

УДК 536.468

**ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ НА ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ПИРОЛИЗА И ОКИСЛЕНИЯ**

С.С. Кропотова

Научный руководитель: д.ф.-м.н. П.А. Стрижак

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [SkralinovaS@yandex.ru](mailto:SkralinovaS@yandex.ru)

**INFLUENCE OF PROPERTIES OF FOREST COMBUSTIBLE MATERIALS ON THERMOKINETIC  
CHARACTERISTICS OF PYROLYSIS AND OXIDATION**

S.S. Kropotova

Scientific Supervisor: Phd. P.A. Strizhak

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [SkralinovaS@yandex.ru](mailto:SkralinovaS@yandex.ru)

***Abstract.** Experimental studies of thermokinetic characteristics of pyrolysis and oxidation of forest combustible materials (pine needles), taking into account the influence of particle size (60 – 140  $\mu\text{m}$ ) and density (206 – 955  $\text{kg/m}^3$ ) of forest fuel were made. According to the results of measurements, the activation energy of needles pyrolysis is within the range of 22,8 – 113,8  $\text{kJ/mol}$ , and that of oxidation corresponds to 134,7 – 211  $\text{kJ/mol}$ . The kinetic parameters obtained for needles in this work can be used to simulate the thermal decomposition of needles and its oxidation during the forest fires.*

**Введение.** В связи с тем, что пиролиз является неотъемлемой составляющей процесса горения лесных материалов, целесообразным является его изучение с целью разработки математических моделей, необходимых для развития технологий подавления пламенного горения и тления [1, 2] при эффективной борьбе с пожарами. Цель настоящей работы – экспериментальное определение диапазонов значений основных термокинетических характеристик пиролиза и окисления типичных лесных горючих материалов и анализ их зависимостей от плотности навески и размеров частиц. В первом приближении целесообразно выполнить соответствующий анализ на примере хвои, так как этот вид ЛГМ принято считать наиболее пожароопасным.

**Материалы и методы исследований.** Для экспериментального определения термокинетических параметров хвои использовался синхронный термоанализатор «NETZSCH STA 449F3» (аналогично с опытами [3]). Подготовка образцов заключалась в предварительном измельчении компонентов на быстроходной роторной мельнице «Pulverisette 14». Размеры частиц составляли 60, 100, 150 мкм, насыпная плотность 206  $\text{кг/м}^3$ . Для исследования влияния плотности порошок ЛГМ спрессовывался под разным давлением (плотность составила 736  $\text{кг/м}^3$  и 955  $\text{кг/м}^3$ ). Абсолютная погрешность измерения плотности не превысила 1 %. Термический анализ проводился в следующих условиях: температура нагрева 27 – 997 °С со скоростью 10 °С/мин в среде аргона и кислорода с расходом газа 100 мл/мин.

Кинетические параметры пиролиза (энергия активации и предэкспоненциальный множитель) вычислялись по методике [4].

**Результаты.** На рис. 1 представлены полученные термогравиметрические кривые в инертной среде для образцов хвои при варьировании размера частиц и плотности ЛГМ. Видно, что размер частиц влияет на скорость реакции. Заметны различия в значениях изменения массы и скорости потери массы. Пик скорости потери массы соответствует температуре  $T = 351$  °С. На рис. 1 также видно, что скорость потери массы увеличивается с ростом размера частиц (такие же результаты получены в [3-5]). При этом ширина и положение температурных интервалов практически не отличается. На рис. 1б можно видеть смещение пика скорости потери массы в сторону более высоких температур при повышении плотности образца. Из рисунка также видно, что для плотностей  $736 \text{ кг/м}^3$  и  $955 \text{ кг/м}^3$  термогравиметрические кривые накладываются друг на друга и пик скорости потери массы совпадает, в то время как для плотности  $206 \text{ кг/м}^3$  установлено достаточно резкое увеличение максимума скорости потери массы.

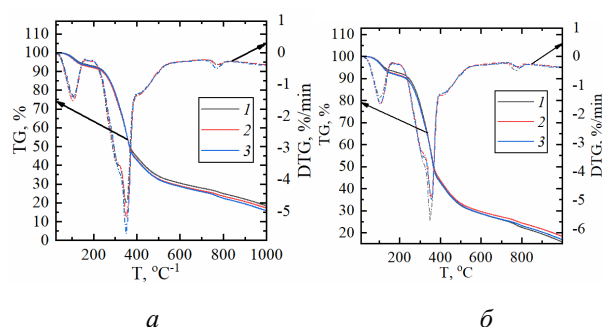


Рис. 1. Термогравиметрические кривые потери массы (TG) и скорости потери массы (DTG) в инертной среде при варьировании размера частиц (а) (1 – 60 мкм; 2 – 100 мкм; 3 – 140 мкм) и плотности таблетированного образца (б) (1 –  $206 \text{ кг/м}^3$ ; 2 –  $736 \text{ кг/м}^3$ ; 3 –  $955 \text{ кг/м}^3$ )

Из таблицы 1 и 2 видно, что чем больше размер частиц, тем выше значения энергии активации  $E$  и предэкспоненциального множителя  $k$ . Это, вероятно, может быть связано с тем, что при увеличении размера частиц интенсивность процесса их взаимодействия с окислителем (кислородом) снижается, что препятствует раннему началу разложения. Также видно (таблица 1,2), что при увеличении плотности образца от  $206 \text{ кг/м}^3$  до  $955 \text{ кг/м}^3$  энергия активации достаточно значительно уменьшается на первом и третьем участках. Установлено, что для первого участка энергия активации увеличена для частиц наименьшего размера. Можно предположить, что это связано с агломерацией частиц такого размера в данном диапазоне температур, что, в свою очередь, увеличивает энергию активации.

Таблица 1

Термокинетические характеристики пиролиза хвои в инертной среде

Варьирование размера частиц ЛГМ						
Размер частиц, мкм (плотность образца $206 \text{ кг/м}^3$ )	$E_1$ , кДж/моль	$k_1$ , 1/с	$E_2$ , кДж/моль	$k_2$ , 1/с	$E_3$ , кДж/моль	$k_3$ , 1/с
	Участок 1 (450 – 540 °С)		Участок 2 (540 – 650 °С)		Участок 3 (650 – 900 °С)	
60	113,8	$8,12 \cdot 10^{10}$	82,93	$4,12 \cdot 10^6$	38,5	$1,154 \cdot 10^2$
100	107,1	$1,15 \cdot 10^{10}$	85,06	$5,21 \cdot 10^6$	44,22	$2,28 \cdot 10^2$
140	108,3	$1,125 \cdot 10^{10}$	103	$1,73 \cdot 10^8$	50,08	$6,25 \cdot 10^2$
Варьирование плотности таблетированного образца ЛГМ						
Плотность образца, $\text{кг/м}^3$ (размер частиц)	$E_1$ , кДж/моль	$k_1$ , 1/с	$E_2$ , кДж/моль	$k_2$ , 1/с	$E_3$ , кДж/моль	$k_3$ , 1/с

около 140 мкм)						
206	108,3	$1,125 \cdot 10^{10}$	103	$1,73 \cdot 10^8$	50,08	$6,25 \cdot 10^2$
736	88,66	$1,18 \cdot 10^8$	106,7	$3,25 \cdot 10^8$	22,85	5,26
955	81,62	$9,5 \cdot 10^7$	98,49	$6,75 \cdot 10^7$	29,9	16,05

Таблица 2

Термокинетические характеристики процесса окисления хвои (450 – 900 °С)

Варьирование размера частиц ЛГМ		
Размер частиц, мкм (плотность образца 206 кг/м <sup>3</sup> )	$E$ , кДж/моль	$k$ , 1/с
60	197,2	$1,02 \cdot 10^{13}$
100	134,7	$6,26 \cdot 10^8$
140	183,8	$2,11 \cdot 10^8$
Варьирование плотности таблетированного образца ЛГМ		
Плотность образца, кг/м <sup>3</sup> (размер частиц около 140 мкм)	$E$ , кДж/моль	$k$ , 1/с
206	183,8	$2,11 \cdot 10^8$
736	211	$2,14 \cdot 10^{14}$
955	185,2	$5,6 \cdot 10^{12}$

**Заключение.** Кинетические параметры, полученные для хвои в данной работе, могут быть использованы для моделирования термического разложения хвои и ее окисления при распространении лесных пожаров, а также при определении эффективных условий локализации и подавления этих процессов.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ (проект 18-19-00056).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cancellieri D., Leroy-Cancellieri V., Silvani X., Morandini F. New experimental diagnostics in combustion of forest fuels: Microscale appreciation for a macroscale approach // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2018. – V. 18., No. 7. – P. 1957–1968.
2. Bartoli P., Simeoni A., Biteau H., Torero J. L., Santoni P. A. Determination of the main parameters influencing forest fuel combustion dynamics // Fire Safety Journal. – 2011. – V. 46., No. 1-2. – P. 27–33.
3. Жданова А.О., Кралинова С.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Теплофизические и термокинетические характеристики лесных горючих материалов // Инженерно-физический журнал. – 2019. – Т. 92., №5. – С. 2395–2403.
4. Woo Park J., Cheon Oh S., Pyeong Lee H., Taik Kim H., Ok Yoo, K. A kinetic analysis of thermal degradation of polymers using a dynamic method // Polymer Degradation and Stability. – 2000. – V. 67., No. 3. – P. 535–540.
5. Chouchene A., Jeguirim M., Khiari B., Zagrouba F., and Trouvé G. Thermal Degradation of Olive Solid Waste: Influence of Particle Size and Oxygen Concentration // Resources Conservation and Recycling. – 2010. – V. 54., No. 5. – P. 271-277.