

---

---

**ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ  
И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ**

---

---

УДК 662.641.2

**ЗАЖИГАНИЕ И ГОРЕНИЕ ТОРФА РАЗЛИЧНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ  
ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА**

© 2021 г. А. Ю. Зайченко<sup>1\*</sup>, Д. Н. Подлесный<sup>1</sup>, М. В. Салганская<sup>1</sup>,  
М. В. Цветков<sup>1</sup>, Е. А. Салганский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт проблем химической физики Российской академии наук, Черноголовка, Россия*

\*E-mail: fta@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 12.11.2020;  
после доработки 03.12.2020;  
принята в печать 21.12.2020

Исследованы закономерности воспламенения и горения торфа различной проницаемости в условиях естественной конвекции воздуха. Определены начальные температуры инициирования для образцов торфа различного гранулометрического состава. Показано, что при увеличении проницаемости образцов торфа возрастают температура и скорость горения и происходит более полное расходование кислорода с увеличением концентрации монооксида и диоксида углерода в газообразных продуктах. Газообразные продукты горения торфа в условиях естественной конвекции воздуха содержали в основном CO, CO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>. Содержание метана не превышало 0.5, а водорода – 2 об. %.

*Ключевые слова:* торф, естественная конвекция, зажигание, самовоспламенение, фильтрационное горение.

**DOI:** 10.31857/S0207401X21080148

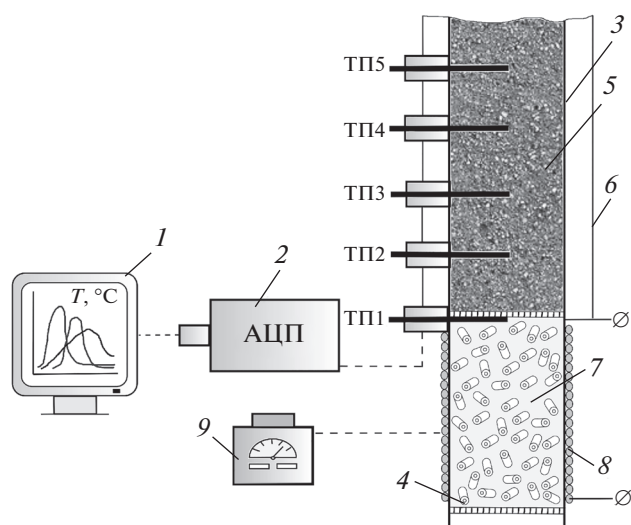
### ВВЕДЕНИЕ

В России разведана половина всех мировых запасов торфа, что делает торф особо важным сырьем, особенно учитывая исчерпаемость запасов традиционных горючих полезных ископаемых [1]. Технологию использования торфа можно представить в виде следующей схемы: осушение месторождения, добыча, складирование, транспортировка, складирование для хранения, использование в качестве топлива. При применении торфа существует ряд общих операций, которые характеризуются повышенной пожарной опасностью, так как из торфа выводится влага. Следует отметить, что степень пожароопасности торфа значительно выше, чем, например, у угля [2, 3]. Он легко самовозгорается и может воспламениться от небольшого источника тепловыделения [4, 5]. Известны случаи, когда при складировании торфа наблюдалось его самовозгорание [6]. В большинстве случаев возможны два пути воспламенения: от внешнего теплового источника на поверхности или от источника тепловыделения, заглубленного в слой в результате протекания биохимических, физических и химических процессов.

Горение торфяников, сопровождаемое выбросом парниковых газов, приводит к локальным разрушениям экосистемы и загрязнению воздуха продуктами горения. Так, в 1997 году произошло крупнейшее возгорание торфяников в Индонезии,

которое сопровождалось выбросом парниковых газов в количестве примерно 13–40% от годового выброса за счет человеческой деятельности [7]. Проведенные в работе [8] оценки показали, что годовое выделение парниковых газов при горении торфяников составляет около 15% от годового выброса за счет человеческой деятельности. К тому же, загрязнение воздуха продуктами горения и тления существенно увеличивает риск сердечно-легочных заболеваний [9].

Для моделирования горения и тления торфа разработаны химические схемы разной сложности. В работе [10] предложена химическая схема из трех реакций, включающая одну реакцию пиролиза и две реакции окисления, в качестве общей схемы для любых тлеющих топлив. В работе [11] предложили химическую схему тления торфа из пяти реакций – одна реакция сушки и четыре реакции разложения и окисления, и провели обобщение литературных данных. При этом сделан вывод, что ни одна из разработанных схем не может полно и количественно описать все режимы тления и горения торфа. Как правило, предложенные химические схемы не описывают состав газообразных продуктов, полагая, что этот газ имеет постоянные усредненные характеристики. Однако температура процесса определяет как состав газообразных продуктов, так и скорость горения [12–14]. Отличительной особенностью го-



**Рис. 1.** Принципиальная схема лабораторной установки: 1 – персональный компьютер (ПК); 2 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 3 – кварцевый реактор; 4 – металлическая сетка; 5 – засыпка торфа; 6 – теплоотражающий экран; 7 – инертный негорючий материал; 8 – электроспираль; 9 – лабораторный автотрансформатор (ЛАТР); ТП1–ТП5 – хромель-алюмелевые термопары.

рения пористых материалов при естественной фильтрации является то, что расход проходящего через пористый объект воздуха заранее неизвестен, а известно только давление газа на границах объекта. Расход воздуха при естественной фильтрации в первую очередь будет зависеть от проницаемости пористого объекта [15]. Энергетическое использование твердых горючих ископаемых методом фильтрационного горения проводится при вынужденной подаче топлива и также широко исследуется [16–18]. При вынужденной подаче окислителя могут реализовываться высокие значения температуры горения, что будет приводить к плавлению золы. Это представляет одну из проблем использования нетрадиционных топлив, на решение которой также направлены исследовательские работы [19].

В литературе имеется мало данных по составу газообразных продуктов при тлении торфа. Результаты измерений состава газообразных продуктов при нагревании малых образцов торфа в закрытой мензурке [20] и тлении торфа на открытом воздухе [21] показали примерно одинаковый результат. В обоих случаях общий выход оксида и диоксида углерода составил 95–96%, выход остальных газов не превышал 1% для любого вещества от массы образца. Выход CO составил 3–7.5, а CO<sub>2</sub> – 30–36 мас.% в первой работе и 9.5 и 77% во второй работе соответственно. Аналогичные результаты были получены в работе [22] при исследовании тления торфа при различной его влажности и

мощности воспламеняющего излучения. Средние значения выхода CO составили 20% и CO<sub>2</sub> – 40–50% в объеме газообразных продуктов. В настоящей работе экспериментально исследуются закономерности воспламенения и горения торфа различной проницаемости в условиях естественной конвекции воздуха.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Эксперименты по зажиганию и горению торфа проводили в вертикальном цилиндрическом кварцевом реакторе длиной 500 мм и внутренним диаметром 66 мм (рис. 1). Толщина стенки реактора (3) составляла 3 мм. Для снижения боковых теплопотерь устанавливался теплоотражающий экран (6), который снижает уровень потерь за счет излучения. Образец торфа помещали в реактор с открытыми торцами, что обеспечивало возникновение естественной конвекции воздуха. Зажигание исследуемых образцов осуществляли с нижней границы. Нижняя часть реактора была заполнена инертным негорючим материалом (7), а именно кольцами Рашига с характерным размером 5 × 10 мм. Засыпка из колец Рашига имеет высокую пористость, равную 0.6, чтобы не создавать дополнительного сопротивления воздуху. Нижний торец реактора закрывался металлической сеткой (4) для предотвращения просыпания инертного материала из реактора. Нагрев материала осуществляли с помощью электроспирали (8) через внешнюю стенку реактора, напряжение на которой регулировали помощью лабораторного автотрансформатора (9). После равномерного прогрева всего объема инертного материала до заданной температуры проводили загрузку исследуемого горючего материала (5). В качестве объекта исследования был выбран экструдированный верховой торф тверского месторождения. Анализ воздушно-сухого торфа на выход летучих веществ и кокса, а также влажность проведен на термогравиметрическом анализаторе Pyris 1 TGA (Perkin Elmer, США). Зольность торфа определяли методом отжига в муфельной печи. В расчете на рабочую массу выход летучих веществ составил 50, нелетучего углерода – 27, влажность – 12, зольность – 11 мас.%. Элементный анализ торфа проводили на CHNS/O анализаторе “Vario MICRO cube” (Elementar, Германия). Элементный состав торфа на сухую беззольную массу определяли методом сжигания в потоке кислорода. Получены следующие результаты: C – 46.8, H – 5.2, N – 1.7, O – 46.3 мас.% (по разнице).

В экспериментах периодически проводили отбор проб газообразных продуктов в стеклянную ампулу-ловушку. Щуп ампулы помещался внутри реактора непосредственно над слоем торфа. У открытого крана ампулы создавалось небольшое разрежение для формирования потока продуктов

внутри ампулы. Время отбора составляло примерно 5 мин, чтобы продукты полностью вытеснили исходный воздух в ампуле. Анализ газообразных продуктов проводили на хроматографе Кристалл-5000 (Хроматэк, Россия), позволяющем анализировать продукты, находящиеся в газообразном состоянии при нормальных условиях. Абсолютная погрешность измерений газообразных продуктов не превышала 0.01 об. %.

Для измерения температуры в слое торфа использовались хромель-алюмелевые термопары (ТП1–ТП5), их показания через аналого-цифровой преобразователь (2) выводились на персональный компьютер (1) в реальном времени. Погрешность измерения температуры составляла 0.1 °С, инерционность термопары – менее 1 мин. Спаи термопар располагались в центре реактора. Расстояние между термопарами ТП2–ТП5 составляло 15 мм, первая термопара в слое торфа (ТП2) находилась на расстоянии ~10 мм от термопары ТП1, расположенной на уровне верхней границы инертного материала.

В экспериментах использовали образцы торфа четырех фракций с характерным размером частиц 2.5, 4, 6 и 8.5 мм соответственно. Пористость слоя торфа составляла 0.4–0.45. Характеристики образцов торфа различных фракций приведены в табл. 1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены результаты термогравиметрического анализа образца торфа в атмосфере азота. Скорость подъема температуры выбиралась равной 5 °С/мин, т.е. близкой к скорости в экспериментах по горению торфа. По результатам анализа определяли выход летучих веществ и кокса, а также влажность торфа. Из рис. 2 видно, что до температуры 150 °С происходит выделение общей и пирогенетической влаги. Пиролиз торфа происходит в интервале температур 250–450 °С.

На рис. 3 представлены температурные профили горения торфа при естественной фильтрации воздуха для частиц размером 6 мм. Начальный момент времени соответствует началу прогрева инертного материала. После прогрева его до заданной температуры в течение ~50 мин (значение на ТП1 выходит на установившийся уровень) осуществляли загрузку торфа. Момент загрузки образца в реактор характеризуется резким падением температуры на всех термопарах (см. рис. 3). Спустя 1 мин мы отключали нагрев электроспираль. После этого происходило либо воспламенение и горение торфа, либо затухание горения исследуемых образцов.

По результатам эксперимента определяли время задержки зажигания торфа, температуру и скорость горения. За время задержки зажигания ( $t_*$ ) принимали время от момента загрузки торфа

Таблица 1. Характеристики образцов торфа

Размер частиц, мм	Проницаемость, Д	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>
2.5	13000	560
4.0	20000	470
6.0	26000	430
8.5	53000	400

в реактор до начала саморазогрева образца с дальнейшим его горением. На рис. 4 представлен момент зажигания торфа в укрупненном масштабе для эксперимента, представленного на рис. 3. Начало саморазогрева торфа соответствует перегибу на кривой 2 (центр круглой области), при этом наблюдается рост температуры на термопаре в слое инертного материала. В это время внешний подогрев отключен и рост температуры в этом слое происходил от тепловыделения при горении торфа. Пересечение кривых 1 и 2 практически совпадало с перегибом на кривой 2, поэтому в дальнейшем для простоты мы принимали за  $t_*$  время от момента загрузки исследуемого образца до момента пересечения кривых 1 и 2.

В работе изучено влияние начальной температуры иницирования на время задержки зажигания торфа. Значение начальной температуры иницирования варьировали в пределах от 220 до 470 °С. На рис. 5 представлены зависимости времени задержки зажигания торфа от начальной температуры иницирования при естественной фильтрации для образцов различной проницаемости. Как видно из рисунка, при увеличении начальной температуры иницирования время задержки зажигания сни-

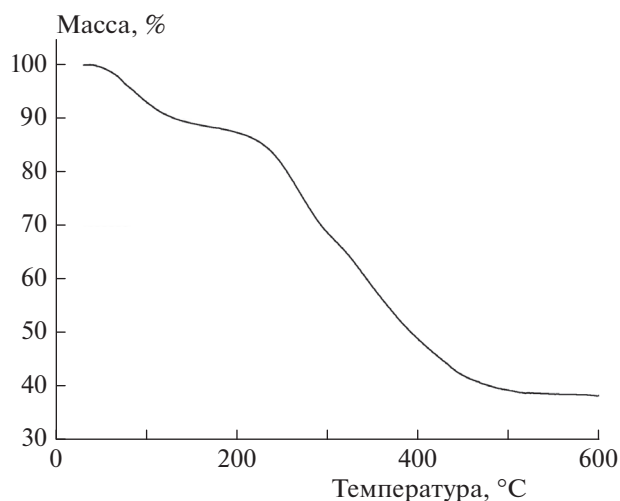
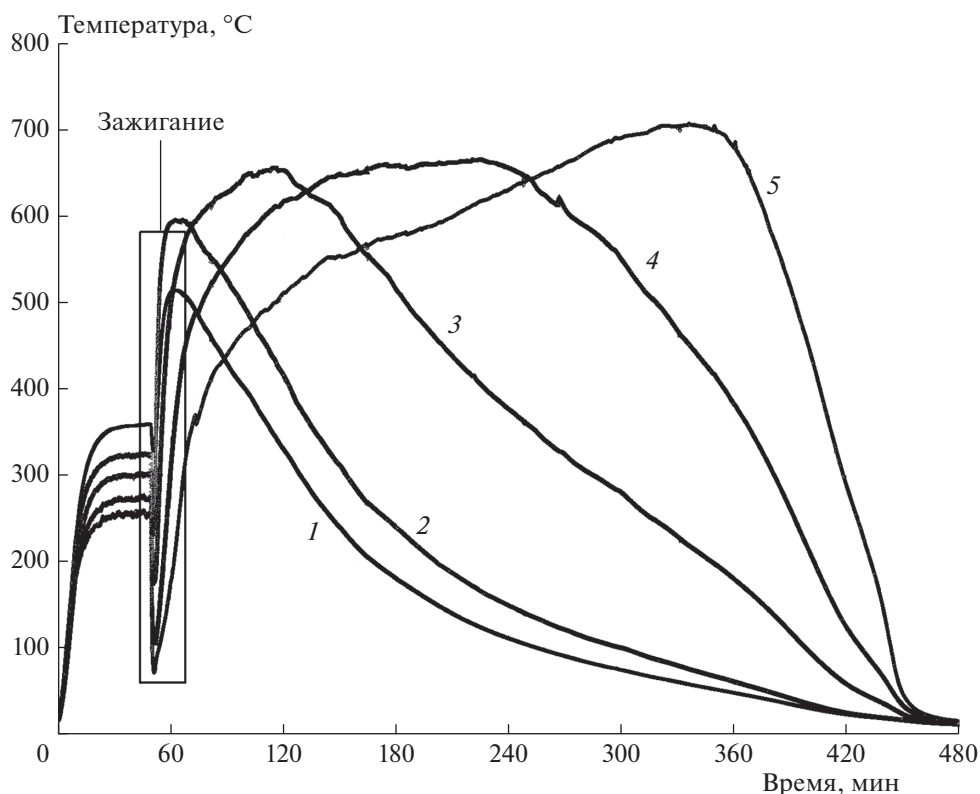


Рис. 2. Термогравиметрический анализ образца торфа в атмосфере азота. Скорость роста температуры – 5 °С/мин.



**Рис. 3.** Температурные профили волны горения образца торфа (размер частиц — 6 мм); 1–5 — термопары. Прямоугольной областью обозначен временной интервал зажигания образца.

жается. До значений температуры примерно 300 °С происходило практически экспоненциальное снижение времени задержки зажигания, а при дальнейшем росте температуры наблюдалось слабое снижение. Также с уменьшением размера частиц торфа и, соответственно, проницаемости происходило увеличение времени задержки зажигания.

Начальные температуры инициирования, при которых зажигание торфа не происходило, на рис. 5 обозначены заштрихованными областями. Для образцов торфа с размерами частиц 6 и 8,5 мм это значение составило 220 °С (область 1), для 4 мм — 240 °С (область 2), а для фракции 2,5 мм — 270 °С (область 3). На рис. 6 представлен пример затухания горения образца торфа с размером частиц 6 мм при температуре инициирования ~220 °С. После загрузки исследуемого образца торфа в реактор наблюдался небольшой рост температуры, после чего, спустя примерно 5 мин происходило монотонное снижение температуры и затухание горения торфа.

Рассмотрим подробнее случай, когда происходило зажигание торфа. На рис. 3 представлены температурные профили горения торфа с размером частиц 6 мм. Начальный момент времени соответствует началу прогрева инертного материала. После прогрева его до температуры 360 °С осуществляли

загрузку торфа. Далее происходило зажигание торфа и распространение фронта горения по длине реактора. Номера кривых на рис. 3 соответствуют номерам термопар. Как видно из графика, в ходе эксперимента по мере продвижения волны горения наблюдался рост температуры горения от ~600 до ~700 °С. Среднее значение скорости фронта горения составило 23 мм/ч. На кривых 4 и 5 можно выделить два участка роста температуры. До значений температуры 400–500 °С происходит быстрый подъем температуры за счет окисления органической массы торфа. При этом идет пиролиз торфа с образованием коксового остатка. Далее температура увеличивается гораздо медленнее. При этом происходит окисление коксового остатка, реакционная способность которого гораздо ниже.

В табл. 2 представлен состав газообразных продуктов, максимальная температура и средняя скорость горения различных фракций торфа. Также представлены средние значения состава продуктов. В каждом эксперименте проводили несколько отборов газообразных продуктов и, как правило, абсолютный разброс содержания веществ не превышал 2–3 об.%. Как видно из таблицы, с ростом размеров частиц торфа происходит повышение максимальной температуры от 589 до 866 °С и возрастание скорости фронта горения от 8 до 81 мм/ч.

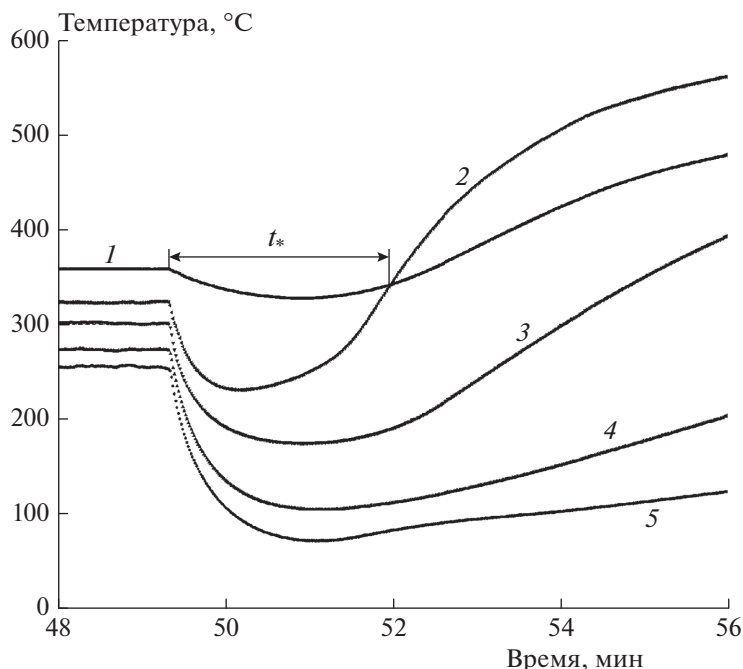


Рис. 4. Момент зажигания торфа (размер частиц – 6 мм); 1–5 – термопары по длине реактора;  $t_*$  – время задержки зажигания.

Увеличение размера частиц приводит к повышению расхода воздуха вследствие уменьшения сопротивления слоя инертного материала, что, в свою очередь, приводит к возрастанию максимальной температуры и скорости фронта горения торфа. Значения скорости фронта горения имеют тот же порядок величины, что и в экспериментальной работе [23], а также в расчетной работе [11] по исследованию тления торфа. Скорость фронта горения торфа в указанных работах составляет величину порядка 6 мм/ч, при этом направление распространения фронта было противоположное (сверху вниз по образцу).

Из табл. 2 видно, что газообразные продукты содержат в основном  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$ . При увеличении размера частиц торфа от 2.5 до 8.5 мм (проницаемость слоя торфа менялась от 13000 до 53000 Д): содержание  $\text{CO}_2$  увеличивается от 4.1 до 10.4 об.%, а  $\text{CO}$  увеличивается от 7.8 до 14.7 об.%, содержание  $\text{O}_2$  уменьшается от 16.1 до 5.8 об.%. Содержание метана увеличивается от 0.1 до 0.5 об.%, а водорода – 0.2 до 2.2 об.%. Горение торфа при естественной конвекции характеризуется невысокими значениями температуры (менее  $900^\circ\text{C}$ ), что обуславливает неполное расходование кислорода воздуха. При этом недогорания торфа не наблюдалось.

Как показано ранее в работах [20–22], при тлении торфа преобладающим окислом углерода в газообразных продуктах являлся диоксид углерода. В настоящей работе содержание оксида угле-

рода было больше, чем диоксида. Разница в составах газообразных продуктов объясняется различными режимами горения торфа. В настоящей работе воспламенение слоя торфа происходило с нижнего торца реактора. Газообразные продукты покидали зону горения и попадали в верхние, более холодные слои торфа, где химические реакции прекращались. В работах [20–22] воспламе-

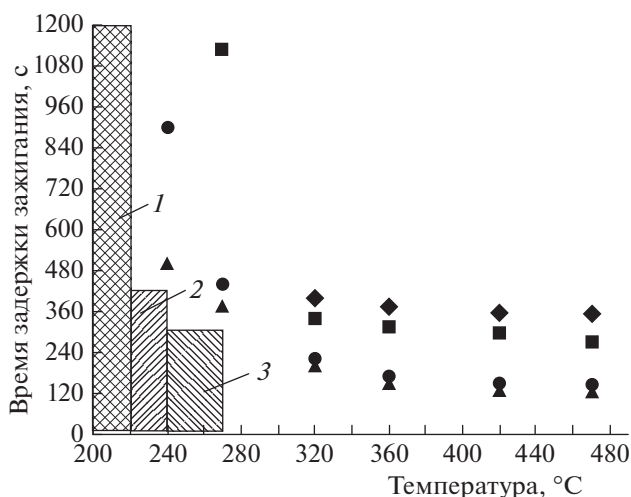
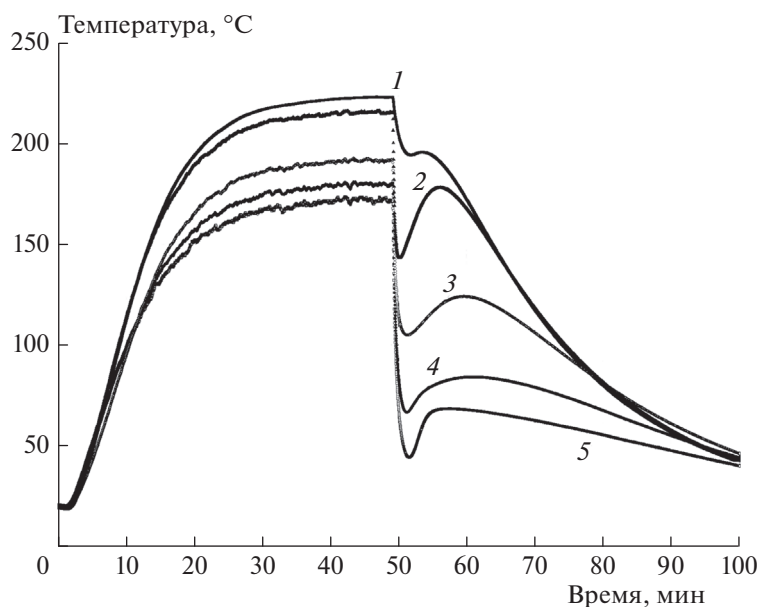


Рис. 5. Зависимость времени задержки зажигания от начальной температуры инициирования образцов торфа различного гранулометрического состава: 8.5 (▲), 6.0 (●), 4.0 (■), 2.5 (◆) мм.



**Рис. 6.** Зажигание образца торфа (размер частиц – 6 мм) не происходило. Температура инициирования – 220 °C; 1–5 – термопары по длине реактора.

нение слоя торфа происходило с верхнего торца. Газообразные продукты покидали зону горения и фильтровались через слой высокотемпературной золы, где могло происходить дальнейшее окисление оксида углерода кислородом воздуха.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование закономерностей зажигания и горения образцов торфа различного фракционного состава в условиях естественной конвекции воздуха. Воспламенение образцов торфа от источника тепловыделения осуществляли с нижней границы реактора, фронт горения распространялся по образцу снизу вверх.

Начальная температура инициирования, при которой зажигания торфа не происходило, для фракций с размером частиц 6 и 8.5 мм составила 220 °C, для фракции 4 мм – 240 °C, для фракции 2.5 мм – 270 °C. Показано, что при увеличении

начальной температуры инициирования от 220 до 470 °C время задержки зажигания снижается от ~20 до 2–6 мин.

Установлено, что с увеличением размера частиц торфа от 2.5 до 8.5 мм происходит повышение максимальной температуры от 489 до 866 °C и скорости фронта горения от 8 до 81 мм/ч. Увеличение проницаемости слоя торфа приводит к уменьшению сопротивления слоя инертного материала, вследствие чего повышается расход воздуха. Увеличение расхода воздуха приводит к возрастанию скорости фронта и температуры горения торфа.

Газообразные продукты горения торфа в условиях естественной конвекции воздуха содержали в основном CO, CO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>. С ростом размера частиц торфа от 2.5 до 8.5 мм (проницаемость слоя торфа менялась от 13000 до 53000 Д) содержание CO<sub>2</sub> увеличивается от 4.1 до 10.4 об.%, CO увеличивается от 7.8 до 14.7 об.%, а содержание O<sub>2</sub> уменьшается от 16.1 до 5.8 об.%; содержание метана

**Таблица 2.** Концентрация газообразных продуктов, максимальная температура и скорость фронта горения различных фракций торфа

Размер частиц, мм	Состав газообразных продуктов, об.%					$V_{comb}$ , мм/ч	$T_{max}$ , °C
	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>		
2.5	4.1	16.1	7.8	0.1	0.2	8	489
4.0	6.1	13.9	8.6	0.2	0.5	18	584
6.0	8.8	10.1	9.9	0.3	1.0	23	713
8.5	10.4	5.8	14.7	0.5	2.2	81	866

увеличивается от 0.1 до 0.5 об.%, а водорода – от 0.2 до 2.2 об.%.  
Часть анализов выполнялась на оборудовании АЦКП ИПХФ РАН.

Исследование выполнено в рамках госзадания (номер государственной регистрации АААА-А19-119022690098-3).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kulesh R.N., Orlova K.Y.* // MATEC Web of Conferences. 2016. V. 72. P. 01055; <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167201055>
2. *Наумова Л.Б., Егорова Л.А., Сливинская А.А.* // ЖПХ. 2006. Т. 79. № 2. С. 237.
3. *Vershinina K.Y., Shlegel N.E., Strizhak P.A.* // Energy. 2019. V. 183. P. 1266; <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.031>
4. *Гришин А.М., Якимов А.С.* // Инж.-физ. журн. 2008. Т. 81. № 1. С. 191.
5. *Thompson D.K., Wotton B.M., Waddington J.M.* // Intern. J. Wildland Fire. 2015. V. 24. № 1. P. 120; <https://doi.org/10.1071/WF12121>
6. *Kasymov D., Agafontsev M.* // AIP Conf. Proc. 2016. V. 1772. P. 060004.
7. *Page S.E., Siegert F., Rieley J.O. et al.* // Nature. 2002. V. 420. P. 61; <https://doi.org/10.1038/nature01131>
8. *Poulter B., Christensen J., Norman L. et al.* // J. Geophys. Res. Atmos. 2006. V. 111. Issue D6. D06301; <https://doi.org/10.1029/2005JD006455>
9. *Kim Y.H., Tong H., Daniels M. et al.* // Part. Fibre Toxicol. 2014. V. 11. P. 29; <https://doi.org/10.1186/1743-8977-11-29>
10. *Ohlemiller T.* // Prog. Energy Combust. Sci. 1985. V. 11. P. 277; [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(85\)90004-8](https://doi.org/10.1016/0360-1285(85)90004-8)
11. *Huang X., Rein G.* // Combust. and Flame. 2014. V. 161. P. 1633; <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.12.013>
12. *Тереза А.М., Агафонов Г.Л., Андержанов Э.К. и др.* // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 8. С. 58.
13. *Кислов В.М., Салганский Е.А., Цветков М.В. и др.* // ЖПХ. 2017. Т. 90. № 5. С. 579.
14. *Тереза А.М., Андержанов Э.К.* // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 8. С. 58; <https://doi.org/10.1134/S0207401X19080120>
15. *Lutsenko N.A.* // Combust. Theory Model. 2018. V. 22. № 2. P. 359; <https://doi.org/10.1080/13647830.2017.1406617>
16. *Salgansky E.A., Zaichenko A.Y., Podlesniy D.N. et al.* // Intern. J. Hydrogen. Energy. 2020. V. 45. P. 17270; <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.177>
17. *Кришеник П.М., Костин С.В., Озерковская Н.И. и др.* // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 2. С. 45; <https://doi.org/10.1134/S0207401X19020092>
18. *Салганский Е.А., Фурсов В.П., Глазов С.В. и др.* // Физика горения и взрыва. 2006. Т. 42. № 1. С. 65.
19. *Цветков М.В., Подлесный Д.Н., Фрейман В.М. и др.* // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 8. С. 51; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20080142>
20. *Muraleedharan T.R., Radojevic M., Waugh A. et al.* // Atmos. Environ. 2000. V. 34. P. 3033; [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00512-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00512-9)
21. *Christian T.J., Kleiss B., Yokelson R.J. et al.* // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № 23. P. 4719; <https://doi.org/10.1029/2003JD003704>
22. *Rein G., Cohen S., Simeoni A.* // Proc. Combust. Inst. 2009. V. 32. P. 2489; <https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.07.008>
23. *Fire Phenomena and the Earth System* / Ed. Belcher C.M. Chichester, UK: Wiley & Sons, 2013. P. 15; <https://doi.org/10.1002/9781118529539.ch2>