

**О МЕТОДИКЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПАРАМЕТРОВ В ЗОНЕ ЛЕСНОГО ПОЖАРА***А. М. Гришин, А. Н. Голованов, В. Г. Смирнов**Томский государственный университет,
634050 Томск*

Предложен способ частичного воспроизведения низовых и верховых лесных пожаров, который обеспечивает повторяемость экспериментальных измерений характеристик лесных пожаров. Дан набор методик и приборов для экспериментального измерения физических и химических характеристик лесных пожаров.

Задача полноценного экспериментального исследования распространения фронта лесного пожара в натуральных условиях неразрешима вследствие плохой воспроизводимости результатов измерений, большой зависимости параметров горения от внешних факторов, таких, как скорость и направление ветра, влажность воздуха и влагосодержание лесного древостоя, температура и атмосферное давление воздуха, амплитудно-частотные характеристики пульсаций скорости ветра, неоднородности почвенного покрова и древостоя. В то же время полное моделирование такого сложного процесса, как лесной пожар, в лабораторных условиях невозможно и из-за неодинаковости определяющих критериев подобия, обусловленной неравновесными физико-химическими процессами (сушкой и пиролизом лесных горючих материалов) и горением газообразных и конденсированных продуктов пиролиза [1]. В данной статье для получения удовлетворительной воспроизводимости результатов измерений, выявления наиболее существенных по степени влияния факторов применяется методика частичного физического воспроизведения лесных пожаров в полунатурных условиях полигона [2, 3].

На процесс распространения фронта лесного пожара наиболее существенно влияют характеристики приземного слоя атмосферы: скорость ветра V , его направление α , степень турбулентности ветра, влажность W , температура t и давление p воздуха. Влияние типа и плотности древостоя на распространение фронта пожара исследовалось в работе [2].

Иногда для «создания» ветра используют аэродинамические трубы [4]. Однако этот способ обладает существенными недостатками, обусловленными технологической сложностью проведения экспериментов и, самое главное, невозможностью полного моделирования в аэродинамических трубах атмосферной турбулентности и процессов горения лесных горючих материалов (ЛГМ). Поэтому в данной работе для исследования распространения фронта лесного пожара используют искусственно созданные лесные полосы, расположенные на грунте с подстилкой из травяной ветоши, опавших хвоинок и веток, а для воспроизведения атмосферной турбулентности — натуральный приземной слой атмосферы. К перечисленным достоинствам такого способа моделирования лесного пожара можно добавить возможность контролировать плотность посадки деревьев, состояние подстилки, тип и возраст деревьев.

Распространение по伐льных верховых лесных пожаров (терминология из [1, 4, 5]) экспериментально исследовали на модельных полосах (рис. 1), состоящих из сосен 1, полученных в результате рубок ухода (возраст до

15 лет, высота деревьев $1,5 \div 4,5$ м). Отдельные деревья вкапывались в почву 3 на глубину $(15 \div 20) \cdot 10^{-2}$ м или вставлялись в специальные гнезда

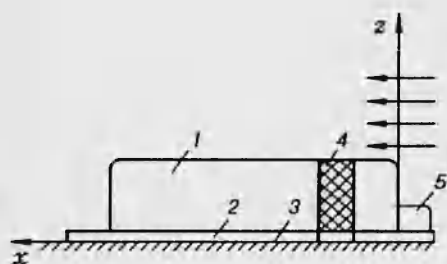


Рис. 1.

из металлических труб, после чего выкладывалась подстилка 2 высотой $(5 \div 10) \cdot 10^{-2}$ м, состоящая из лишайника *Cladonia*, хвои, мелких веток и сухой травы. Фронт повального верхового лесного пожара 4 инициировался из зоны зажигания 5. Стрелки на рис. 1 обозначают направление ветра. На рис. 2 показаны лесная полоса (а) и повальный лесной пожар (б) в ней. При исследовании низовых лесных пожаров моделировался только напочвенный покров, а деревья не вкапывались.

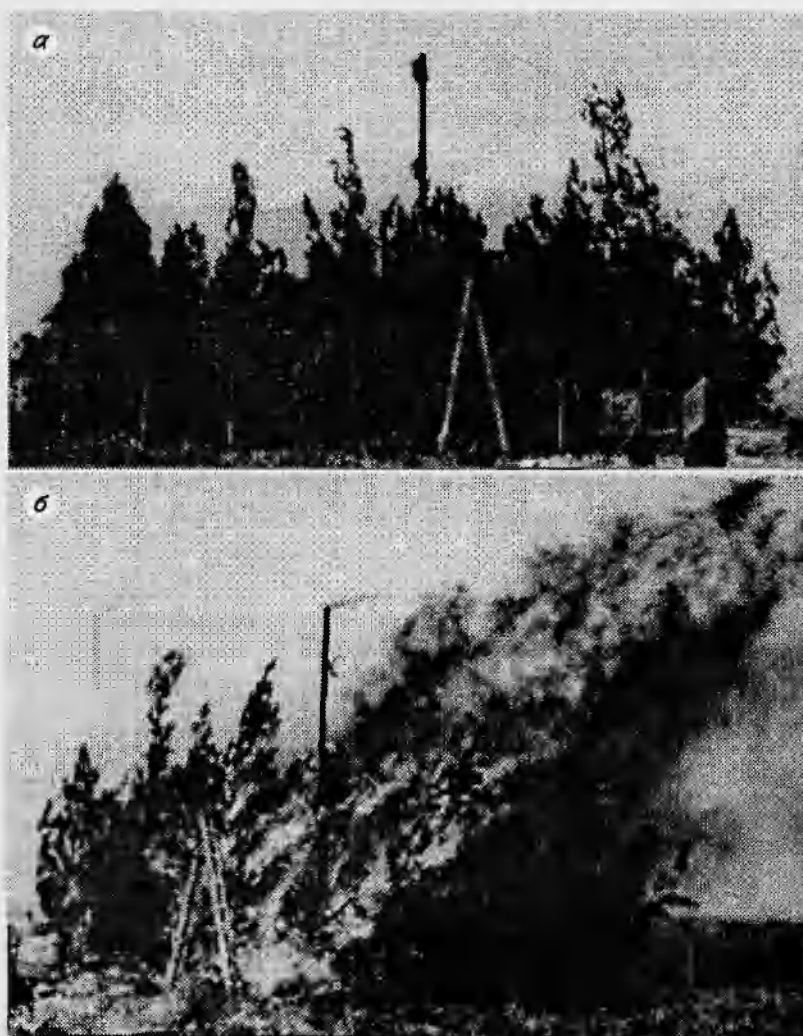


Рис. 2.

Длина и ширина модельных лесных полос выбирались из следующих условий. Длина $L \gg \omega\tau$, где ω — линейная скорость распространения пожара, $\tau \approx 5 \div 10$ с — время формирования устойчивого фронта пожара. Ширина полосы b выбиралась из условия обеспечения одномерного процесса распространения фронта пожара вдоль оси Ox : $b \leq L$, $T|_{y=0} \approx T_{y=-b/2} \approx T_{y=b/2}$, $\partial T/\partial x \gg \partial T/\partial y$, где T — температура фронта пожара, ось Oy лежит в плоскости поверхности грунта и перпендикулярна оси Ox .

Плотность «посадки» деревьев в модельной полосе варьировалась [2] и при организации повальных верховых лесных пожаров соответствовала максимально возможной плотности в сосновых молодняках в натуральных условиях (до 110 деревьев в полосе), расстояние между деревьями $(30 \div 50) \cdot 10^{-2}$ м. Максимальная плотность «посадки» деревьев дает максимально возможные значения тепловых потоков и скоростей распространения фронта пожара в сосновых молодняках. Выбор возраста и породы деревьев не случаен, а обусловлен особой ролью сосновых молодняков в процессе перехода низовых лесных пожаров в верховые. Сосновые молодняки, как правило, служат передаточным звеном при формировании наиболее опасных и губительных для окружающей среды верховых лесных пожаров.

В экспериментах контролировались температура в зоне горения T , плотность суммарного теплового потока q , плотность лучистого теплового потока q_L , скорость высокотемпературного гетерогенного потока в зоне горения v , скорость ветра, направление вектора скорости ветра α , проекции скорости ветра и его пульсации в направлении оси Ox V'_x , влажность воздуха, атмосферное давление p , температура воздуха t , высота пламени H , угол наклона факела к поверхности грунта β , линейная скорость распространения фронта пожара ω , влагосодержание лесных горючих материалов Π , состав и массовая концентрация продуктов горения C_α .

Температура газа в зоне горения определялась приборами ИТ-4К-0,01, выполненными на основе хромель-алюмелевой термопары, с последующим преобразованием сигнала в цифровой код и записью во внутренний блок памяти, хранением и выводом в ЭВМ типа СМ-6000. Рабочая частота датчиков 0,01 Гц, относительная статистическая погрешность $\leq 2,1\%$. Датчики (до 30 шт.) устанавливались на почвенном покрове для регистрации параметров низового пожара, в пологе лесной полосы и над кронами деревьев для фиксации характеристик верхового лесного пожара.

Плотность суммарного теплового потока определялась теплоприемниками ФОА 013-03, работающими на принципе экспоненциального метода определения нестационарных тепловых потоков [6, 7]. Датчики рассчитаны на диапазон $\leq 2,5 \cdot 10^6$ Вт/м², постоянная времени $\leq 0,15$ с, суммарная статистическая погрешность $\leq 10\%$.

Плотность лучистого теплового потока в функции времени определялась водоохлаждаемым приемником ИКАР-4, основанным на методе поглощения лучистой энергии [6] с интегральной поглощательной способностью, равной 0,98. Датчик предназначен для измерения в пределах $0,1 \div 100$ кВт/м², суммарная статистическая погрешность $\leq 9\%$, постоянная времени прибора 1,5 с.

Скорость высокотемпературного гетерогенного потока в зоне пожара определялась пневмометрическим водоохлаждаемым зондом (рис. 3). Датчик сочетает в себе термоанемометрический метод измерения скорости и пневмометрический с «противотоком» [8]. Он состоит из корпуса 11, изготовленного из нержавеющей стали X18H9T, рубашки 10, штуцеров 8, изоляторов 9, термоанемометра 7 (диаметр 20 мкм), системы газо- и водоснабжения: водяного насоса 4, вентиля 2, ротаметров 3 (типа РС, РМ),

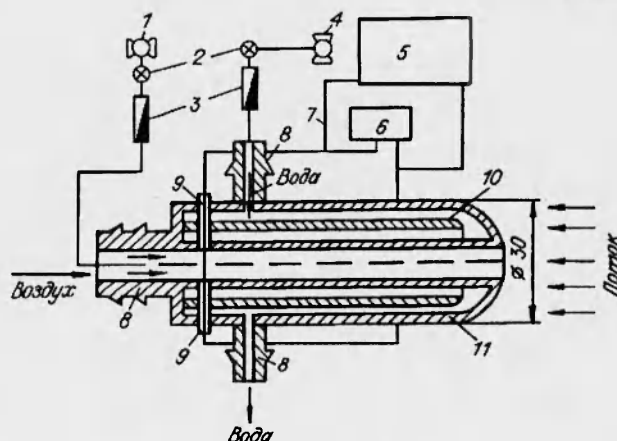


Рис. 3.

компрессора 1, регистрирующего устройства 6 (осциллограф, самописец). Стрелками на рис. 3 показаны воздух, вода и набегающий высокотемпературный гетерогенный поток.

Расход охлаждающей жидкости обеспечивает постоянную температуру среды вблизи нити термоанемометра, что важно для однозначной тарировки прибора и исключения из показаний датчика температурной поправки. Подача воздуха через отверстие в лобовой критической точке навстречу набегающему потоку (в «противоток») обеспечивает защиту нити термоанемометра от проникновения высокотемпературных конденсированных частиц. При изменении скорости внешнего потока давление в окрестности лобовой критической точки изменяется и влияет на расход и скорость воздуха в центральном цилиндрическом канале датчика. Изменение скорости воздуха регистрируется нитью термоанемометра. Датчики скорости гетерогенного потока имеют постоянную времени $\leq 0,22$ с, время установления показаний $\leq 0,52$ с, предел измерений скорости $0,4 \div 6,5$ м/с, суммарную статистическую погрешность не более 5,9 %, температура внешней среды < 1200 К.

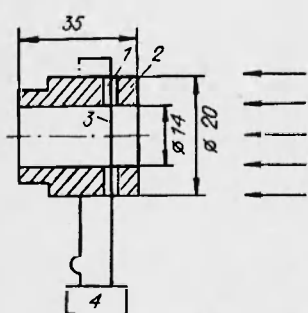


Рис. 4.

Проекцию скорости ветра как функцию времени определяли термоанемометрическим датчиком (рис. 4), состоящим из корпуса 2, изоляторов 1, вольфрамовой нити термоанемометра 3 (диаметр 20 мкм), регистрирующего устройства 4. Стрелками обозначено направление ветра. Датчики скорости ветра имеют постоянную времени $\leq 0,08$ с, время установления показаний $< 0,12$ с, предел измерений скорости ветра $0,2 \div 7,4$ м/с, суммарная статистическая погрешность 5,6 %.

Средние значения скорости и направления ветра, влажности и температуры воздуха и атмосферного давления определяли стандартными метеорологическими приборами, крыльчатыми анемометрами в комплекте с блоком М63М-1, психрометром аспирационным МВ-4М, барометром-анероидом БАММ-1.

Высоту пламени, угол наклона факела к поверхности грунта, линейную скорость распространения фронта пожара находили по результатам киносъемки процесса горения (кинокамера типа АКС). Значения ω вычисляли также по результатам обработки зависимостей температуры в зоне

горения от времени. Величины H и β находили непосредственным измерением спроецированного на экран изображения распространения фронта пожара. Суммарные относительные погрешности: $\delta_\omega \leq 10\%$, $\delta_H \leq 10\%$, $\delta_\beta \leq 10\%$.

Влагосодержание лесных горючих материалов $\pi = (m_0 - m_t)/m_0$ рассчитывали по результатам взвешивания масс влажной m_0 и высушенной при температуре 372 К хвой m_t . Суммарная статистическая погрешность не превышала 2,1 %.

Химический состав, концентрации продуктов горения определяли хроматографом Chrom-5 методом нормировки произведений высоты пика компонента на хроматограмме на время удерживания пробы [9]. Пробы анализировали на содержание O_2 , N_2 , CH_4 , CO_2 , C_xH_y .

Пробы из зоны лесного пожара при заданной температуре газа отбирали специальным устройством (рис. 5). Отборник проб состоит из цилиндрической емкости 5, изготовленной из лабораторного стекла, поршня 6, иглы 15, штока 7, поджимных муфт 1, пробки 2, шпилек 3, пружины 8, стопора (нихромовая проволока) 9, керамического корпуса 11, асбоцементного порошка 10, термопары в электротермоизоляционном чехле 14, потенциометра 13, кнопки 12. При достижении заданной температуры газа (контролируется термопарой

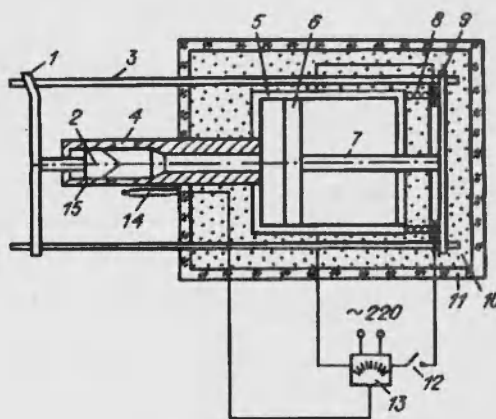
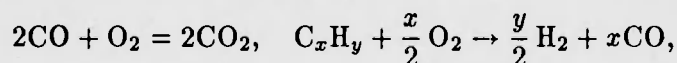


Рис. 5.

и регистрируется потенциометром) кнопка замыкает электрический контур, связанный со стопором. Последний перегорает, освобождая пружину, которая перемещает муфты из левого положения в крайнее правое. Поршень и пробка, связанные жестко штоком с муфтами, также перемещаются из левого положения в крайнее правое. Через отверстия 4 и внутренний канал иглы в цилиндрическую емкость поступает исследуемый газ. Пробка, перемещаясь в крайнее правое положение, герметично закупоривает цилиндрическую емкость с отобраным газом. Керамический корпус и асбоцементный порошок обеспечивают тепловую изоляцию отборника проб во время его эксплуатации в зоне лесного пожара.

Для получения химически замороженного состава продуктов пиролиза и горения в зоне лесного пожара необходимо выполнение следующих условий, предъявляемых к отборнику проб: 1) число Дамкеллера $Da = t_m/t_x \gg 1$ (t_m , t_x — характерные времена отбора проб и химических реакций), 2) снижение температуры газа за время отбора до нормальной, 3) стенки сосуда для хранения проб должны иметь малую каталитическую активность, 4) герметичное хранение проб.

Для выполнения первого условия оценивали характерные скорости химических реакций $R = 1/t_x$ по формулам [3]



$$R_{C_xH_y} = -3 \cdot 10^8 \exp \left(-\frac{10^4}{T} \right) \rho M_{C_xH_y} n_{C_xH_y} n_{O_2},$$

$$R_{CO} = -7,05 \cdot 10^6 C_{CO} \exp \left(-\frac{11500}{T} \right),$$

где ρ — плотность; n , c — молярная и массовая концентрации; $t_x \approx 0,1$ с. Для используемых отборников проб $t_m \leq 0,008$ с (определено частотомером от момента подачи сигнала до момента касания поршнем дна корпуса).

Для выполнения второго условия рассчитывали геометрические размеры иглы, обеспечивающие охлаждение пробы до нормальной температуры. Малая каталитическая активность стенок достигалась использованием меди и лабораторного стекла в качестве материалов отборника проб. Герметичность проверяли заполнением камеры водой и ее длительным хранением.

Суммарная статистическая погрешность определения концентраций не превышала 2 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин А. М. Математические модели лесных пожаров. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1981.
2. Гришин А. М., Плюхин В. В. Экспериментальное исследование фронта верхового лесного пожара // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 1. С. 21–26.
3. Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992.
4. Rothel R. C. Airflow characteristics wind tunnels and combustion facilities / Northern Forest Fire Laboratory. Montana, Missoula: Intermountain Forest and Range Exper. Station Forest Service, 1967.
5. Курбатский Н. П. Классификация лесных пожаров // Вопросы лесоведения: Сб. науч. тр. / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т леса и древесины, 1970. С. 384–407.
6. Осипова В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. М.: Энергия, 1979.
7. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы. М.: Энергия, 1973.
8. Леончик Б. И., Малкин В. П. Измерения в дисперсных потоках. М.: Энергоиздат, 1981.
9. Никитин Н. И. Химия древесины и целлюлозы. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1972.

Поступила в редакцию 27/IV 1994 г.,
в окончательном варианте — 2/XI 1994 г.
