
**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ,
ВЕЩЕСТВ, МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

**INSTRUMENTS AND METHODS FOR MONITORING THE NATURAL ENVIRONMENT,
SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS**

УДК 620.1.08; 614.841.1
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-131-138

**КОНТРОЛЬ СТЕПЕНИ ТЕРМИЧЕСКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ДРЕВЕСИНЫ
ПУТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

А. С. ГОРБУНОВ*, М. В. ЕЛФИМОВА, Ю. Н. БЕЗБОРОДОВ

*Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Железногорск, Красноярский край, Россия
gorbunovgps@mail.ru*

Аннотация. Приведены результаты исследования образцов древесины (сорт — сосна) при термическом воздействии в муфельной печи. Исследование выполнено путем измерения цветовых характеристик с использованием модели разложения цвета на RGB-составляющие. При термическом воздействии в древесине происходят изменения, обусловленные химическими и физическими процессами. Время и температура являются показателями степени термического повреждения. Экспериментально в системе RGB установлены зависимости изменения цветовых характеристик образцов древесины от температуры и времени воздействия. Предложен критерий контроля степени термических повреждений, разработан прибор для реализации метода. Прибор основан на датчике цвета TCS3472 и программируемом логическом контроллере. Полученные данные могут быть использованы при расследовании пожаров на объектах, выполненных из деревянных конструкций, при исследовании путей распространения пожара, а также контроля степени термических повреждений древесины при различных технологических процессах.

Ключевые слова: RGB, цветовые характеристики, степень термических повреждений, древесина

Ссылка для цитирования: Горбунов А. С., Елфимова М. В., Безбородов Ю. Н. Контроль степени термических повреждений древесины путем измерения цветовых характеристик // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 2. С. 131—138. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-131-138.

**MONITORING THE DEGREE OF WOOD THERMAL DAMAGE
BY MEASURING ITS COLOR CHARACTERISTICS**

A. S. Gorbunov*, M. V. Elfimova, Yu. N. Bezrodov

*Siberian Fire Rescue Academy of Russian SFS EMERCOM,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Region, Russia
gorbunovgps@mail.ru*

Abstract. Results of study of wood samples (variety – pine) under thermal exposure in a muffle furnace are presented. The research is carried out by measuring color characteristics using a color decomposition model into RGB components. Under thermal exposure, changes occur in wood due to chemical and physical processes. Time and temperature are indicators of the degree of thermal damage. Dependences of changes in wood samples color characteristics in the RGB system on temperature and exposure time are established experimentally. A criterion for controlling the thermal damage degree is proposed, and a device is developed to implement the method. The device is based on the TCS3472 color sensor and a programmable logic controller. The data obtained can be used in investigations of fires at objects made of wooden structures, in the study of fire propagation paths, as well as in monitoring the degree of thermal damage to wood during various technological processes.

Keywords: RGB, color characteristics, degree of thermal damage, wood

© Горбунов А. С., Елфимова М. В., Безбородов Ю. Н., 2023

For citation: Gorbunov A. S., Elfimova M. V., Bezrodov Yu. N. Monitoring the degree of wood thermal damage by measuring its color characteristics. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 2. P. 131—138 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-131-138.

При термическом воздействии происходят [1] изменения физических свойств и химического состава материала, зависящие от температуры и длительности воздействия. Эти изменения можно описать с помощью параметра „степень термических повреждений“.

Степень термического повреждения материала возможно описать качественно или количественно [1—3]. В большинстве случаев специалисты при расследовании пожаров используют качественную оценку, описывая внешний вид (потемнения, вид угля, частичное уничтожение). Однако существуют методы определения степени термических повреждений древесины непосредственно на пожаре с помощью приборов, к ним относятся измерение глубины обугливания [4], а также измерение электросопротивления обугленных остатков древесины [5]. Эти методы предполагают работу только с обугленными фрагментами древесины. Часто физико-химические изменения находящейся на путях распространения огня древесины происходят только на поверхности (в тонком слое), без глубоких структурных изменений, что делает невозможным применение данных методов исследования.

Древесина используется в качестве топлива, строительного материала, орудий труда, при создании бумаги, мебели, предметов искусства и т. д. [6, 7]. Благодаря эксплуатационным показателям и физическим свойствам древесина активно используется в строительстве, что, в свою очередь, позволяет использовать ее в качестве объекта исследования при расследовании и экспертизе пожаров. Целью настоящей работы является установление в системе RGB образцов экспериментальных зависимостей изменений цветовых характеристик древесины от температуры и времени воздействия.

В задачи исследования входят:

- 1) подготовка образцов термически поврежденной древесины в лабораторных условиях при различных температурах и времени воздействия;
- 2) измерение цветовых характеристик в системе RGB;
- 3) установление зависимости изменений цветовых характеристик образцов древесины от температуры и времени воздействия.

При термической деструкции изменяются цвет древесины, глубина обугливания, а также физические свойства, которые зависят от состава и химических процессов, происходящих в материале. При температуре от 120 до 150 °С поверхность древесины желтеет, от 150 до 200 °С — становится коричневой, дальнейший нагрев приводит к обугливанию (черный цвет) [8].

Для определения цвета в численных значениях используют колориметры. При проведении исследования в настоящей работе применялся прибор контроля степени термических повреждений путем цветоизмерения, основанный на датчике цвета TCS3472 [9]. Прибор состоит из датчика цвета TCS3472, шлейфа проводников, программируемого логического контроллера, ЖК-дисплея, корпуса прибора (в виде изолированной от внешних условий измерительной камеры на телескопической штанге) с источником питания. Прибор позволяет определять цветовые характеристики предметов и конструкций для оценки степени их термических повреждений вследствие пожара.

Прибор работает в цветовой системе координат RGB со значениями цветовых характеристик от 0 до 255 [10]. В приборе реализована функция определения интенсивности отраженного света S . При использовании этой модели любой цвет может быть представлен в цветовом пространстве с помощью вектора (рис. 1). При этом направление вектора характеризует цветность, а его модуль ($|C|$) отражает яркость:

$$|C| = \sqrt{R^2 + G^2 + B^2}, \quad (1)$$

где R — значение красного цвета; G — зеленого; B — синего.

Таким образом, важным показателем для оценки термических повреждений материалов является яркость, т.е. расположение точки цвета ближе к черному оттенку (цвету карбонизированных продуктов).

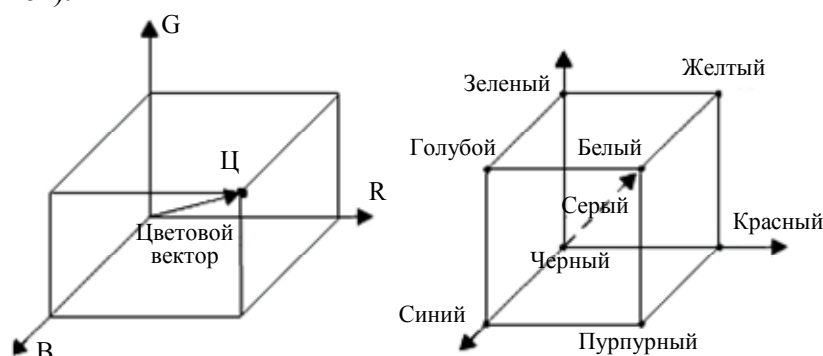


Рис. 1

Достоверность показаний прибора при оценке степени термических повреждений путем цветоизмерения с помощью датчика цвета TCS3472 оценивалась из сопоставления результатов с координатами цвета, характерных для эталонов белого, черного и зеленого цвета с учетом погрешности.

Для калибровки датчика и вычисления погрешностей использовалось программное обеспечение фирмы TAOS [9]: относительная погрешность прибора после калибровки не превышает 5,8 %.

Объектами исследования является прямослойная воздушно-сухая древесина сорта „сосна“ в виде прямоугольных брусков с размерами 25×50×150 мм. Образцы древесины без видимых пороков и смоляных включений; боковые поверхности образцов остроганы, торцы опилены и обработаны напильником. Перед исследованием образцы в течение 8 ч находились в сушильном шкафу при температуре 50 °С.

Образцы были разделены для семи серий исследований (по три образца в каждой). На образцы воздействовали температурой от 100 до 400 °С (с шагом в 50 °С для одной серии исследования) в течение 10, 20 и 30 мин; образцы по одному извлекались из муфельной печи по достижении времени обработки. Однако во время проведения эксперимента появилась необходимость увеличить число серий исследования в диапазоне 200—250 °С для выявления момента начала пиролиза древесины: было добавлено еще две серии (по три образца) при температуре 220 и 230 °С. Охлаждение происходило естественным путем в помещении.

Визуальные признаки термических повреждений исследуемых образцов представлены на рис. 2. Цвет древесины начинает изменяться при температуре свыше 150 °С. При температуре выше 350 °С на поверхности образцов начинает образовываться обугленный остаток. Изменение внешнего вида зависит от времени и температуры воздействия: с увеличением этих показателей термические повреждения, проявляющиеся в виде потемнения и обугливания, усиливаются.

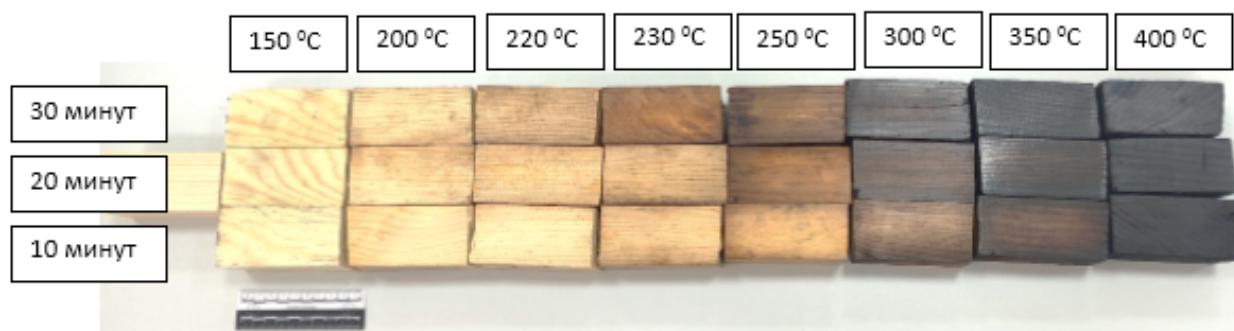


Рис. 2

В процессе измерения разработанный прибор автоматически с небольшим интервалом проводит десять замеров в одной точке при неизменном положении датчика; заложенная программа выдает в качестве результата среднее арифметическое значение показателей цвета. После усреднения результаты индивидуальных измерений отбрасываются и недоступны для анализа. Далее на основании пяти ручных замеров в различных областях одного образца берется среднее арифметическое значение, которое и считается за результат. Области на образце выбираются так, чтобы не иметь визуально определимых особенностей (наличия сучков, изменения цвета или текстуры).

Результаты измерений были статистически обработаны по методике ГОСТ Р 50779.22–2005*. На основании центральной предельной теоремы теории вероятности можно сделать обоснованное предположение о нормальности распределения измеряемых значений. В доверительные интервалы укладывается 95 % результатов всех измерений. Значение средней относительной погрешности каждого измерения не превышает 5 %. Средние значения измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Средние значения цветовых характеристик образцов древесины

№ образца	$t, ^\circ\text{C}$	$T, \text{мин}$	R	G	B	$C, \text{люкс}$	$ \text{Ц} $
1	100	10	200	158	124	772	283
2	150	10	190	150	112	728	267
3	200	10	186	134	98	665	249
4	220	10	174	125	90	630	232
5	230	10	168	118	82	580	221
6	250	10	147	96	65	489	187
7	300	10	73	50	40	259	97
8	350	10	32	24	21	125	45
9	400	10	18	19	19	94	32
10	100	20	200	158	124	772	283
11	150	20	190	150	113	728	267
12	200	20	170	121	87	601	226
13	220	20	161	107	76	549	208
14	230	20	147	99	71	503	191
15	250	20	65	38	29	208	81
16	300	20	32	25	22	127	46
17	350	20	27	24	21	120	42
18	400	20	19	20	20	96	34
19	100	30	202	158	124	772	285
20	150	30	194	148	108	718	267
21	200	30	171	120	86	595	226
22	220	30	132	86	62	443	169
23	230	30	74	43	37	232	93
24	250	30	59	36	27	193	74
25	300	30	26	29	21	118	44
26	350	30	24	22	20	113	38
27	400	30	19	20	20	99	34

Ввиду нелинейности функции для описания полученных зависимостей использовалась логистическая кривая вида:

$$\text{Ц}(t) = \frac{\text{Ц}_{\max} - \text{Ц}_{\min}}{1 + e^{k(t-t_0)}} + \text{Ц}_{\min}, \quad (2)$$

* ГОСТ Р 50779.22-2005 (ИСО 2602:1980) Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего. 31 мая 2005. <https://docs.cntd.ru/document/1200039939>.

где в качестве Π_{\max} и Π_{\min} брались максимальные и минимальные экспериментальные значения зависимой переменной (модуля цветового вектора); t_0 — абсцисса (температура) точки перегиба определялась визуально по графику; k — значение производной в точке t_0 (подбиралось путем компьютерного перебора в диапазоне значений от 0,01 до 0,1 по сетке с шагом 0,01 с целью максимизации коэффициента детерминации (R^2) линейной зависимости экспериментальных и подобранных значений. Уравнения зависимости модуля цветового вектора от температуры (табл. 2) были подобраны „вручную“ с помощью Microsoft Excel. Так как фактические значения F-критерия Фишера больше табличного при уровне значимости 0,05, то полученные уравнения и показатели тесноты связи являются статистически значимыми.

Таблица 2

Уравнения зависимости модуля цветового вектора образцов древесины от температуры и времени

№	T , мин (при 100—400 °C)	Уравнение зависимости	R^2	F-критерий Фишера
1	10	$ \Pi = \frac{251}{1 + e^{0,03(t-260)}} + 32$	0,9955	1548,56
2	20	$ \Pi = \frac{249}{1 + e^{0,06(t-230)}} + 34$	0,9771	298,68
3	30	$ \Pi = \frac{251}{1 + e^{0,07(t-220)}} + 34$	0,9878	566,77

Из рис. 3, 4 и 5 представлена зависимость модуля цветового вектора от воздействия температуры в течение 10, 20 и 30 мин на образцы древесины. Видно, что при увеличении температуры показатели RGB, а также $|\Pi|$ уменьшаются в пределах от 100 до 350 °C. Также графики для времени температурного воздействия 20 и 30 мин практически совпадают, что говорит о более существенном влиянии температуры по сравнению с длительностью воздействия.

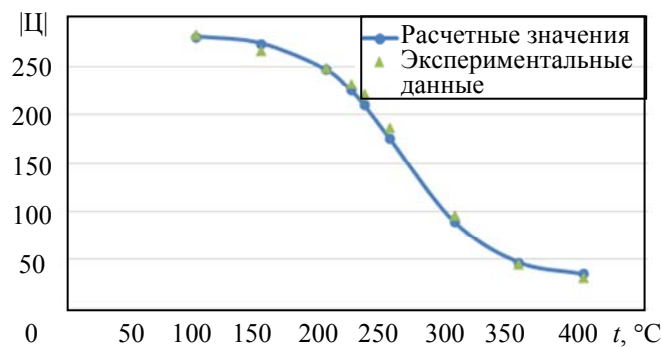


Рис. 3

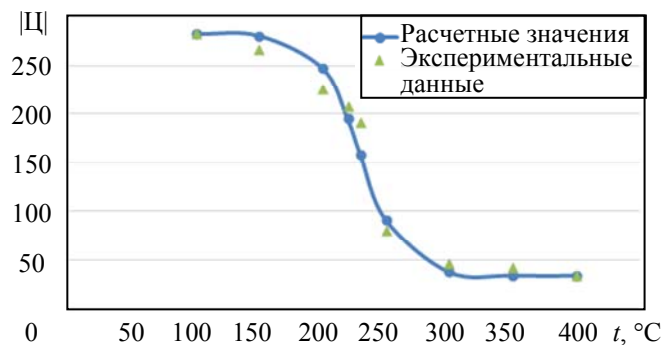


Рис. 4

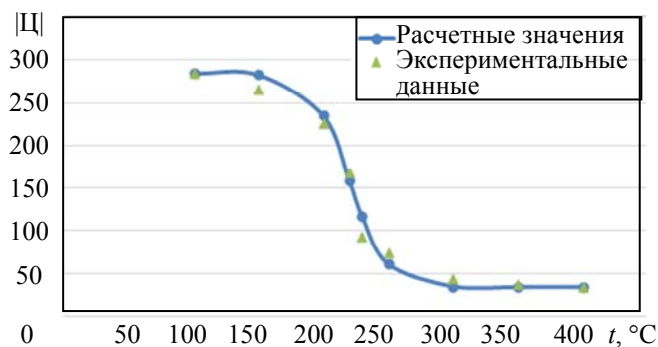


Рис. 5

Как известно, древесина является природным полимером, ее основные компоненты — целлюлоза (70—75 %) и гемицеллюлоза, а также лигнин (25—30 %) [11].

Полученные данные отражают химические и физические процессы, происходящие в древесине при термическом воздействии. Процесс термического разложения древесины протекает в несколько этапов. На первом этапе — до 125 °С — из древесины испаряется влага. При повышении температуры начинают выделяться горючие летучие компоненты [12]. Чем выше температура нагрева, тем более существенные внешние изменения претерпевает древесина. При температуре от 300 до 350 °С древесина теряет цвет и обугливается по поверхности в течение нескольких минут. Гемицеллюлоза разлагается с выделением летучих продуктов при температуре от 200 до 260 °С, целлюлоза — от 240 до 350 °С, лигнин — от 280 до 500 °С. Эти диапазоны температур приведены по данным термогравиметрического анализа [13].

В [14] отмечается, что при температуре, приближающейся к 200 °С, заметно снижается степень полимеризации полисахаридов, особенно гемицеллюлоз, происходят плавление лигнина и его конденсация. При температуре свыше 300 °С обычная структура древесины полностью исчезает, уступая место газообразным продуктам термической деструкции.

Таким образом, возможно сравнивать степень термического повреждения древесины разработанным инструментальным методом с использованием колориметрии. Однако температурные пределы этого метода ограничены, с одной стороны, началом испарения влаги (150 °С), а с другой — началом процесса карбонизации (350 °С).

Научная новизна работы заключается в предложенном методе оценки степени термических повреждений древесины, а также в установлении зависимостей изменения цветовых характеристик от температуры и времени воздействия. Предложенный метод позволяет контролировать и оценивать степень термических повреждений древесины в различных отраслях (сушка, обработка), а также при расследовании пожаров, в установлении путей распространения горения. Визуальный метод имеет ряд недостатков, связанных со световыми эффектами и различными условиями наблюдения (угол падения света, освещенность, индивидуальная чувствительность зрения). Предложенный метод позволяет исключить влияние различных субъективных факторов и проводить измерения в одинаковых условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чешко И. Д. Экспертиза пожаров (объекты, методы, методики исследования). СПб: СПб ИПБ МВД РФ, 1997. 562 с.
2. NFPA 921 Guide for Fire and Explosion Investigations. 2004 [Электронный ресурс]: <https://niordc.ir/uploads/nfpa_921_-_2004.pdf>.
3. Мегорский Б. В. Методика установления причин пожаров. М.: Стройиздат, 1966. 347 с.
4. Чешко И. Д. Технические основы расследования пожаров: Методическое пособие. М.: ВНИИПО, 2002. 330 с.
5. Чешко И. Д., Егоров Б. С., Голяев В. Г., Смирнов К. П. Экспертное исследование обугленных остатков древесины с целью установления условий теплового воздействия и выявления очаговых признаков пожара // Экспертная техника. М.: ВНИИСЭ МЮ СССР. 1987. Вып. 99. С. 3—37.

6. Wang L., Toppinen A., Juslin H. Use of wood in green building: A study of expert perspectives from the UK // Journal of Cleaner Production. 2014. Vol. 65. P. 350—361.
7. Ramage M. H. et al. The wood from the trees: The use of timber in construction // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 68. P. 333—359.
8. Горбунов А. С., Слепов А. Н., Пожаркова И. Н. Возможность применения оптического прибора для определения цвета в экспертизе пожаров // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций: Сб. матер. Всерос. науч.-практ. конф. Железногорск, 23 апреля 2021 г. С. 616—619.
9. Паспорт на датчик цвета TCS34725 [Электронный ресурс]: <<https://natural-https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/TCS34725.pdf>>. (дата обращения: 27.06.2022).
10. Schwarz M. W., Cowan W. B., Beatty J. C. An experimental comparison of RGB, YIQ, LAB, HSV, and opponent color models // ACM Transactions on Graphics (tog). 1987. Vol. 6, N 2. P. 123—158.
11. Пожаровзрывоопасность веществ, материалов и средства их тушения: Справ. изд. / Под ред. А. Н. Баратова и А. Я. Корольченко. М.: Химия, 1990.
12. Левин Э. Д., Барабаш Н. Д., Морозов В. А. Химия древесины. Рига: Зинатне, 1969. С. 135—139.
13. Марьяндышев П. А. и др. Термогравиметрическое исследование процесса термического разложения и горения древесного топлива, углей и гидролизного лигнина // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 5. С. 26—31.
14. Попова Л. Г. Исследование некоторых вопросов механизма образования древесного угля. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л.: Лесотехническая академия им. Кирова, 1970. 15 с.

Сведения об авторах

Александр Сергеевич Горбунов

— Сибирская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий; кафедра инженерно-технических экспертиз и криминалистики; преподаватель;
E-mail: gorbunovgps@mail.ru

Марина Владимировна Елфимова

— канд. техн. наук, доцент; Сибирская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий; кафедра инженерно-технических экспертиз и криминалистики;
E-mail: elfimar@mail.ru

Юрий Николаевич Безбородов

— д-р техн. наук, профессор; Сибирская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий; научно-технический центр; старший научный сотрудник

Поступила в редакцию 28.06.22; одобрена после рецензирования 05.10.22; принята к публикации 27.12.22.

REFERENCES

1. Cheshko I.D. *Ekspertiza pozharov (ob"yekty, metody, metodiki issledovaniya)* (Examination of Fires (Objects, Methods, Research Methods)), St. Petersburg, 1997, 562 p. (in Russ.)
2. *NFPA 921 Guide for Fire and Explosion Investigations*, 2004, https://niordc.ir/uploads/nfpa_921_-_2004.pdf.
3. Megorskiy B.V. *Metodika ustanovleniya prichin pozharov* (Methodology for Establishing the Causes of Fires), Moscow, 1966, 347 p. (in Russ.)
4. Cheshko I.D. *Tekhnicheskiye osnovy rassledovaniya pozharov* (Technical Basics of Fire Investigation), Moscow, 2002, 330 p. (in Russ.)
5. Cheshko I.D., Egorov B.S., Golyaev V.G., Smirnov K.P. *Expert technique*, Moscow, 1987, no. 99, pp. 3—37. (in Russ.)
6. Wang L., Toppinen A., Juslin H. *Journal of Cleaner Production*, 2014, vol. 65 pp. 350—361.
7. Ramage M.H. et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 68, pp. 333—359.
8. Gorbunov A.S., Slepov A.N., Pozharkova I.N. *Aktual'nyye problemy obespecheniya pozharoy bezopasnosti i zashchity ot chrezvychaynykh situatsiy* (Actual Problems of Ensuring Fire Safety and Protection from Emergen-

- cies), Collection of materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Zheleznogorsk, April 23, 2021, pp. 616–619. (in Russ.)
9. <https://natural-https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/TCS34725.pdf>. (in Russ.)
10. Schwarz M.W., Cowan W.B., Beatty J.C. *ACM Transactions on Graphics* (tog), 1987, no. 2(6), pp. 123–158.
11. Baratov A.N. and Korolchenko A.Ya., ed., *Pozharovzryvoopasnost' veshchestv, materialov i sredstva ikh tusheniya: Spravochnik* (Fire and Explosion Hazard of Substances, Materials and Their Extinguishing Agents: A Handbook), Moscow, 1990. (in Russ.)
12. Levin E.D., Barabash N.D., Morozov V.A. *Khimiya drevesiny* (Chemistry of Wood), Riga, 1969, pp. 135–139. (in Russ.)
13. Maryandyshev P.A., Chernov A.A., Popova E.I., Lyubov V.K. *Modern High Technologies*, 2015, no. 5, pp. 26–31. (in Russ.)
14. Popova L.G. *Issledovaniye nekotorykh voprosov mekhanizma obrazovaniya drevesnogo uglia* (Study of Some Questions of the Mechanism of Formation of Charcoal), Extended abstract of candidate's thesis, Leningrad, 1970, 15 p. (in Russ.)

Data on authors

- Alexander S. Gorbunov** — Siberian Fire Rescue Academy of Russian SFS EMERCOM; Department of Engineering and Technical Expertise and Forensic Science; Lecturer;
E-mail: gorbunovgps@mail.ru
- Marina V. Elfimova** — PhD, Associate Professor; Siberian Fire Rescue Academy of Russian SFS EMERCOM; Department of Engineering and Technical Expertise and Forensic Science; E-mail: elfimar@mail.ru
- Yury N. Bezborodov** — Dr. Sci., Professor; Siberian Fire Rescue Academy of Russian SFS EMERCOM; Scientific and Technical Center; Senior Researcher

Received 28.06.22; approved after reviewing 05.10.22; accepted for publication 27.12.22.