

УДК 502/504:630.432.3

**А. А. ДОЛГОВ**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Московский государственный университет природообустройства»**Д. С. ЦОМАЕВА**Федеральное государственное учреждение  
«Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций  
МЧС России» (Федеральный центр науки и высоких технологий)

## ДИНАМИКА ЯРКОСТНЫХ ТЕМПЕРАТУР НИЗОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В ПРОСТРАНСТВЕ И ВО ВРЕМЕНИ

*Приведены результаты исследования динамики изменения яркостных температур экспериментальных очагов низовых лесных пожаров в пространстве и во времени посредством тепловизионных систем AGA-780 и Inframetric-760. Исследована излучательная способность очага пожара в следующих спектральных интервалах: 3...12; 3...5; 8...12; 3,9; 10,6 мкм.*

*Низовой лесной пожар, лабораторный эксперимент, тепловизионные системы.*

При создании физико-математической модели лесных пожаров, начатой в Томском государственном университете в 1976 году, огромное значение уделялось экспериментальным исследованиям. Уже в 1978 и 1979 годах были проведены первые натурные комплексные экспериментальные исследования механизма возникновения и распространения лесных пожаров и их действия на лесные поселки [1]. В 1980-е годы на севере Томской области (вблизи поселка Куржино) Томским государственным университетом было проведено восемь экспедиций для исследования структуры фронта лесного пожара и механизма его распространения. Многочисленные полунатурные экспериментальные исследования позволили создать банк исходных данных, необходимых для математического моделирования лесных пожаров.

Однако изучение лесных пожаров в натуральных крупномасштабных экспериментах было затруднено из-за плохой воспроизводимости результатов и сильной зависимости параметров горения от внешних факторов. Эту задачу удалось решить с помощью лабораторных устройств, позволяющих с некоторыми допущениями частично воспроизводить

условия возникновения и распространения лесных пожаров.

Вопрос о физическом моделировании аэротермохимических явлений впервые был поднят в работах Б. В. Алексеева и А. М. Гришина [2, 3]. В этих работах утверждается следующее: полное физическое моделирование аэротермохимических явлений невозможно без полного совпадения свойств реального объекта и физической модели. Только выбором размеров модели и условий проведения экспериментов не удастся удовлетворить необходимым и достаточным условиям подобия двух аэротермохимических явлений, которыми являются условия равенства критериев подобия для модели и природы. Поэтому при проведении экспериментальных исследований характеристик низовых лесных пожаров был реализован путь частичного или полного воспроизведения в лабораторных условиях свойств реального явления (низовых лесных пожаров).

На кафедре физической и вычислительной механики Томского государственного университета, а затем в Институте оптики атмосферы Сибирского отделения РАН были разработаны и изготовлены лабораторные установки для

моделирования и исследования различных характеристик низовых лесных пожаров (УНЛП), позволяющие расширить диапазон исследований горения лесных горючих материалов (ЛГМ) с более точным приближением к реальным условиям [4–6]. В отличие от полунатурных исследований лабораторные работы можно проводить круглый год с меньшими материальными затратами [7].

Для исследований энергетических характеристик лесных пожаров на данных установках впервые был применен тепловизионный метод и экспериментально апробированы разработанные методики определения температурных полей при движении фронта низовых лесных пожаров по модельной полосе ЛГМ, коэффициентов эмиссии углекислого газа при горении различных типов лесных материалов, а также минимальных энергий зажигания ЛГМ.

Объектом исследований являлась пламенная зона экспериментального очага низового лесного пожара (ЭОНЛП), моделируемого на установке низовых лесных пожаров.

Посредством тепловизионных установок были проведены исследования динамики изменения яркостных температур ЭОНЛП в пространстве и во времени. В измерениях применяли два типа тепловизионных систем (ТВС): АГА-780 (диапазон длин волн 3...5 мкм), модернизированная в Институте оптики атмосферы СО РАН [8] и предназначенная для исследования динамики тепловых полей; Inframetric-760, калиброванная на измерение температуры по радиационному излучению (длины волн: широкие полосы – 3...5, 8...12, 3...12 мкм, узкие полосы – 3,9; 10,6 мкм), имеющая более широкий диапазон измеряемых яркостных температур и высокую точность, но позволяющая регистрировать только отдельные кадры. Применение динамической системы в тепловизионной системе АГА-780 позволило определить изменение скорости движения фронта пожара, относительную максимальную яркостную температуру и ее координаты, высоту пламени и ряд других характеристик. Скорость движения фронта определяли с интервалом 1...2 с по траектории (координатам) движения точки максимальной яркостной температуры. Такая методика позволяла не только повысить точность нахождения средней скорости по сравнению с

методом термопар, но и определять скорость на отдельных участках движения фронта пожара [7]. При использовании тепловизионной системы на базе Inframetric-760 удалось вычислить абсолютные температуры в указанных спектральных интервалах с использованием закона излучения абсолютно черного тела (АЧТ) при известном коэффициенте излучения тела  $\epsilon$ .

Тепловизионным способом определяли яркостную температуру ЭОНЛП –  $T_{я}$  [4, 9, 8–11], при которой эффективная плотность лучистого потока (терминология из [12]) абсолютно черного тела в интервале рабочего диапазона длин волн тепловизора  $\lambda_1... \lambda_2$  равна эффективной плотности лучистого потока экспериментального очага низового лесного пожара при температуре  $T$  в этом же диапазоне длин волн. Погрешность в определении яркостных температур посредством тепловизионных установок определяли с использованием модели абсолютно черного тела. Такая погрешность составляла 1...2 %.

На рис. 1 приведено изображение распределения яркостной температуры горящего опада кедрового лапника влажностью менее 1 % в спектральном интервале 3...5 мкм с профилем температуры, рассчитанным по закону излучения АЧТ, в вертикальном сечении (вертикальная прямая линия, проходящая через точку максимальной температуры) [11]. На рис. 2 приведены результирующие графики распределения яркостной (радиационной) температуры в различных спектральных диапазонах. Измерения выполнены с помощью тепловизионной системы Inframetric-760 с накоплением (усреднением) по 8 кадрам. Восстановление температуры проводилось по закону излучения АЧТ с коэффициентом излучения  $\epsilon = 1$ .

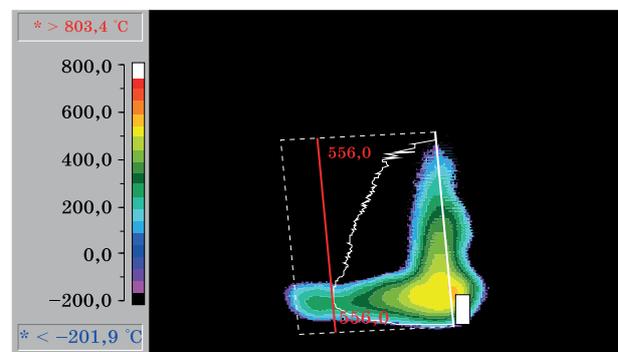


Рис. 1. Распределение яркостной температуры при горении опада кедрового лапника в спектральном интервале 3...5 мкм;  $T_{\max} + 556,0 \text{ } ^\circ\text{C}$

Из рисунка видно, что максимальная яркостная температура  $T_{\max}$  горящего опада, расположенная на поверхности почвы в зоне горения конденсированной фазы, не зависит от спектрального диапазона измерений и составляет 534...560 °С. Данный факт указывает на то, что эта область излучает как абсолютно черное тело.

В области пламени (вертикальные области) яркостная температура, рассчитанная по закону излучения АЧТ, существенно зависит от спектрального диапазона. Наибольшая яркостная температура пламени наблюдается в диапазоне 3...5 мкм (см. рис. 1). В то же время на других длинах волн (3,9; 8...12; 10,6 мкм) излучение пламени очень слабое по сравнению с яркостью горячей подложки. Длина волны 3,9 мкм соответствует минимуму спектральной кривой пропускания излучения в атмосфере между линиями излучения  $\text{CO}_2$  (4,2...4,4 мкм), углеводов (3,1...3,45 мкм) и  $\text{H}_2\text{O}$  (2...3,3 мкм), которые всегда присутствуют в линейчатом спектре несветящегося (без частиц) пламени [9].

Температура пламени быстро уменьшается с высотой факела. Кроме того, в диапазонах 3,9; 8...12; 10,6 мкм через пламя виден горящий опад, что позволяет высказать предположение об ослаблении инфракрасного излучения пламенем вне линий поглощения газов (рис. 2).

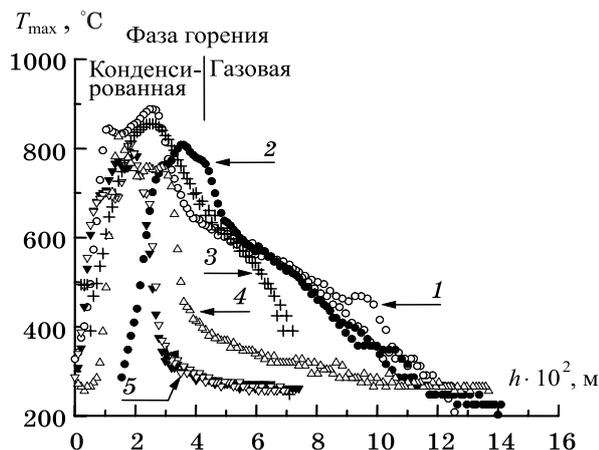


Рис. 2. Распределение по вертикали эквивалентной термодинамической температуры в различных спектральных интервалах: 1 – 3...5; 2 – 3...12; 3 – 8...12; 4 – 10,6; 5 – 3,9 мкм

На рис. 3, 4 приведены результаты измерений динамики относительной температуры  $T_m$  и координаты  $x$  – точки максимальной температуры во времени при горении опада кедр с различным влагосодержанием.

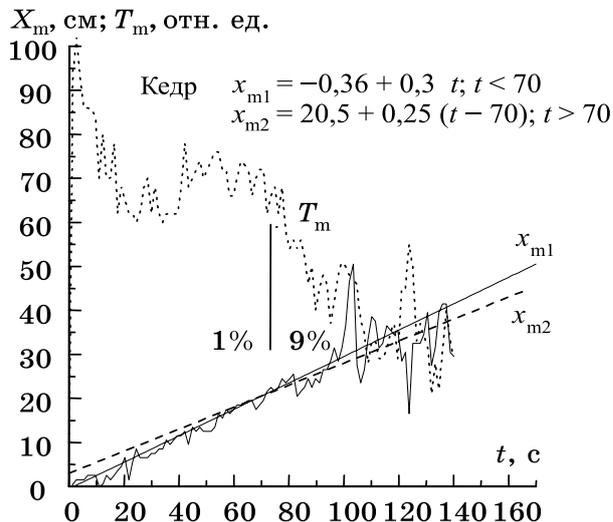


Рис. 3. Горение опада кедр с влагосодержанием  $W = 1$  и 9 %

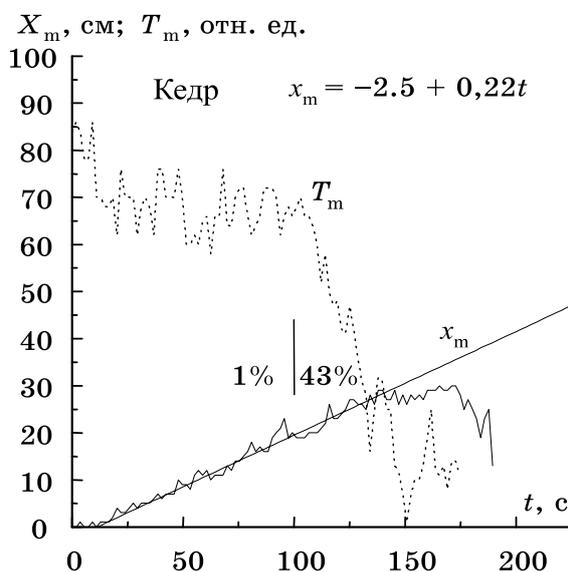


Рис. 4. Горение опада кедр с влагосодержанием  $W = 1$  и 43 %

Масса навесок лесных горючих материалов – 27 г. Навески размещались на двух равных участках размером 0,23 × 0,23 м<sup>2</sup> слой 0,01 м. На первом участке – сухой ЛГМ (влагосодержание – менее 1 %), на втором – ЛГМ с другим влагосодержанием. Скорость движения фронта горения и относительная максимальная яркостная температура на участке с повышенным влагосодержанием уменьшаются. Причем при влагосодержании кедр 43 % относительная максимальная яркостная температура в течение 40 с уменьшилась и горение прекратилось (путь горения – 0,10...0,15 м, см. рис. 4). Отмечено, что скорость движения фронта пожара по краю ЛГМ на втором участке меньше, чем в центре. Это обусловлено меньшим радиационным потоком и замедлением

процесса сушки ЛГМ.

На рис. 5 приведены обобщенные результаты измерения скорости движения фронта горения в зависимости от влагосодержания  $W$  для всех указанных выше видов опада ЛГМ. Пунктирная линия на рисунке – это полуэмпирическая зависимость скорости движения фронта от влагосодержания:  $\omega_p = \omega_0(1 + W)/(1 + 15,8W)$  (при значении скорости движения фронта горения сухого ЛГМ  $\omega_0 = 3 \times 10^{-3}$  м/с) [13]. Сплошная кривая подобрана по экспериментальным данным с использованием экспоненциальной зависимости скорости от влагосодержания:  $\omega = \omega_0 \exp[-W^2/(W - W_0)^2]$  ( $0 < W < W_0$ ). Эта функция дает более слабую зависимость при малых дозах влагосодержания, наблюдаемых в эксперименте, так как влагосодержание ЛГМ быстро уменьшается за счет интенсивной сушки. В то же время эта функция дает быстрое уменьшение скорости движения фронта при  $W$ , близким к  $W_0$ . Естественно ожидать, что, как и  $\omega_0$ , значение  $W_0$  будет зависеть от типа опада ЛГМ, его плотности, запаса, степени разложения.

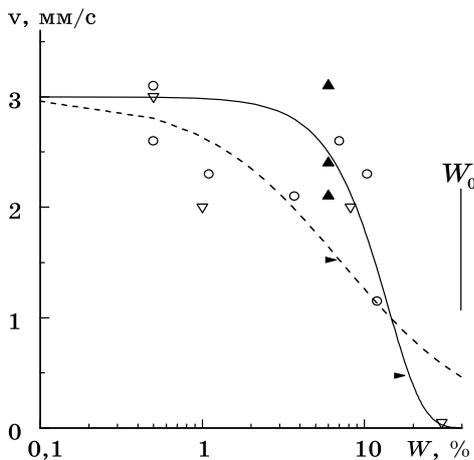


Рис. 5. Зависимость скорости движения фронта горения от влагосодержания ЛГМ: ▲ – береза; ○ – сосна мертвая; ◦ – сосна живая; ▽ – кедр

Максимальные эквивалентные термодинамические температуры, определяли тепловизором Inframetric-760 (предполагалось, что зона горения конденсированной фазы излучает по закону Планка с коэффициентом излучения  $\epsilon = 1$ ).

Проведенные исследования показали, что максимальная температура 800...900 К, восстановленная по излучению в инфракрасной области, расположена в зоне горения газовой и конденсированной фаз (непосредственно над слоем

ЛГМ в зоне фронта пламени); с увеличением влагосодержания максимальная температура уменьшается; при достижении края области навески ЛГМ и при влагосодержании выше критической (кривая влагосодержания 43 %) скорость движения фронта замедляется, максимальная температура быстро уменьшается и горение прекращается.

Максимальная температура горения конденсированной фазы, измеренная в различных спектральных интервалах, отличается в пределах 30°. Этот факт указывает на то, что конденсированная фаза действительно излучает по закону Планка.

В результате использования методики тепловизионных исследований в лабораторных условиях были изучены пространственно-временные зависимости характеристик низовых лесных пожаров на разных стадиях развития. Были получены эмпирические формулы, описывающие временные зависимости изменения координаты максимальной температуры в очаге низового лесного пожара малой интенсивности. Исследована излучательная способность очага пожара в спектральных интервалах 3...12; 3...5; 8...12; 3,9 и 10,6 мкм. Показано, что спектр излучения в инфракрасной области горения конденсированных продуктов пиролиза ЛГМ близок к излучению АЧТ, а газовой фазы – существенно отличается от спектра излучения АЧТ.

1. Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. – Новосибирск: Наука, 1992. – 408 с.

2. Алексеев Б. В., Гришин А. М. Курс лекций по аэротермохимии. – Томск: Изд-во ТГУ, 1971. – Ч. 1. – 221 с.

3. Алексеев Б. В., Гришин А. М. Курс лекций по аэротермохимии. – Томск: Изд-во ТГУ, 1972. – Ч. 2. – 184 с.

4. Лабораторные исследования возникновения и распространения низового лесного пожара / А. М. Гришин [и др.] // Физика горения и взрыва. – 1996. – № 6. – Т. 32. – С. 3–10.

5. Экспериментальный стенд для исследования низовых лесных пожаров / А. М. Гришин [и др.]: Пожары в лесу и на объектах лесохимического комплекса: возникновение, распространение и экологические последствия: материалы Международной конференции. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1999. – С. 34–35.

6. Гришин А. М., Зима В. П. Об экс-

периментальном исследовании низовых лесных пожаров в лабораторных условиях: Сопряженные задачи физической механики и экология: тезисы Междунар. совещания-семинара. – Томск: Изд-во Томского университета, 1994.

7. Гришин А. М., Голованов А. Н., Смирнов В. Г. О методике экспериментального определения параметров в зоне лесного пожара // Физика горения и взрыва. – 1995. – № 3. – Т. 31. – С. 3–8.

8. Блок регистрации и ввода информации с тепловизора в ЭВМ «Термик-2» / А. А. Доботкин [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 1994. – № 5. – Т. 7. – С. 673–679.

9. Исследование зажигания слоя лесных горючих материалов / А. М. Гришин [и др.] // Физика горения и взрыва. – 1998. – № 6. – Т. 34. – С. 14–22.

10. Тепловизионные исследования развития и распространения низового лесного пожара / А. М. Гришин [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 1997. – № 10. – Т. 10. С. 1039–1050.

11. Thermovision method for the investigation of initiation and spread of a surface forest fire / A. M. Grishin [и др.] // Proc. SPIE's. Infrared Spaceborne Remote Sensing V. – 1997. – V. 3122. – P. 317–326.

12. Спектральное редуцированное инфракрасное излучение: справочный материал / И. М. Ефименко [и др.]. – М.: Наука, 1977. – 244 с.

13. Конев Э. В. Анализ процесса распространения лесных пожаров и палов / Теплофизика лесных пожаров: сб. науч. трудов. – Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1984. – С. 99–125.

Материал поступил в редакцию 04.05.11.

*Долгов Александр Анатольевич, кандидат физико-математических наук, доцент*

*Тел. 8-926-581-64-89*

*E-mail: dolaa@rambler.ru*

*Цомаева Дарья Сергеевна, младший научный сотрудник*

*Тел. 8-906-037-04-50*

УДК 502/504:633.2.3.031:[631.67+631.847.2]

**В. И. ЖЕЛЯЗКО, А. С. КУКРЕШ**

Учреждение образования

«Белорусская государственная сельскохозяйственная академия», Горки

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОПРЕПАРАТОВ ПРИ ОРОШЕНИИ СЕНОКОСНЫХ УГОДИЙ

*Представлена перспективная технология возделывания бобово-злаковых травосмесей. Она включает орошение и использование бактериальных препаратов на бобово-злаковых травосмесях.*

*Бобово-злаковые травосмеси, бактериальные препараты, орошение, продуктивность и качество продукции.*

*At present perspective technology cultivation of legume-grass mixtures. This technology includes usage of irrigation and bacterial preparations on legume-grass mixtures.*

*Legume-grass mixtures, bacterial preparations, irrigation, productivity and quality of produce.*

Оптимизация кормопроизводства с учетом обеспеченности полноценными кормами животных и наличия материальных ресурсов – актуальная задача на современном этапе. Решение ее связано с проблемами биологизации земледелия,

сохранения плодородия почвы и охраны окружающей среды. В этой связи большое значение приобретает планирование и организация адаптивного кормопроизводства путем подбора культур и совершенствования технологий их