменения массы увеличивается. Величина изменения массы, связанная с выходом летучих веществ, имеет примерно одинаковое значение. Также можно заметить, что при меньших скоростях нагрева процесс выхода летучих начинается несколько раньше, чем при высоких (таблица).

### Выводы

Основной вопрос, возникающий при проведении комплексного термического

анализа – выбор оптимальных размеров частиц исследуемого образца, и, как следствие этого, массы навески и ее гранулометрического состава, а также условий проведения эксперимента (температура нагрева материала, атмосфера печи, расход газа и т.д.). По результатам экспериментальных исследований определены: оптимальный гранулометрический состав древесных материалов (образцы с частицами от 63 до 125 мкм) и скорость их нагрева (10 °С/мин).

Проведенные эксперименты позволили определить температурные диапазоны и скорость изменения массы древесного топлива при протекании процессов сушки и выхода летучих веществ, а также тепловые эффекты, сопровождающие данные процессы (табл. 1). Экспериментальные исследования проведены для разной скорости нагрева и гранулометрического состава, испытываемых образцов. Полученные результаты можно использовать при выборе оптимальной технологической схемы энергетического использования древесного топлива.

Учитывая, что процессы прогрева, сушки и выхода летучих веществ оказывают определяющее влияние на условия воспламенения и последующего горения древесного топлива они требуют детального изучения с помощью методов термического анализа, реализованных в синхронном термоанализаторе.

### Список литературы

1. Любов В.К., Любова С.В. Повышение эффективности энергетического использования биотоплив. – Архангельск, 2010. – 496 с.
2. Бойко Е.А. Совершенствование схемы комплексного термического анализа твердых органических топлив / Е.А. Бойко, Д.Г. Дидичин, М.Ю. Угай и др. // Проблемы экологии и развития городов: Сб. науч. тр. Т.1. Красноярск, 2001. С. 314-319
3. Шишмарев П.В. Совершенствование и внедрение комплексного термического анализа в практику энергетического использования Канско-Ачинских углей: Дис... канд. техн. наук. – Красноярск: ФГБОУ ВПО «Красноярский государственный технический университет», 2006 – 208 с.
4. Берг Л.Г. Введение в термографию. – М.: Наука, 1969. – 395 с.
5. Берг Л.Г. Практическое руководство по термографии. – Казань: Изд-во Казанского университета, 1967. – 224 с.
6. Уэндландт У. Термические методы анализа. – М.: Мир, 1978. – 526 с.
7. Uribe, M.I. Kinetic analysis for liquid-phase reactions from programmed temperature data. Sequential discrimination of potential kinetic models / M.I. Uribe, A.R. Salvador, A.I. Guillas // Thermochim. Acta. 1995 V.94. № 2. P.333-343.