

УДК 614.84

bezzaponnaya@mail.ru

**ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДРЕВЕСИНУ В УСЛОВИЯХ
ПОЖАРА МЕТОДАМИ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА****EVALUATION OF EXPOSURE TEMPERATURE ON WOOD UNDER FIRE
CONDITIONS BY THERMAL ANALYSIS METHODS**

*Беззапонная О. В., кандидат технических наук, доцент,
Уральский институт Государственной
противопожарной службы МЧС России, Екатеринбург*

*Bezzaponnaya O. V.,
The Ural Institute of State Firefighting Service of Ministry
of Russian Federation for Civil Defense, Yekaterinburg*

В статье описан методический подход для оценки термического воздействия на деревянные строительные конструкции. Установлено, что в качестве критериев для оценки температуры воздействия на древесину методами термического анализа целесообразно использовать термоаналитические характеристики: количество пиков на кривой дифференциальной термогравиметрии, потеря массы при температуре 400 °С (Δm_{400} , %), зольный остаток при температуре 700 °С ($ZO^{700\text{ }^\circ\text{C}}$), температура при потере массы 40 % ($T_{40\%}$). Приведены результаты применения метода термического анализа для диагностики температуры воздействия на древесину сосны и очага пожара.

Ключевые слова: температура воздействия, очаг пожара, древесина, термические методы анализа, термоаналитические характеристики.

The article describes a methodological approach for assessing thermal effects on wooden building structures. It was found that it is advisable to use thermoanalytical characteristics as criteria for assessing the temperature of impact on wood using thermal analysis methods: the number of peaks on the differential thermogravimetry curve, weight loss at 400 °С (Δm_{400} , %), ash residue at 700 °С ($ZO^{700\text{ }^\circ\text{C}}$), temperature at a weight loss of 40% ($T_{40\%}$). The results of the application of the method of thermal analysis to diagnose the temperature of the impact on pine wood and the fire center are presented.

Keywords: exposure temperature, fire source, wood, thermal analysis methods, thermoanalytical characteristics.

Введение

Древесина является одним из самых пожароопасных строительных материалов. В сельской местности, где преобладают деревянные постройки, в большом количестве случаев не удаётся установить причину пожара, о чём свидетельствует статистика пожаров за последние 5 лет [1]. Анализ статистических данных указывает на слабо разработанную методическую базу процедуры исследования пожаров. Для большинства происходящих пожаров результатов

визуального осмотра вполне достаточно для формирования выводов об очаге, но к таким пожарам относятся небольшие пожары, на которых горение не смогло или не успело развиться на большие площади вследствие архитектурных особенностей помещений или своевременного и эффективного тушения [2]. Но крупные пожары характеризуются тем, что горение распространяется на большие площади, практически полностью выгорает пожарная нагрузка и, соответственно, визуальный осмотр ма-

лоэффективен [3]. Поэтому при определении температуры воздействия и очага пожара при описанных выше условиях целесообразно применять инструментальные методы.

На сегодняшний день уже разработаны методики [4], которые позволяют получать необходимую для реконструкции пожара информацию путем исследования каменных неорганических строительных материалов, сталей, обгоревших остатков древесины, копоти, полимерных материалов, лакокрасочных покрытий. Однако для повышения точности определения температуры воздействия и, соответственно, очага пожара необходимы развитие и совершенствование методической базы.

Одним из самых информационных и точных инструментальных методов, позволяющим решать широкий круг задач [5–8], является метод термического анализа. В связи с этим применение методов термического анализа весьма актуально для решения задач пожарно-технической экспертизы, в частности для определения температуры воздействия на строительный материал (древесину) для диагностики очага пожара.

В работе [9] описан методический подход для оценки термического воздействия на вспучивающиеся огнезащитные покрытия методами термического анализа: изучены закономерности термоокислительной деструкции огнезащитных составов интумесцентного типа, разработаны критерии для оценки температуры воздействия на огнезащитные покрытия и приведены результаты применения методики диагностики температуры воздействия на

огнезащитные покрытия интумесцентного типа методами термического анализа для диагностики очага пожара. Рассмотрим возможность применения данного методического подхода для определения температуры воздействия на деревянные конструкции и диагностики очага пожара.

Методика проведения исследований

Для изучения закономерностей термоокислительной деструкции древесины с целью определения температуры воздействия на материал в ходе пожара необходимо исследовать как нативные образцы древесины, так и образцы, подверженные термическому воздействию при различных температурах. С этой целью исследовались образцы древесины сосны как самого распространённого строительного материала, предварительно подверженные воздействию различных температур (200 °С, 250 °С, 300 °С, 350 °С, 400 °С и т. д.) в течение 30 минут.

Исследования образцов древесины (сосны) проводили методами термического анализа на приборе Netzsch STA 449 F5 Jupiter в среде воздуха, в интервале температур, характерном для стандартного (целлюлозного) режима пожара (250–900 °С). При проведении испытаний фиксировались следующие зависимости: термоаналитические зависимости: термогравиметрическая (ТГ) кривая; дифференциально-термогравиметрическая (ДТГ) кривая; кривая дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Условия проведения испытаний образцов древесины (сосны) приведены в таблице 1.

Таблица 1
Условия проведения испытаний

Условия испытаний	Используемый метод (модуль)	
	ТГ	ДСК
Термопара (материал)	S типа (Pt/PtRh)	
Тигель (материал, объем)	Al ₂ O ₃ (85 мкл)	
Масса образца, мг	4÷5 мг	
Форма образца	Опилки в дисперсном состоянии	
Атмосфера	воздух	
Расход газа, мл/мин	75	
Скорость нагрева, °С/мин	20	
Конечная температура нагрева, °С	900	

По ТГ, ДТГ и ДСК кривым с помощью программного обеспечения Proteus Thermal Analysis были определены следующие термоаналитические характеристики (ТАХ):

- температура (T , °С) при заданных значениях потери массы;
- потеря массы (Δm_t , %) при фиксированных значениях температуры;
- зольный остаток, % при температуре 700 °С (температуре окончания про-

цесса термоокислительной деструкции древесины);

- значения температур при максимумах скорости потери массы (ДТГ-максимумов);
- температуры максимумов тепловых эффектов, (T , °С).

Результаты исследований и их обсуждение

Термограмма образцов древесины, не подвергнутых предварительному термическому воздействию в воздушной среде, представлена на рисунке 1.

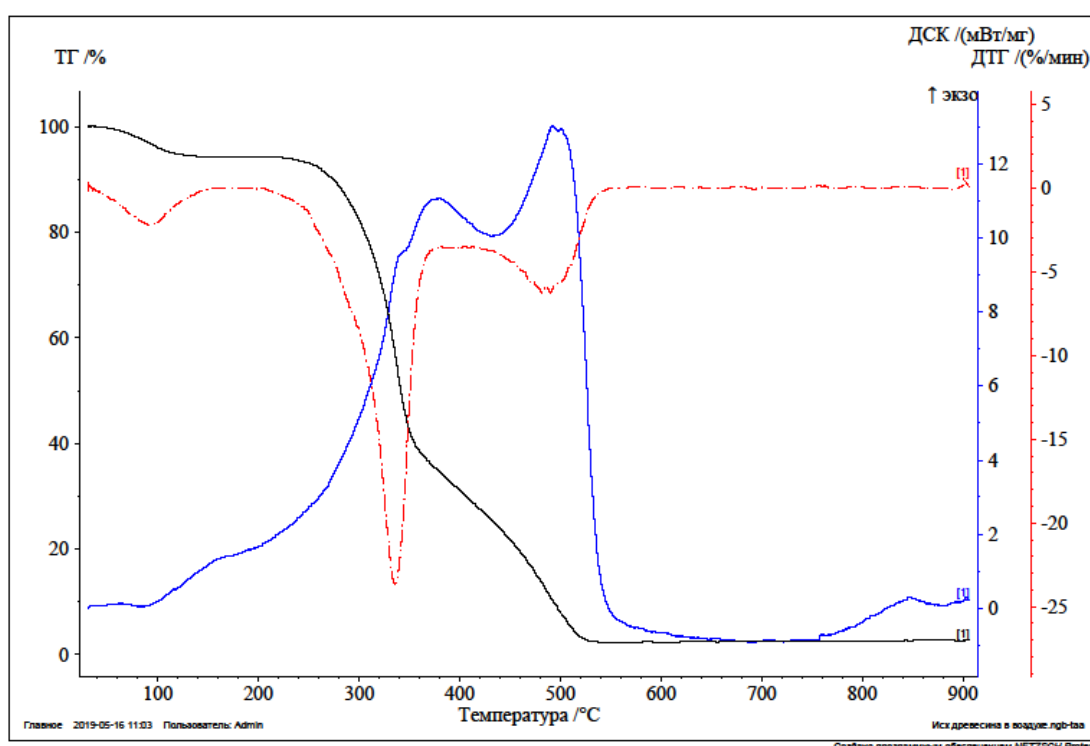


Рисунок 1. Термограмма образцов нативной древесины

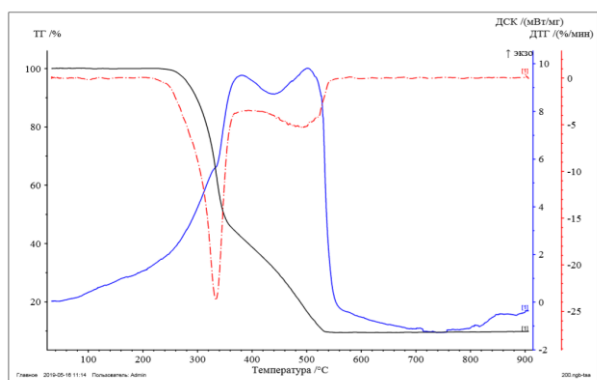
Анализ термогравиметрической (ТГ) кривой свидетельствует о 3-стадийном процессе термолитиза образцов древесины (с тремя ступенями на ТГ кривой) и тремя ДТГ пиками (на ДТГ кривой). Среднее значение зольного остатка анализируемых образцов древесины при температуре 700 °С составило 2,41 %. Наиболее выраженный ДТГ пик наблюдается в интервале 25÷400 °С и свидетельствует об интенсивном протекании процесса термоокислительной деструкции

древесины, сопровождающейся интенсивной потерей массы. Максимум третьего ДТГ пика приходится на температуру 481,6 °С и свидетельствует о выгорании конденсированных ароматических структур древесины.

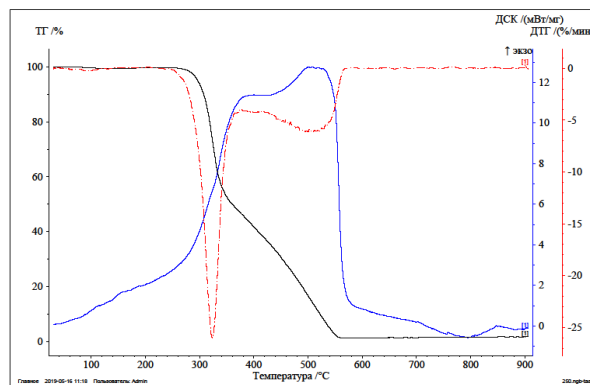
Комплексный экзотермический пик с максимумами при температурах 379,78 °С и 491,8 °С характеризуют выгорание летучих горючих газов и пенококса (конденсированных ароматических соединений), соответственно.

Термограммы образцов древесины сосны, предварительно подвергнутых термическому воздействию (200 °С, 250 °С,

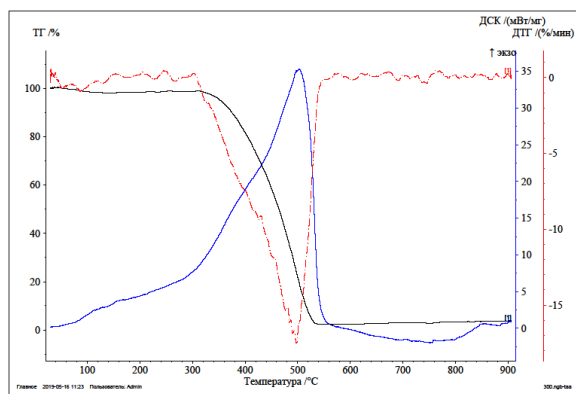
300 °С, 350 °С, 400 °С и т.д.) в течение 30 минут, представлены на рисунке 2 (а–е).



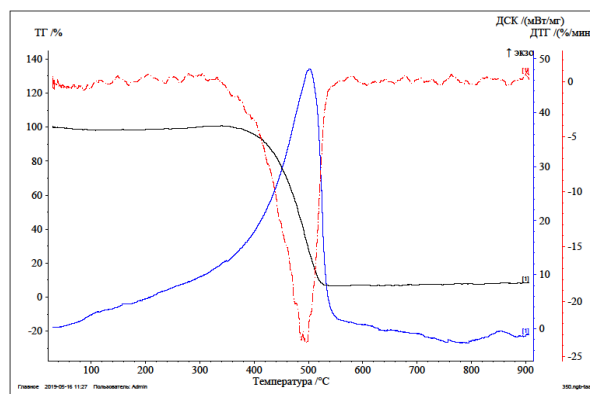
а) $t_{\text{ПВ}} = 200 \text{ } ^\circ\text{C}$



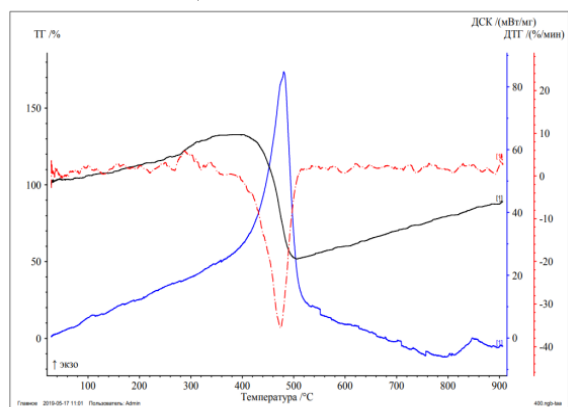
б) $t_{\text{ПВ}} = 250 \text{ } ^\circ\text{C}$



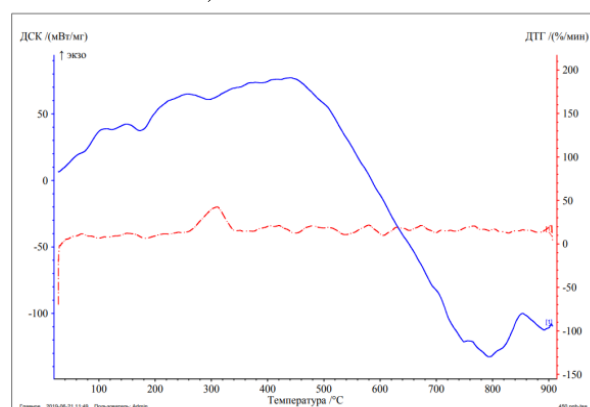
в) $t_{\text{ПВ}} = 300 \text{ } ^\circ\text{C}$



г) $t_{\text{ПВ}} = 350 \text{ } ^\circ\text{C}$



д) $t_{\text{ПВ}} = 400 \text{ } ^\circ\text{C}$



е) $t_{\text{ПВ}} = 450 \text{ } ^\circ\text{C}$

Рисунок 2. Термограммы образцов древесины (сосны), подвергнутых предварительному тепловому воздействию

Анализ результатов исследования древесины сосны после предварительного воздействия высоких температур представлен в таблице 2.

Таблица 2

Результаты анализа термограмм древесины сосны после предварительного температурного воздействия

№ п/п	Температура предварительного воздействия, $t, ^\circ\text{C}$	Результаты исследования
1	25	Три стадии термоокислительной деструкции, три ДТГ пика, комплексный ДСК пик
2	200	Две стадии термоокислительной деструкции, два ДТГ пика, комплексный ДСК пик
3	250	Две стадии термоокислительной деструкции, два ДТГ пика, комплексный ДСК пик
4	300	Одна стадия термоокислительной деструкции, один ДТГ пик, один ДСК пик
5	350	Одна стадия термоокислительной деструкции, один ДТГ пик, один ДСК пик
6	400	Одна стадия термоокислительной деструкции, один ДТГ пик, один ДСК пик
7	450	ДТГ пиков нет

Анализ представленных в таблице результатов свидетельствует о возможности использования в качестве одного из критериев диагностики степени температурного воздействия на древесину и последующего определения очага пожара – количество ДТГ пиков на ДТГ кривой: при температуре 200 °С и 250 °С наблюдается два ДТГ пика, при температуре воздействия 300 °С и выше наблюдается только один ярко выраженный ДТГ пик, а при температуре 450 °С и выше ДТГ пиков нет, что свидетельствует о практически полном выгорании древесины ещё до достижения температуры 450 °С.

Для анализа процесса термоокислительной деструкции древесины и дальнейшего определения температуры воздействия на неё, были выделены ТАХ, для которых получены зависимости от температуры с высоким значением коэффициента корреляции (более 0,9): потеря массы при температуре 400 °С ($\Delta m_{400}, \%$), зольный остаток при температуре 700 °С ($3O^{700}, \%$), температура при потере массы 40 % ($T_{40}, \%$). В таблице 3 приведены значения данных ТАХ образцов древесины сосны после предварительного воздействия высоких температур.

Таблица 3

Термоаналитические характеристики древесины сосны после предварительного воздействия высоких температур

Термоаналитические характеристики	Температура предварительного воздействия, $t_{пв}, ^\circ\text{C}$						
	25 °С	200 °С	250 °С	300 °С	350 °С	400 °С	450 °С
$\Delta m_{400}, \%$	68,93	61,19	58,26	18,12	4,29	-	-
$T_{40}, \%$	355,0	393,2	408,2	478,0	491,0	599,1	
$3O^{700}, \%$	1,41	1,62	1,98	2,94	7,19	70,06	

Анализ результатов свидетельствует о значительном снижении величины потери массы, возрастании температуры, соответствующей 40 % потери массы и

повышении зольного остатка при повышении температуры предварительного воздействия. Наличие зависимости рассматриваемых ТАХ от температуры

(коэффициент корреляции более 0,9) свидетельствует о возможности их применения в качестве критериев диагностики температуры теплового воздействия на древесину.

График, демонстрирующий влияние температуры предварительного воздействия на величину потери массы, при температуре 400 °С, приведён на рисунке 3.

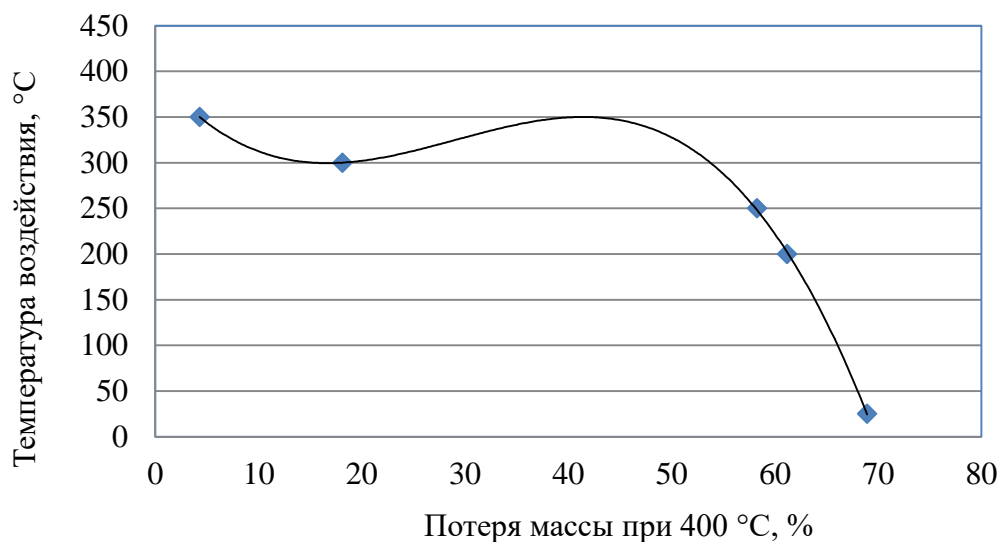


Рисунок 3. Влияние температуры предварительного воздействия на потерю массы древесины сосны

Получено уравнение полиномиальной зависимости 3 порядка (1) для определения температуры воздействия t , при известной потере массы древесины ($R^2 = 0,999$):

$$t = -0,0067x^3 + 0,5796x^2 - 13,77x + 398,89, \quad (1)$$

где x – потеря массы древесины при температуре 400 °С.

Полученное уравнение позволит рассчитывать температуру воздействия пожара на древесину после определения потери массы образцов древесины с места пожара.

График, демонстрирующий влияние температуры предварительного воздействия на величину 40 % потери массы, представлен на рисунке 4.

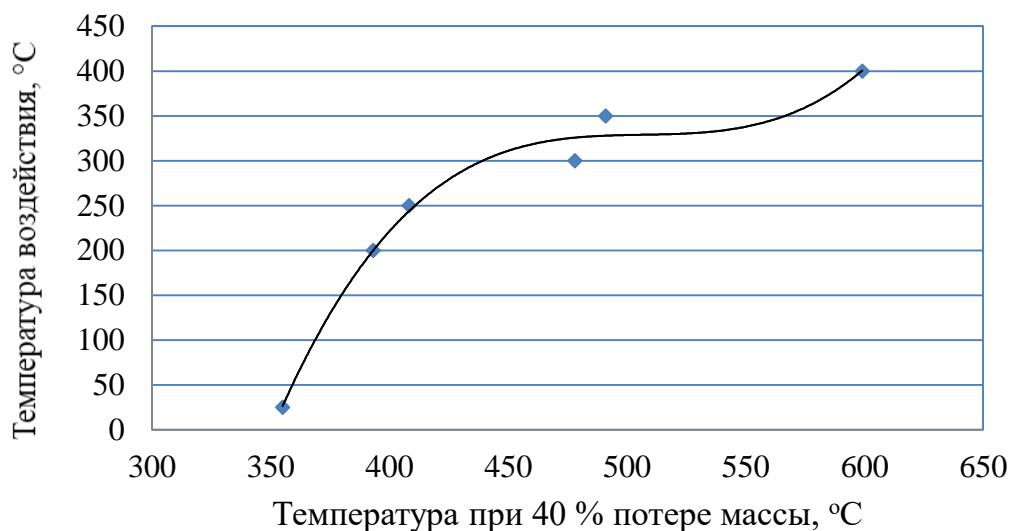


Рисунок 4. Влияние температуры предварительного воздействия на значение температуры при потере массы 40 %

Получено уравнение полиномиальной зависимости 3 порядка (2) для определения температуры воздействия t , при известной температуре 40 % потери массы древесины ($R^2 = 0,987$):

$$t = 8E-05x^3 - 0,1291x^2 + 65,459x - 9615 \quad (2)$$

где x – температура при 40 % потере массы.

Уравнение (2) позволит рассчитывать температуру воздействия пожара на древесину после определения температуры при 40 % потере массы

образцов с места пожара методами термического анализа.

График, демонстрирующий влияние температуры на величину зольного остатка, приведён на рисунке 5.

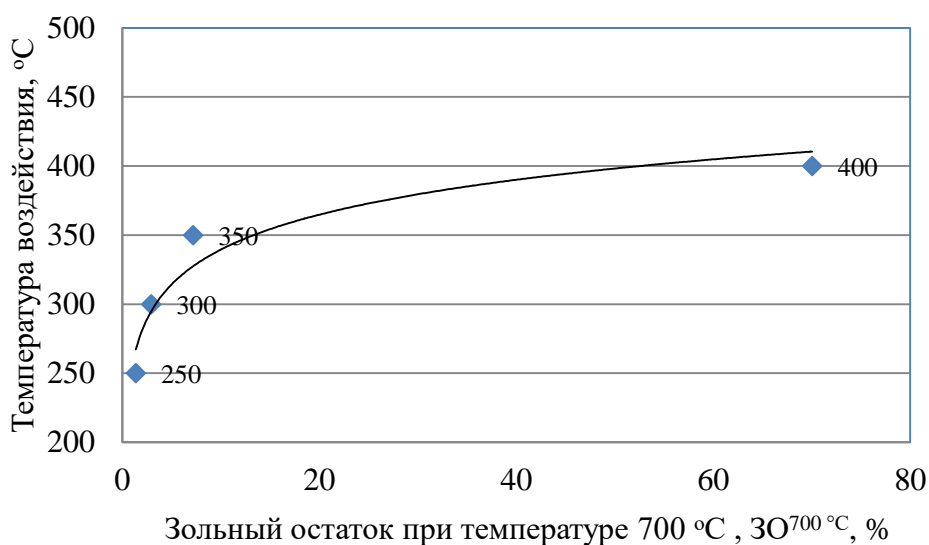


Рисунок 5. Влияние температуры предварительного воздействия на зольный остаток древесины сосны

Получено уравнение логарифмической зависимости для определения температуры воздействия t по величине зольного остатка древесины ($R^2 = 0,925$):

$$t = 36,47 \ln(x) + 255,5, \quad (3)$$

где x – зольный остаток древесины сосны при температуре 700 °С, %.

Теснота связи величины зольного остатка древесины и температуры воздействия характеризуется высоким значением коэффициента корреляции ($R^2 = 0,925$), а сама зависимость (3) описывается полиномиальной кривой 3 порядка.

После расчёта температуры воздействия пожара по трём критериям,

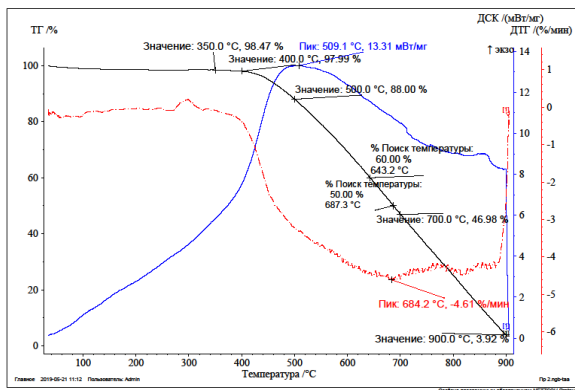
рассчитывается среднее значение температуры воздействия на древесину.

Полученные зависимости для определения температуры воздействия на древесину были проверены для диагностики термического воздействия и очага реального пожара деревянного дома в садовом товариществе. Фото помещения деревянного дома после пожара приведено на рисунке 6.

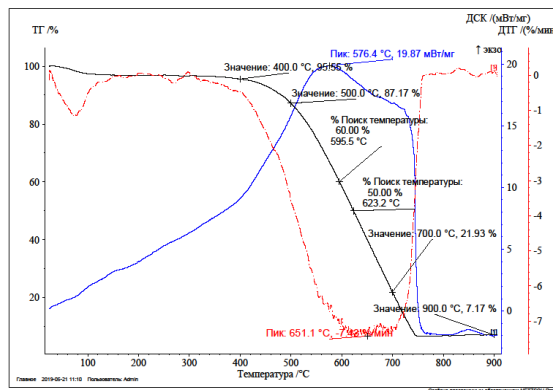


Рисунок 6. Общий вид одного из помещений деревянного дома после пожара

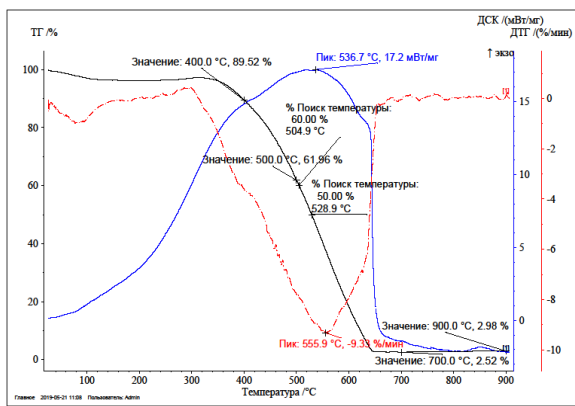
Пробы для термического анализа отобраны с обугленных участков деревянных конструкций. Пробы отбирались с участков, на которые было зонировано помещение, с шагом 1,5 м. Для анализа отбирался верхний (3–4 мм) слой угля. Термограммы образцов обугленной древесины с места пожара представлены на рисунке 7 (а–е).



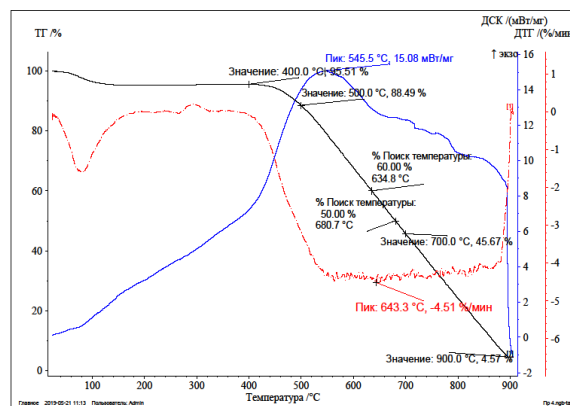
а) проба № 1



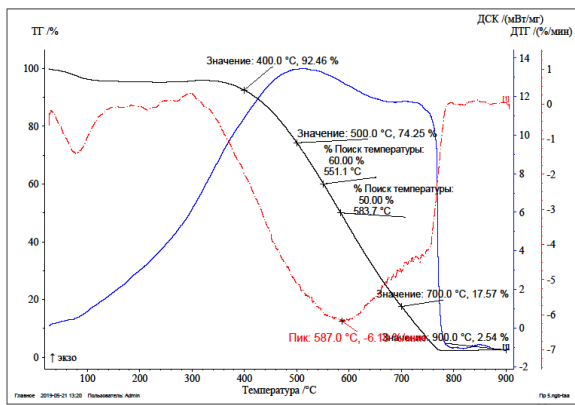
б) проба № 2



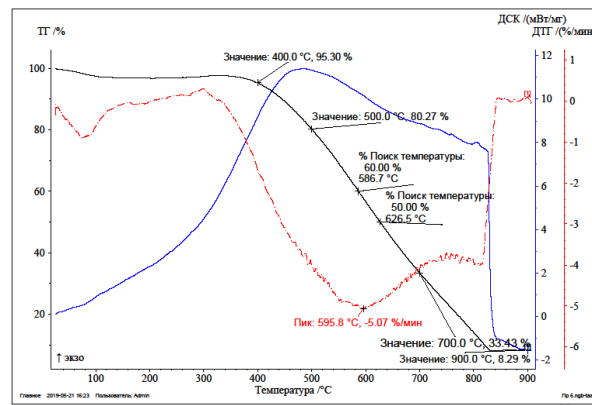
в) проба № 3



г) проба № 4



д) проба № 5



е) проба № 6

Рисунок 7. Термограммы проб обугленной древесины с места пожара

На полученных термограммах наблюдаются один или два ДТГ пика, указывающие на интервал температурного воздействия 250÷400 °C. С помощью

программного обеспечения Proteus Thermal Analysis были определены ТАХ – критерии для оценки температуры воздействия (таблица 4).

Таблица 4
Значения термоаналитических характеристик проб обугленной древесины с места пожара

№ пробы	$\Delta m_{400}^{\circ\text{C}}, \%$	$T_{40\%}, ^{\circ}\text{C}$	$30^{700}^{\circ\text{C}}, \%$
1	2,01	643,2	46,98
2	4,45	595,5	21,93
3	10,48	504,9	2,52
4	4,49	634,8	45,67
5	7,54	551,1	17,57
6	4,7	586,7	33,4

Анализ полученных результатов испытаний показал, что ТАХ проб обугленной древесины, отобранных с места пожара, несколько отличались от ТАХ образцов древесины, подвергнутых предварительному термическому воздействию в лабораторных условиях: более широким температурным интервалом термоокислительной деструкции древесины, меньшим значением потери массы при заданной температуре, что свидетельствует о более высокой

термостойкости образцов древесины с места пожара. Объяснением этому может послужить наличие лакокрасочного или огнезащитного покрытия на деревянных конструкциях дома, что значительно затруднило процесс диагностики температуры воздействия на древесину и соответственно очага пожара.

Рассчитанные по уравнениям (1–3) значения температуры воздействия на древесину во время пожара, представлены в таблице 5.

Таблица 5
Рассчитанные значения температур воздействия на древесину

№ пробы	$\Delta m_{400}, \%$	$T_{40\%}$	$30^{700}^{\circ\text{C}}$	Среднее значение $t, ^{\circ}\text{C}$
1	373,1	-	398,0	385,6
2	358,5	388,0	363,0	369,8
3	310,5	327,0	289,1	308,9
4	348,1	-	384,8	366,5
5	325,1	342,5	361,3	343,0
6	346,2	371,9	383,1	367,1

Значения температур воздействия на деревянные конструкции по результатам термического анализа находятся в интервале $309\div 386^{\circ}\text{C}$, что свидетельствует о достаточно невысокой температуре термолитиза древесины, что, вероятно, является следствием покрытия конструкций из древесины лакокрасочными материалами с добавками негорючих компонентов из карбонатов кальция и магния (мела) или, возможно, огнезащитными составами. Самая высокая температура воздействия была определена для пробы древесного

угля № 1 (около печи), что указывает на место нахождения очага пожара.

Выводы

1. В ходе исследования термоокислительной деструкции древесины методами термического анализа установлено, что в качестве критериев оценки температурного воздействия на древесину целесообразно использовать следующие термоаналитические характеристики: количество ДТГ пиков, значение температуры при 40 % потери массы, значение потери массы при

температуре 400 °С и зольный остаток при температуре 700 °С.

2. Получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитать температуру воздействия на деревянные конструкции после определения вышеуказанных термоаналитических характеристик проб обугленной древесины

с места пожара методами термического анализа.

3. Показано применение полученных эмпирических уравнений для расчёта температурного воздействия на деревянные конструкции и определения очага пожара в деревянном доме.

Литература

1. Пожары и пожарная безопасность в 2018 г. Статистический сборник. Статистика пожаров и их последствий / под общ. ред. Д. М. Гордиенко. М., 2019. 125 с.
2. Мегорский Б. В. Методика установления причин пожаров. М., 1966. 347 с.
3. Мухачев А. А. Установление причин пожара в процессе расследования дел о поджогах и нарушениях правил пожарной безопасности. М., 1998. 164 с.
4. Чешко И. Д. Экспертиза пожаров (объекты, методы, методики исследования) / под науч. ред. Н. А. Андреева. 2-е изд. СПб., 1997. 562 с.
5. Головина Е. В., Беззапонная О. В., Акулов А. Ю. и др. Оценка термостойкости огнезащитных составов интумесцентного типа для объектов нефтегазового комплекса // Нефтегазовое дело. 2018. Т. 16, № 6. С. 100–106.
6. Беззапонная О. В. Исследование окислительно-деструктивных процессов, протекающих в огнезащитных составах интумесцентного типа с течением времени, методом термического анализа // Техносферная безопасность. 2018. № 3 (20). С. 66–71.
7. Беззапонная О. В., Головина Е. В., Акулов А. Ю. и др. Пути совершенствования огнезащитных терморасширяющихся составов для использования на объектах нефтегазового комплекса // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26, № 12. С. 14–24.
8. Беззапонная О. В., Головина Е. В., Акулов А. Ю. Идентификационный контроль огнезащитных составов интумесцентного типа методами термического анализа // Техносферная безопасность. 2019. № 1 (22). С. 52–57.
9. Беззапонная О. В., Пискашева А. С., Ефимов И. А. и др. Диагностика температуры воздействия пожара на огнезащитные покрытия интумесцентного типа методами термического анализа // Техносферная безопасность. 2019. № 4 (25). С. 73–81.

Reference

1. Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2018 g. Statisticheskij sbornik. Statistika pozharov i ih posledstvij / pod obsh. red. D. M. Gordienko. M., 2019. 125 p.
2. Megorskij B. V. Metodika ustanovleniya prichin pozharov. M., 1966. 347 p.
3. Muhachev A. A. Ustanovlenie prichin pozhara v processe rassledovaniya del o podzhogah i narusheniyah pravil pozharnoj bezopasnosti. M., 1998. 164 p.
4. Cheshko I. D. Ekspertiza pozharov (ob"ekty, metody, metodiki issledovaniya) / pod nauch. red. N. A. Andreeva. 2-e izd., SPb., 1997. 562 p.
5. Golovina E. V., Bezzaponnaya O. V., Akulov A. YU. et al. Ocenka termostojkosti ognezashchitnyh sostavov intumescentnogo tipa dlya ob"ektov neftegazovogo kompleksa // Neftegazovoe delo. 2018. T. 16, No 6. P. 100–106.
6. Bezzaponnaya O. V. Issledovanie okislitel'no-destruktivnyh processov, protekayushchih v ognezashchitnyh sostavah intumescentnogo tipa s techeniem vremeni, metodom termicheskogo analiza // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2018. № 3 (20). P. 66–71
7. Bezzaponnaya O. V., Golovina E. V., Akulov A. YU. et al. Puti sovershenstvovaniya ognezashchitnyh termorasshirayushchihsya sostavov dlya ispol'zovaniya na ob"ektah neftegazovogo kompleksa // Pozharovzryvobezopasnost'. 2017. T. 26. No 12. P. 14–24.
8. Bezzaponnaya O. V., Golovina E. V., Akulov A. YU. Identifikacionnyj kontrol' ognezashchitnyh sostavov intumescentnogo tipa metodami termicheskogo analiza // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2019. № 1 (22). P. 52–57.
9. Bezzaponnaya O. V., Piskasheva A. S., Efimov I. A. et al. Diagnostika temperatury vozdeystviya pozhara na ognezashchitnye pokrytiya intumescentnogo tipa metodami termicheskogo analiza // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2019. No 4 (25). P. 73–81.