

УДК 662.6/.9:630\*892.1

## СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРЕНИЯ ДРЕВЕСНЫХ ОПИЛОК С ХИМИЧЕСКИМИ ДОБАВКАМИ

Кудрявцева Л.А., Мазуркин П.М.

*ГОУ ВПО Марийский государственный технический университет,  
Йошкар-Ола, Россия*

**В статье приведены результаты исследования динамики температуры, при горении древесных опилок с химическими добавками на приборе ОТМ, начиная от 200 °С до максимального значения, а затем обратно до 200 °С. С помощью программной среды Curve Expert 1.3 получены модели динамики температуры горения опилок во времени с использованием устойчивого закона.**

**Ключевые слова:** горение, древесные опилки, температура горения, тление

### Введение

Эффективное и полное сгорание является необходимым условием использования древесины в качестве экологически приемлемого вида топлива. Процесс сгорания не должен вызывать образование нежелательных в экологическом отношении соединений.

Целью статьи является определение динамики температуры, при горении древесных опилок, обработанных растворами кислот и жиросодержащими сточными водами, на приборе ОТМ по ГОСТ 12.1.044-89 [4], начиная от 200 °С до максимального значения, а затем обратно до 200 °С.

### Теоретический анализ

Древесина обладает высокой сорбирующей способностью. Опилки, обработанные растворами кислот, поглощают, удерживают эти растворы, увеличиваясь в объеме и выделяя лигнин. Происходящие изменения в химических связях, оказывают влияние на температуру горения.

Общеизвестно [1], что химические добавки уменьшают энергию активации реакций пиролиза древесины и ее компонентов и снижают температуру начала их разложения. Так при пропитке древесины березы одновременно  $H_2SO_4$  (2 %-ной) и  $H_2O_2$  (0,1 %-ной) температура начала разложения снижается с 250 до 120 °С, скорость термодеструкции увеличивается более чем в 10 раз, энергия активации умень-

шается примерно со 160 до 40 кДж/моль, выход древесного угля возрастает на 35 %.

### Методика эксперимента

Для опытов были подготовлены пробы березовых и сосновых опилок с относительной влажностью 12 %, взятые в лесопильном цехе.

Предварительно опилки выдерживали в течение 24 часов в растворах кислот  $HCl$  (3 %-ной) и  $H_2SO_4$  (2 %-ной), а также опилки применяли в качестве фильтра для очистки 100 мл жиросодержащих сточных вод, затем пробы высушивали в сушильном шкафу в течение 48 часов.

Подготовленный материал помещали в мешочки из стеклоткани массой 4,1 г, сшитые металлическими скрепками, масса испытываемых образцов по 50 г. Взвешивание проводили на лабораторных весах с погрешностью измерения  $\pm 0,1$  г.

Перед испытанием внутреннюю поверхность реакционной камеры прибора ОТМ покрыли двумя слоями алюминиевой фольги, толщиной не более 0,2 мм, которую по мере прогорания или загрязнения продуктами горения заменяли на новую.

Заданная температура ( $200 \pm 5$  °С) газообразных продуктов горения в реакционной камере поддерживается газовой горелкой в течение трех минут.

Образец закрепляли в держателе вертикально металлической проволокой, вводили за 3-5 с в реакционную камеру, и испытывали до достижения максимальной

температуры отходящих газообразных продуктов, регистрируя время ее достижения. Предварительными испытаниями были определены примерные пределы максимума температуры. Во время основных испытаний достигаемый максимум определяли выдержкой в течение 15-30 с. Поэтому продолжительность испытания на этапе роста температуры от 200 °С определялась временем достижения интуитивного (на основе прошлого опыта предварительных испытаний) ожидаемого максимума, а затем горелку выключали. Для регистрации

температуры использовали прибор КСП-4 с диапазоном от 0 до 600 °С, а для отсчета времени – секундомер. Отсчеты проводили через каждые 50 °С при росте температуры от 200 °С до максимального значения, далее при снижении температуры до 200 °С. Образец выдерживали в камере до полного остывания 20 °С, извлекали и взвешивали, определяя зольный остаток.

#### Результаты и их обсуждение

Результаты измерений температуры горения березовых опилок представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений температуры горения березовых опилок во времени

Березовые опилки		Березовые опилки, выдержанные в растворе HCl (3 %-ной)		Березовые опилки, выдержанные в растворе H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (2 %-ной)		Березовые опилки, обработанные жиросодержащей сточной водой	
Время $t$ , с	Температура $T$ , °С	Время $t$ , с	Температура $T$ , °С	Время $t$ , с	Температура $T$ , °С	Время $t$ , с	Температура $T$ , °С
14	200	100	200	233	200	24	200
20	250	270	225	420	225	51	250
30	300	330	250	540	240	110	300
36	350	900	275	725	240	155	350
45	400	1005	250	733	200	200	360
79	450	1023	200	744	150	280	350
140	450	-	-	890	100	288	300
160	400	-	-	-	-	300	250
175	500	-	-	-	-	315	200
195	450	-	-	-	-	360	150
258	400	-	-	-	-	-	-
280	350	-	-	-	-	-	-
295	300	-	-	-	-	-	-
313	250	-	-	-	-	-	-
340	200	-	-	-	-	-	-

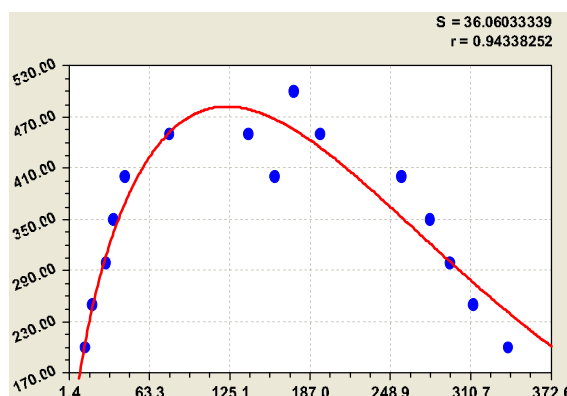


Рис. 1. Изменение температуры горения березовых опилок:

$S$  – сумма квадратов отклонений;  
 $r$  – коэффициент корреляции

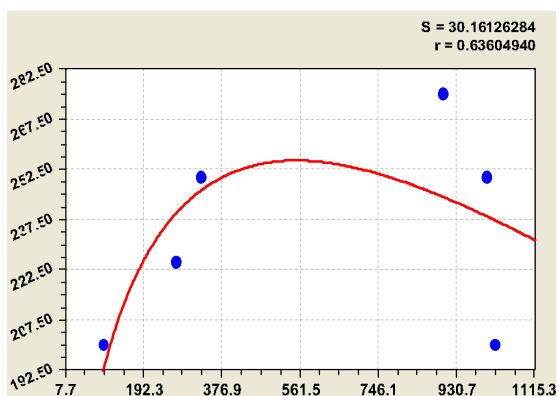
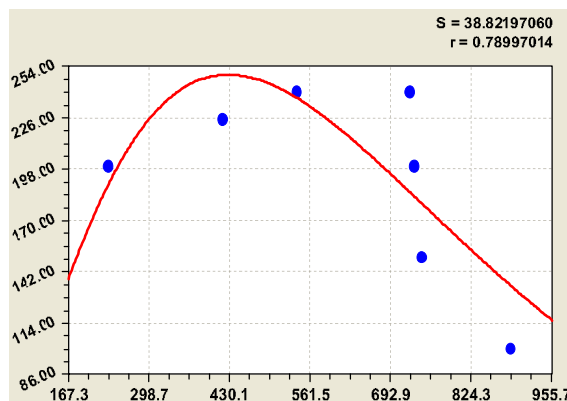
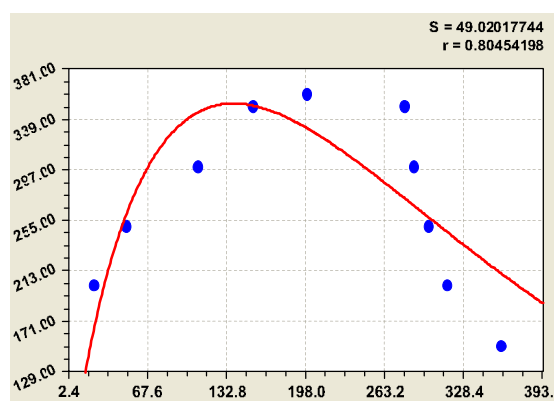


Рис. 2. Изменение температуры горения березовых опилок выдержанных в растворе HCl (3 %-ной)



**Рис. 3.** Изменение температуры горения березовых опилок выдержанных в растворе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (2 %-ной)



**Рис. 4.** Изменение температуры горения березовых опилок обработанных жиросодержащей сточной водой

Данные табл. 1 подвергли статистической обработке в программной среде Curve Expert 1.3 [3] для получения устойчивых закономерностей. Сжигание образцов с березовыми опилками представлено на рис. 1, 2, 3, 4.

Выход летучих веществ из древесины начинается уже при температуре 105 °С, поэтому при 200 °С они быстро воспламеняются, ускоряя процесс роста температуры от газовой горелки. Этот этап растянут во времени из-за разнообразия летучих веществ, имеющих разные температуры воспламенения в пределах 105-230 °С. За время горения при температуре 500 °С, из-за снижения летучей горючей массы в образце древесины, наступает максимум температуры горения (рис. 1).

Максимальная температура отходящих газообразных продуктов горения березовых опилок, обработанных сточной водой 360 °С, а опилок обработанных растворами кислот не превышает 250 °С.

Вслед за прекращением пламенного горения начинается тление, которое будет развиваться внутри оставшегося материала. Для зарождения тления основным яв-

ляется требование о наличие источника тепла, который приведет к образованию углистого остатка и начале его окисления. Тление будет продолжаться до тех пор, пока тепло будет сохраняться в области реакционной поверхности, поэтому образец в реакционной камере выдерживали до полного остывания 20 °С.

Для сжигания березовых опилок обработанных растворами кислот потребовалось в 2,5–3 раза больше времени, чем для сжигания чистых опилок. Полученные результаты свидетельствуют о неполном сгорании образцов и как следствие повышенной зольности. При сжигании образца с березовыми опилками масса образовавшейся золы составляет 0,2 г или 0,44 % первоначальной массы; опилок обработанных сточной водой 3,5 г или 8,01 %; опилок обработанных раствором HCl 2,7 г или 4,06 %; опилок обработанных раствором H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 3,05 г или 4,24 %.

Идентификацией устойчивых законов выявили модели динамики температуры горения березовых опилок во времени с использованием устойчивого закона вида

$$T = 49,1588t^{0,55728} \exp(-0,00046115t^{1,40507}), \tag{1}$$

где  $T$  – температура отходящих газообразных продуктов горения материала, °С,  
 $t$  – время горения, с.

березовых опилок, выдержанных в растворе HCl (3 %-ной)

$$T = 49,73025 t^{0,30778} \exp(-0,00055801 t), \tag{2}$$

березовых опилок, выдержанных в растворе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (2 %-ной)

$$T = 0,029591 t^{1,787237} \exp(-0,0041788 t), \tag{3}$$

березовых опилок, обработанных жиросодержащей сточной водой

$$T = 15,21516 t^{0,79983} \exp(-0,0057852 t) \quad (4)$$

Результаты измерений температуры горения сосновых опилок представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений температуры горения сосновых опилок во времени

Сосновые опилки		Сосновые опилки, выдержанные в растворе HCl (3 %-ной)		Сосновые опилки, выдержанные в растворе H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (2 %-ной)		Сосновые опилки, обработанные жиросодержащей сточной водой	
Время $t, c$	Температура $T, ^\circ C$	Время $t, c$	Температура $T, ^\circ C$	Время $t, c$	Температура $T, ^\circ C$	Время $t, c$	Температура $T, ^\circ C$
30	200	20	200	75	200	43	200
53	250	38	225	191	225	65	250
65	300	630	250	254	240	135	300
75	350	647	200	325	250	315	350
90	400	654	150	493	265	360	300
130	450	-	-	630	275	367	250
185	500	-	-	643	250	387	200
215	450	-	-	650	200	520	150
265	400	-	-	666	150	820	100
328	350	-	-	830	100	-	-
332	300	-	-	-	-	-	-
342	250	-	-	-	-	-	-
365	200	-	-	-	-	-	-

Сжигание образцов с сосновыми опилками представлено на рис. 5, 6, 7.

Максимальная температура отходящих газообразных продуктов горения сосновых опилок 500 °С, сосновых опилок обработанных сточной водой 350 °С, а

опилок обработанных растворами кислот не превышает 250-275 °С.

Для сжигания сосновых опилок обработанных растворами кислот потребовалось в 1,8 раза больше времени, чем для сжигания чистых опилок.

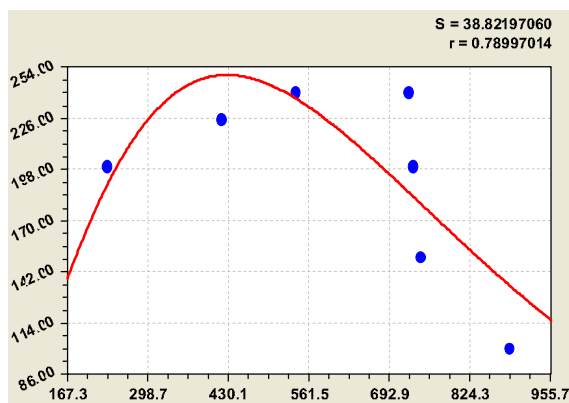


Рис. 5. Изменение температуры горения сосновых опилок

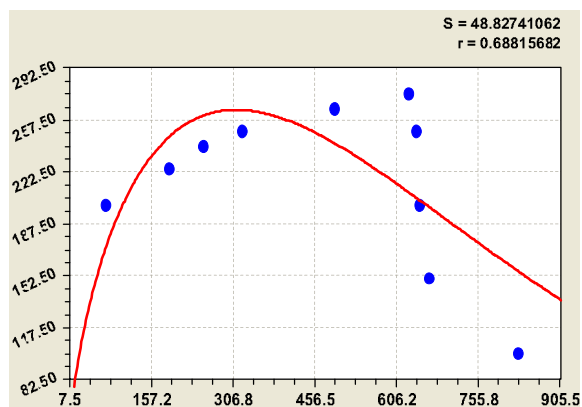


Рис. 6. Изменение температуры горения сосновых опилок выдержанных в растворе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (2 %-ной)

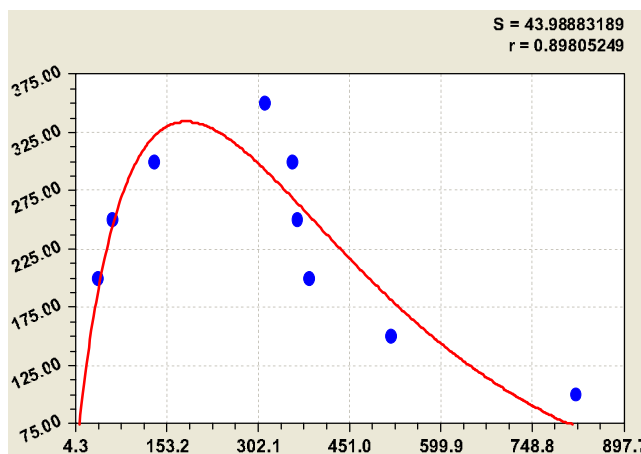


Рис. 7. Изменение температуры горения сосновых опилок, обработанных жиросодержащей сточной водой

При сжигании образца с сосновыми опилками масса образовавшейся золы составляет 0,45 г или 0,98 % первоначальной массы образца; опилок обработанных сточной водой 3,4 г или 6,54 %; опилок обработанных раствором HCl 2,5 г или

2,95 %; опилок обработанных раствором H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2,4 г или 2,74 %.

Составили модели динамики температуры горения сосновых опилок во времени с использованием устойчивого закона

$$T = 6,04822 t^{0,98736} \exp(-0,00034273 t^{1,48099}), \tag{5}$$

сосновых опилок, выдержанных в растворе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (2 %-ной)

$$T = 17,23709 t^{0,55088} \exp(-0,00028634 t^{1,27464}), \tag{6}$$

сосновых опилок, обработанных жиросодержащей сточной водой

$$T = 12,35049 t^{0,78269} \exp(-0,0042557 t^{1,00001}). \tag{7}$$

Результаты измерений температуры горения смеси сосновых и березовых опилок в соотношении 1:1 представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерений температуры горения смеси сосновых и березовых опилок в соотношении 1:1 во времени

Сосна/береза, выдержанные в растворе HCl (3 %-ной)		Сосна/береза, выдержанные в растворе H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (2 %-ной)		Сосна/береза, обработанные жиросодержащей сточной водой	
Время t, с	Температура T, °C	Время t, с	Температура T, °C	Время t, с	Температура T, °C
35	200	247	200	33	200
160	225	517	225	83	250
343	250	740	225	168	300
473	265	743	200	297	350
648	265	750	150	315	375
652	200	776	100	356	300
-	-	-	-	362	250
-	-	-	-	371	200
-	-	-	-	406	150
-	-	-	-	760	100

Сжигание образцов смеси сосновых и березовых опилок представлено на рис. 8, 9, 10.

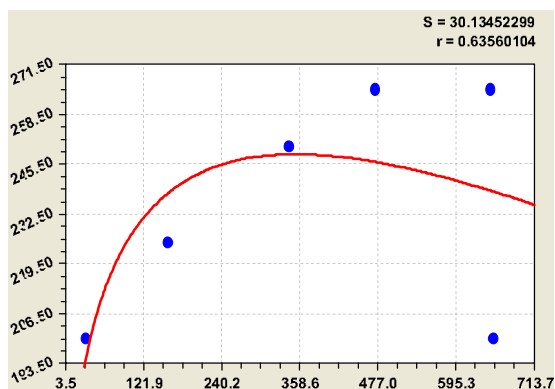


Рис. 8. Изменение температуры горения смеси сосновых и березовых опилок выдержанной в растворе HCl (3 %-ной)

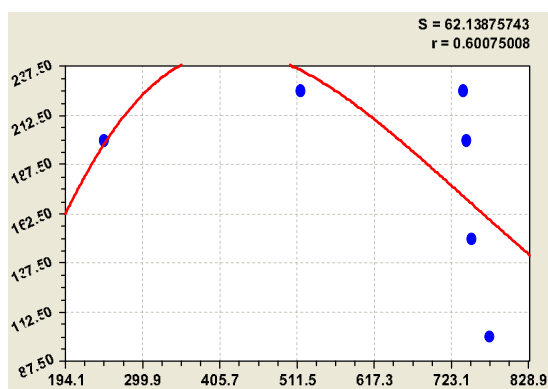


Рис. 9. Изменение температуры горения смеси сосновых и березовых опилок выдержанной в растворе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (2 %-ной)

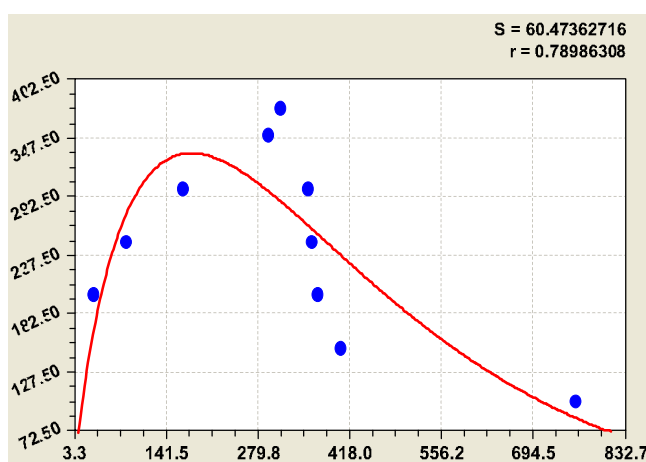


Рис. 10. Изменение температуры горения смеси сосновых и березовых опилок, обработанной жиросодержащей сточной водой

Максимальная температура отходящих газообразных продуктов горения смеси опилок, обработанных сточной водой 375 °С, а смеси опилок обработанных растворами кислот не превышает 225-265 °С.

При сжигании смеси опилок, обработанных сточной водой, масса образовавшейся золы составляет 3,7 г или 7,61 % первоначальной массы образца; смеси опи-

лок, обработанных раствором HCl 2,55 г или 3,38 %; опилок обработанных раствором H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2,4 г или 2,75 %.

Модель динамики температуры горения смеси сосновых и березовых опилок, выдержанной в растворе HCl (3 %-ной), во времени с использованием устойчивого закона имеет вид

$$T = 108,74295 t^{0,1697} \exp(-0,00048283 t), \quad (8)$$

смеси опилок, выдержанной в растворе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (2 %-ной)

$$T = 0,096543 t^{1,50355} \exp(-0,00087788 t^{1,20121}), \quad (9)$$

смеси опилок, обработанной жиросодержащей сточной водой

$$T = 13,56683 t^{0,76478} \exp(-0,0042765 t). \quad (10)$$

Процесс горения зависит от различных характеристик топлива, в основном, от состава топлива, влажности, содержа-

ния летучих компонентов, угля, плотности, пористости, размеров частиц и площади активной поверхности.

Древесные опилки различных пород неодинаково поглощают и удерживают растворы кислот и жиросодержащие сточные воды. Так сосновые опилки, обладают большей впитывающей способностью в сравнении с березовыми [2]. Следовательно, обработанные опилки отличаются по плотности и составу, что оказывает непосредственное влияние на процесс горения.

#### **Заключение**

Важнейшим параметром горения древесных опилок, влияющим на полноту сгорания топлива и объем выбросов, является температура горения. Тепловые характеристики топлива зависят от типов химических структур и связей, что определяет значительные различия в выходе летучих в зависимости от температуры.

В ходе исследования выявлено, что химические добавки HCl и H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> уменьшают максимальную температуру горения опилок в 1,8–2 раза, а время горения увеличивается в 1,7–2 раза.

Обработка опилок жиросодержащей сточной водой привела к уменьшению максимальной температуры в 1,4 раза,

время горения не изменилось. Таким образом, наиболее эффективный процесс горения характерен для опилок без химических добавок.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Гордон, Л.В. Технология и оборудование лесохимических производств. Учебник для техникумов 5-е издание, переработанное / Л.В. Гордон, С.О. Скворцов, В.И. Лисов. – М.: Лесная промышленность, 1988. – 360 с.
2. Кудрявцева, Л.А. Использование отходов предприятий лесного комплекса / Л.А. Кудрявцева, С.Я. Алибеков // Наука в условиях современности: сборник статей студентов, аспирантов, докторантов и ППС по итогам научно-технической конференции МарГТУ в 2007 г. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2007. – С. 121-124.
3. Мазуркин, П.М. Математическое моделирование. Идентификация однофакторных статистических закономерностей: Учебное пособие / П.М. Мазуркин, А.С. Филонов. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. – 292 с.
4. ГОСТ 12.1.044-89. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 52 с.

### **COMPARISON EFFICIENCY BURNING THE WOOD SAWDUST WITH CHEMICAL ADDITIVE**

Kudryavtseva L.A., Mazurkin P.M.

*Mari State Technical University, Yoshkar-Ola, Russia*

The research results of wood sawdust with chemical additive burning change the temperature on device OTM starting from 200 °C up to the maximal value but then reduction before 200 °C are presented in article. The wood sawdust burning temperatures dynamic models using the stable law are received with help Curve Expert 1.3 program.

Keywords: combustion, wood sawdust, temperature of the combustion, smouldering