

**ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
НИЗОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА**

УДК 533.6.011.6 + 634.0.431

**А. М. Гришин, А. А. Долгов, В. П. Зима, А. В. Исаков\*,  
В. В. Рейно\*, Р. Ш. Цвык\***

**Томский государственный университет, 634050 Томск  
\* Институт оптики атмосферы СО РАН, 634055 Томск**

*Рассмотрены результаты применения тепловизионной методики исследования изменения поля яркостной температуры низовых лесных пожаров в лабораторных условиях. Анализируются динамика некоторых характеристик (скорости движения фронта горения, размеров пламени, полной энергии и др.) и изменения поля яркостной температуры, обсуждается методика установления соответствия между термодинамическими и яркостными температурами.*

Низовые лесные пожары (НЛП) — наиболее распространенный в природе тип лесного пожара. Несмотря на большое количество экспериментальных работ [1–4], посвященных исследованию НЛП, до сих пор не решены вопросы о преобладающем механизме переноса энергии из зоны реакции в свежий горючий материал. Неизвестны точные профили концентраций продуктов горения во фронте пожара, и недостаточно исследованы предельные условия его распространения. Горение лесных горючих материалов (ЛГМ) зависит от их плотности, влажности, начальной температуры, а также от влажности и температуры окружающей среды, скорости и направления ветра, угла наклона рельефа местности к горизонту и т. д.

Изучение НЛП в натуральных крупномасштабных экспериментах затруднено из-за плохой воспроизводимости результатов и большой зависимости параметров горения от внешних факторов. В основном эта проблема решается с помощью лабораторных устройств, позволяющих с некоторыми допущениями частично моделировать условия возникновения и распространения НЛП. Так, в работах [1–4] описаны установки для физического моделирования НЛП в специализированных аэродинамических трубах. Однако этот способ имеет неустранимый недостаток, обусловленный тем, что реальный процесс горения ЛГМ в открытом пространстве моделируется как горение ЛГМ в полузамкнутом пространстве, в котором проводятся опыты. Замкнутость пространства в специализированных аэродинамических трубах приводит к изменению температуры и состава среды и влияет на поля скоростей фронта пожара в результате изменения силы тяги в зоне НЛП. Тем не менее экспериментальные работы по изучению пожаров в лабораторных условиях продолжают. При этом создаются новые лабораторные установки [5], позволяющие расширить диапазон исследований горения ЛГМ с более точным приближением к реальным условиям. В отличие от полунатурных исследований [6] лабораторные работы можно проводить круглый год с меньшими материальными затратами.

В данной статье рассматриваются вопросы методики экспериментального определе-

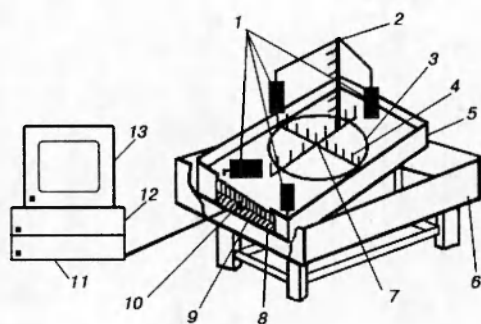


Рис. 1. Лабораторная установка для физического моделирования низовых лесных пожаров:

1 — датчики тепловых потоков; 2 — вертикальная гребенка термопар; 3 — контур низового лесного пожара; 4 — координатная сетка; 5 — стол-полигон; 6 — прямоугольный ящик; 7 — место иницирования пожара; 8 — слой грунта; 9 — слой ЛГМ; 10 — коммуникационные линии; 11–13 — автоматизированная система регистрации

ния температурных полей при движении фронта НЛП по модельной полосе ЛГМ термопарным и тепловизионным методами и обсуждаются некоторые физические результаты. Описываются экспериментальная установка и методики проведения экспериментов.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДОВ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследования проводили на лабораторной установке по физическому моделированию НЛП (рис. 1), которая размещалась в помещении объемом  $200 \text{ м}^3$  ( $10 \times 8 \times 2,5 \text{ м}$ ), оборудованном вытяжной вентиляцией (открытой во время проведения эксперимента). Если массовая скорость генерации газообразных и дисперсных продуктов сгорания в результате распространения низового лесного пожара меньше скорости их отвода через систему вентиляции, то состав среды, окружающей фронт лесного пожара, не отличается от того, который имеет место при реальных слабых низовых лесных пожарах (терминология из [7, 8]). Установка состоит из прямоугольного ящика 6 размером  $1,52 \times 1,00 \times 0,30 \text{ м}$ , который служит основанием, и стола-полигона 5. Стол-полигон можно устанавливать под разными углами к горизонту ( $0 < \alpha < 45^\circ$ ), что дает возможность моделировать распространение пожара на гористой местности. На поверхность стола-полигона 5, имеющего размеры  $1,30 \times 0,75 \times 0,20 \text{ м}$ , насыпан слой грунта 8 толщиной  $0,1 \text{ м}$ , на который, в свою очередь, укладывается слой ЛГМ 9. Толщина слоя ЛГМ  $h$  и его состав меняются в зависимости от условий и задач эксперимента. Эта величина не должна превышать  $0,05\text{--}0,07 \text{ м}$ , поскольку в этом случае высота факела пламени слабого НЛП не превышает  $0,5 \text{ м}$  и в лабораторных условиях воспроизводятся реальные условия распространения слабых НЛП.

Установка позволяет проводить исследования динамики распространения низового лесного пожара от точечного источника зажигания в отсутствие и при наличии ветра, который имитируется воздушным потоком от вентилятора. Кроме того, на ней можно изучать структуру плоского фронта НЛП. В этом случае зажигание ЛГМ производится с помощью линейного источника нагрева (нить накаливания). Для регистрации положения контура НЛП и профилей температуры в грунт стола-полигона внедрена координатная сетка 4 (размер ячейки  $0,1 \times 0,1 \text{ м}$ ), в узлах которой размещаются 80 хромель-алюмелевых термопар 2 (диаметр  $\sim 200 \text{ мкм}$ ). Термопары могут размещаться и по высоте слоя ЛГМ, что позволяет определять профили температур по глубине слоя ЛГМ, скорость и направление распространения фронта НЛП. С помощью термопар фиксируется также распределение температур в вертикальной плоскости в зоне факела пламени. Для измерений используются восемь хромель-алюмелевых термопар с шагом  $8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ . Конструкция установки позволяет также определять плотность тепловых потоков (суммарного и лучистого)

с помощью датчиков нестационарного типа 1 [6]. Датчики могут устанавливаться в зоне действия пожара и на некотором удалении от него. Все кабельные коммуникационные линии 10 экранируются грунтом и асботканью. Зажигание ЛГМ осуществляется от точечного либо линейного источника тепла в зависимости от решаемых экспериментальных задач. Регистрация ЭДС термопарных датчиков осуществляется автоматизированной системой регистрации 11–13 на базе РС IBM. Компьютер 11 с помощью рабочей программы «Ројаг» обеспечивает управление работой автоматизированной системы регистрации: проводит непрерывный контроль и регистрацию ЭДС 99 термопарных датчиков с последующим хранением информации в памяти ЭВМ. Рабочая программа позволяет оператору произвольно задавать количество опрашиваемых термопар. Относительная погрешность измерения температур определялась по стандартной методике и не превышала 2,5 %.

В ходе экспериментов с использованием тепловизора определялась динамика изменения яркостных температур модельного низового пожара в пространстве и времени. В исследованиях использовался автоматизированный тепловизионный комплекс, состоящий из тепловизора АГА-780, работающего в диапазоне длин волн  $\lambda = 3 \div 5$  мкм, специального программируемого блока «Термик-2» [9] и ЭВМ. Эта система позволяет исследовать динамику тепловых процессов, протекающих с различными скоростями. Регистрация информации производилась по кадрам. Кадр представляет собой тепловизионный снимок процесса распространения фронта НЛП в данный момент времени. Максимальное число точек в кадре  $100 \times 100$  (100 точек в строке, 100 строк в кадре). Регистрируемая область составляла  $1 \times 1$  м и соответствовала рабочей части стола-полигона. Поэтому в каждом кадре регистрировалось поле яркостной температуры в данный момент времени, а последовательная запись кадров с интервалом времени  $\Delta t$  позволяла исследовать динамику процесса горения на всей поверхности стола-полигона. Время регистрации одного кадра составляет 0,04 с, а интервал времени  $\Delta t$  программируется от 0 до 10 с за счет пропуска кадров от 0 до 256. В данных измерениях это время составляло 1,2–2 с. Ряд измерений проводился в условиях, когда регистрировался не весь кадр, а только его часть — «окно» размером  $90 \times 90$  точек, представляющее интерес для исследователя. Такой режим позволяет увеличить количество кадров (общее время регистрации) без потери информации по времени и разрешающей способности по пространству. При обработке зарегистрированных кадров компьютерная программа позволяет оператору выбрать для анализа любой прямоугольный участок кадра («окно», совокупность «окон» — «фрагмент»), увеличить его, определить амплитуду сигнала и т. п. Для определения пространственного масштаба изображения использовалась нагретая металлическая пластина известного размера, изображение которой фиксировалось тепловизором. В обсуждаемых экспериментах расстояние между соседними точками по вертикали и горизонтали составляло  $11,2 \cdot 10^{-3}$  м. Расстояние от чувствительного элемента тепловизора до центра очага горения 6 м. Отсутствие отработанной методики калибровки системы по пламени не позволило на данном этапе провести абсолютные измерения. Поэтому результаты температурных измерений приведены в некоторых относительных единицах, которые пропорциональны абсолютным температурам [10]. Преимущество тепловизионного метода исследования распределения температуры заключается в его дистанционности, высоком пространственном и временном разрешении, а также в возможности автоматизации обработки информации.

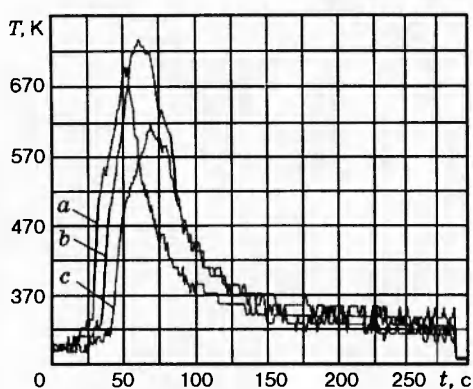


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость температуры от времени для низового лесного пожара

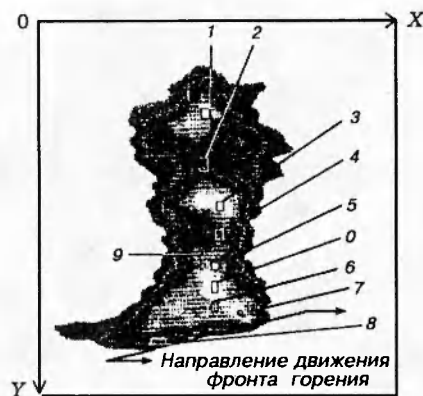


Рис. 3

Рис. 3. Фрагмент типичного кадра пламени низового лесного пожара

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ

Исследовалось горение опада хвои кедра с влажностью до 15 %, массой 0,2 кг, с запасом ЛГМ в слое  $m_3 = 0,21 \text{ кг/м}^2$  и высотой слоя  $h = 0,02 \text{ м}$ . Как показал анализ результатов экспериментов, через 10–12 с после зажигания слоя ЛГМ глубиной 0,02 м размеры фронта пламени стабилизируются и имеют толщину 0,04 м и длину 0,80 м, что сравнимо с шириной стола-полигона. Высота факела пламени  $h_{\text{п}} = 0,15 \text{ м}$ . В соответствии с классификацией [8] реализуется слабый низовой пожар.

На рис. 2 приведены характерные изменения температур, которые измеряли тремя термопарами (a, b, c), установленными с шагом 0,1 м в горизонтальном направлении, совпадающем с направлением распространения НЛП. Термопары размещали на высоте 0,15 м от грунта. Наблюдается существенный разброс показаний термопар, что, по-видимому, связано с флуктуациями факела фронта горения из-за неоднородности слоя ЛГМ. Поэтому спай термопар не всегда точно попадает в зону пламени, что и сказывается на результатах замеров. Как показали эксперименты, устойчивый процесс зажигания и горения ЛГМ наблюдается при влажностью, не превышающей 15 %. Это предельный случай горения ЛГМ по влажностью. Кроме того, горение прекращается при  $h < 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и  $m_3 < 5,2 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^2$ . Это объясняется тем, что тепловые потери от фронта пламени превышают тепловыделение, обусловленное горением ЛГМ.

На рис. 3 в качестве примера приведен фрагмент кадра (часть одного кадра, в котором выделена область горения в момент регистрации), а также выделены окна (0–9) в основных областях поля температур горящего материала и пламени. В табл. 1 приведены результаты обработки информации:  $X_0, Y_0$  — координаты левого верхнего угла выделенного оператором окна относительно начала кадра,  $\Delta x, \Delta y$  — размеры этого окна,  $I_{\text{мин}}, I_{\text{макс}}, I_{\text{ср}}$  — минимальная, максимальная и средняя яркостные температуры в этих окнах,  $\Delta I$  — разность температур между данным окном и нулевым, выбранным в точке максимальной яркостной температуры. Положение окна 9 соответствует положению одной из

Таблица 1

Номер окна	$X_0$ $Y_0$	$\Delta x$ $\Delta y$	$I_{\text{мин}}$ $\Delta I$	$I_{\text{макс}}$ $\Delta I$	$I_{\text{ср}}$ $\Delta I$	Номер окна	$X_0$ $Y_0$	$\Delta x$ $\Delta y$	$I_{\text{мин}}$ $\Delta I$	$I_{\text{макс}}$ $\Delta I$	$I_{\text{ср}}$ $\Delta I$
0	33,34 74,61	1,89 2,57	139,51	150,67	147,56	5	33,49 69,49	1,89 2,14	86,58 -52,93	107,31 -43,36	101,11 -46,45
1	27,25 80,58	1,89 2,14	40,00 -99,51	106,37 -44,30	74,67 -72,89	6	33,78 65,64	1,89 2,14	116,45 -23,06	150,11 -0,56	141,18 -6,38
2	37,05 77,31	1,89 2,14	46,47 -93,04	127,77 -22,90	89,89 -57,67	7	32,15 61,23	1,89 2,57	64,34 -75,17	90,45 -60,22	78,58 -68,98
3	33,34 77,17	1,89 2,14	121,57 -17,94	142,76 -7,91	130,32 -17,24	8	32,30 55,40	1,89 2,14	119,66 -19,85	139,17 -11,50	134,03 -13,53
4	33,34 72,47	1,89 2,14	114,18 -25,33	142,89 -7,78	-129,95 -17,61	9	31,41 71,76	1,89 2,14	87,94 -51,57	111,14 -39,53	103,31 -44,25

термопар в факеле пламени. Тепловизор был установлен так, чтобы частично регистрировался передний фронт горения, который хорошо виден между окнами 7 и 8. На рисунке зарегистрирован момент, когда произошел отрыв двух частей пламени от основного ядра горения. Причем максимальная температура в этих частях (окна 1 и 3) мало отличается от температуры в основном ядре. В местах разрыва (окна 2, 4) температура значительно ниже максимальной. В отдельные моменты времени температура в оторвавшейся части пламени выше, чем в основном ядре. Температура поверхности после прохождения фронта горения значительно ниже, что видно по слабому тепловому следу.

На рис. 4 представлено тепловизионное интегральное (суммарное по всем зарегистрированным кадрам) изображение процесса от начала поджига до окончания горения. На нем четко видны неоднородность процесса горения (высота пламени, распределение яркостной температуры) и наличие низкочастотной составляющей изменения процесса во времени. На рисунке отмечены десять точек в характерных областях поля яркостной температуры пламени и зоны горения ЛГМ, а в табл. 2 приведены числовые характеристики процесса в этих точках:  $X, Y$  — горизонтальная и вертикальная координаты относительно левого верхнего угла кадра,  $I$  — значения, пропорциональные яркостной температуре,  $\Delta I$  — разность этих температур относительно точки 0. Из данных следует, что в среднем область максимальной температуры находится вблизи поверхности горения ЛГМ (светлые области типа точки 0 на рис. 4).

Пример специальной обработки результатов одной из серий измерений приведен на рис. 5. По горизонтальной оси отложены время в секундах (нижняя шкала) и номер кадра

Таблица 2

Номер окна	$X$	$Y$	$I$	$\Delta I$	Номер окна	$X$	$Y$	$I$	$\Delta I$
0	61,01	77,77	251,50	—	5	59,98	63,76	80,93	-170,57
1	58,26	50,73	21,47	-230,03	6	59,98	65,97	117,39	-134,11
2	58,26	53,68	34,38	-217,12	7	59,29	68,68	140,16	-111,34
3	60,32	59,83	55,61	-195,89	8	60,32	71,38	155,43	-96,07
4	59,98	61,79	72,48	-179,02	9	54,14	78,27	178,91	-72,59

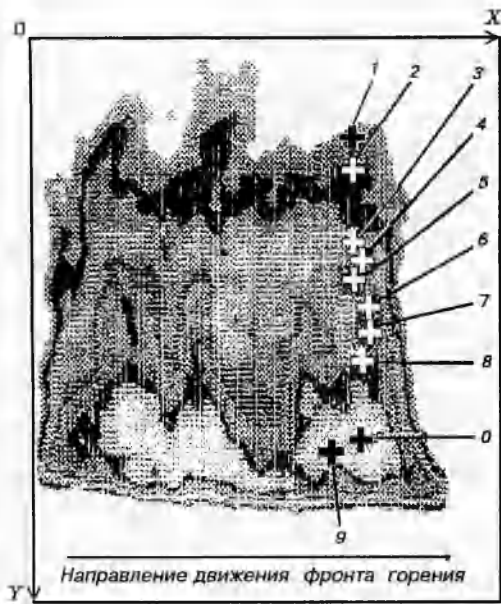


Рис. 4

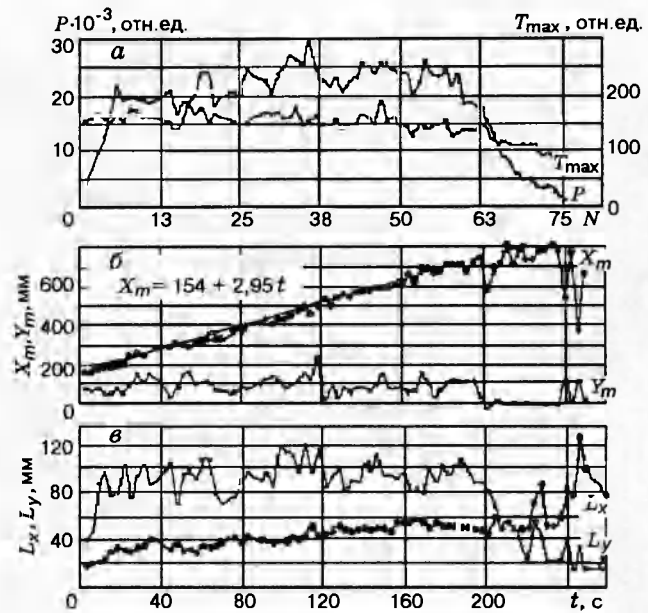


Рис. 5

Рис. 4. Тепловизионное интегральное изображение (совокупность кадров) процесса горения

Рис. 5. Пример обработки параметров пламени, полученных тепловизионным методом измерений:

*a* — изменение во времени полной энергии  $P$  и максимальной температуры  $T_{\max}$  очага низового лесного пожара; *б* — изменение во времени горизонтальной  $X_m$  и вертикальной  $Y_m$  координат точки с максимальной температурой пламени низового лесного пожара; *в* — изменение во времени среднеквадратичных (эффективных) размеров пламени низового лесного пожара по горизонтали  $L_x$  и вертикали  $L_y$

$N$  (верхняя шкала; время между кадрами 3,2 с).

На рис. 5, *a* приведены графики величин, пропорциональных полной энергии излучения  $P$  от очага НЛП и безразмерной максимальной температуре  $T_{\max}$  в зависимости от времени  $t$ . Полная энергия определялась как суммарная интенсивность излучения всей области пожара в диапазоне длин волн  $3 \div 5$  мкм за время 0,04 с. Из графиков видно, что полная энергия, выделившаяся в очаге пожара, нарастает в течение 10–30 с, затем стабилизируется и уменьшается по окончании горения. Это согласуется с результатами работы [7]. В отличие от полной энергии безразмерная максимальная температура устанавливается быстрее и в то же время быстрее уменьшается при потухании ЛГМ. Максимальная температура изменяется в пределах 100–200 отн. ед., а средняя температура во время горения 150 отн. ед. Когда использовалась хвоя, пролежавшая в сухом помещении более 1,5 лет, эти изменения составляли 150–180 при среднем значении 160 (1053 К). Причем полная энергия горения и максимальная температура флуктуируют во времени с периодом от нескольких до десятков секунд и амплитудой  $\sim 10\text{--}20\%$ .

На рис. 5, *б* приведены горизонтальная  $X_m$  и вертикальная  $Y_m$  координаты точки максимальной температуры пламени как функции от времени. По форме зависимости  $X_m$  от времени можно определить закон движения фронта и его среднюю скорость. В рассматри-

ваемом примере это уравнение, полученное методом наименьших квадратов, имеет вид

$$X_m = 154 + 2,95t; \quad r = 0,99,$$

где  $r$  — коэффициент корреляции,  $t$  — время, с.

Скорость движения фронта для высушенной осенней хвой составляет  $(2,5 \div 3,0) \cdot 10^{-3}$  м/с, для хвой, пролежавшей более 1,5 лет,  $\sim 4,2 \cdot 10^{-3}$  м/с. Вертикальная координата максимальной температуры колеблется в пределах 0,2 м и в данном эксперименте имеет небольшое смещение вниз, связанное с положением тепловизора. Следует отметить, что область максимальной температуры расположена вблизи поверхности, однако температура в отдельных областях горящих газов в пламени близка к максимальной. Например, в окне 3 (см. рис. 4), расположенном на 0,1 м выше нулевого окна, температура близка к максимальной, а в окне 1, расположенном выше на 0,215 м, температура ниже всего на 10 %.

На рис. 5, 6 приведены среднеквадратичные (эффективные) размеры пламени по горизонтали  $L_x$  и вертикали  $L_y$ . Они соответствуют размеру прямоугольника, полная энергия в котором равна полной энергии пламени, а температура равна максимальной. Из рисунка видно, что толщина фронта горения составляет  $\sim 0,04$ – $0,06$  м и изменяется незначительно, а высота пламени вносит основной вклад в изменение полной энергии горения и ее флуктуации существенны.

### О СВЯЗИ МЕЖДУ ЯРКОСТНОЙ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРАМИ

Представляет интерес связь между яркостной температурой  $T_\lambda$  и абсолютной термодинамической температурой  $T$ , определяемой с помощью термопар. Этот вопрос обсуждался в [10], где предложена следующая формула:

$$T = T_\lambda \left( 1 + \frac{a(\lambda)T_\lambda}{1 - a(\lambda)T_\lambda} \right). \quad (1)$$

Здесь  $a(\lambda)$  — эмпирическая постоянная, зависящая от длины волны и спектрального коэффициента черноты лесного пожара.

Если  $T_\lambda$  и  $T$  известны для некоторого момента времени  $t_*$ , то эмпирическую постоянную можно найти по формуле:

$$a_* = 1/T_{\lambda*} - 1/T_*, \quad T_* = T(t_*), \quad T_{\lambda*} = T_\lambda(t_*), \quad (2)$$

где  $T_*$  и  $T_{\lambda*}$  — значения термодинамической и яркостной температур в момент времени  $t_*$ .

После этого, казалось бы, можно найти значения абсолютной температуры для других значений времени, если известны соответствующие значения  $T_\lambda$ . Но на самом деле значение  $T_\lambda$  зависит от геометрического фактора, определяемого оптикой тепловизора [11, 12]. Поэтому количественное определение абсолютной  $T$  невозможно без калибровки тепловизора, которая представляет собой самостоятельную, достаточно сложную процедуру, проводимую с использованием высокотемпературного эталонного излучателя — абсолютно черного тела.

Более простым и перспективным подходом представляются обнаружение и идентификация типов лесных пожаров с помощью зависимости мощности излучения от времени с использованием способа диагностики лесных пожаров, предложенного в [13].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные выше результаты позволяют считать, что создана установка, с помощью которой можно воспроизводить слабые низовые лесные пожары, исследовать структуру фронта лесного пожара и динамику развития очага низового лесного пожара.

Результаты данной работы свидетельствуют о широких возможностях применения тепловизионного метода для исследований процессов горения, которые заключаются в дистанционности, высоком пространственном и временном разрешении, возможности автоматизации обработки информации, наглядности представления результатов исследований. Однако для получения количественных результатов необходимо решить вопрос о калибровке тепловизора. Это позволит сравнить экспериментальные результаты с теоретическими и оценить возможности раннего обнаружения и идентификации очагов пожаров с помощью мультисканерных систем, расположенных на аэрокосмических платформах [14]. Для решения этих вопросов необходимо провести систематические исследование спектрального состава излучения факела пламени низового лесного пожара при горении различных типов ЛГМ и отдельное теоретико-экспериментальное исследование ослабления излучения низового лесного пожара при его прохождении через полог леса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Rothermell R. C. Airflow Characteristics-Wind Tunnels and Combustion Facilities Northern Forest Fire Laboratory. Northern Forest Fire Laboratory. Intermountain Forest and Range Experiment Station Forest Service U. S. Department of Agriculture Missoula. Montana, 1967.
2. Weise D. R. The ups and downs of wall shear-stress // Proc. of the 12th Int. Conf. of Fire and Forest Meteorology; October 26-28, 1993. Jekyll Island, Georgia, 1993. P. 572-578.
3. Weise D. R. A tilting wind tunnel for fire behavior studies // Res. Note PSW-RN-417. Albany, CA: Pacific Southwest Research Station, Forest Service, U. S. Department of Agriculture, 1994.
4. Weise D. R. Modeling wind and slope-induced wildland fire behavior: Dissertation submitted in partial satisfaction on the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Univ. California at Berkeley, 1993.
5. Гришин А. М., Зима В. П. Об экспериментальном исследовании низовых лесных пожаров в лабораторных условиях // Тез. междунар. совещания-семинара «Сопряженные задачи физической механики и экология». Томск, 1994.
6. Гришин А. М., Голованов А. Н., Смирнов В. Г. О методике экспериментального определения параметров в зоне лесного пожара // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 3. С. 3-8.
7. Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992.
8. Указания по обнаружению и тушению лесных пожаров. М.: Гослесхоз, 1976.
9. Доботкин А. А., Исаков А. В., Ильин А. Б. и др. Блок регистрации и ввода информации с тепловизора в ЭВМ «Термик-2» // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7, № 5. С. 673-679.
10. Чистяков С. Ф., Радун Д. В. Теплотехнические измерения и приборы. М.: Высш. шк., 1972.



11. Драгун В. Л., Филатов С. А. Тепловизионные системы в исследованиях тепловых процессов. Минск: Наука и техника, 1989.
12. Вавилов В. П. Тепловизоры фирмы «Инфраметрикс». Томск, 1992.
13. А. с. № 1225584 СССР, МКИ А 62 С 3/02. Способ диагностики лесных пожаров / Гришин А. М., Алексеев Н. А., Грузин А. Д., Голованов А. Н. № 3805077/29-12; Заявл. 25.10.84; Опубл. 23.04.86, Бюл. № 15.
14. Сафронов Ю. Л., Андрианов Ю. Г. Инфракрасная техника и космос. М.: Сов. радио, 1978.

*Поступила в редакцию 25/III 1996 г.,  
в окончательном варианте — 26/VIII 1996 г.*

---