

Расчеты показали также, что существует нижний предел распространения верхового пожара по скорости ветра в полном согласии с данными, полученными при численном решении сопряженной задачи, и экспериментальными данными [13].

Таким образом, использование аналогии процессов тепло- и массообмена и коэффициента теплообмена существенно упрощает постановку задачи и при разумном выборе коэффициента  $a$  позволяет получать физически правдоподобные результаты. Поэтому упрощенную постановку задачи, учитывающую только процессы тепло- и массопереноса в пологе леса, можно использовать, по крайней мере, для качественного анализа механизма и пределов распространения фронта вершинного верхового пожара. Можно надеяться, что выбором величины  $a$  удастся описать тепло- и массообмен полога леса при пожаре как с приземным слоем атмосферы, так и с нижним ярусом леса. В этом случае упрощенную модель можно применять и для описания поавальных верховых пожаров.

Поступила в редакцию 2/II 1983,  
после доработки — 17/X 1983

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. П. Курбатский. Техника и тактика тушения лесных пожаров. М.: Гослесбумиздат, 1962.
2. Э. В. Колев. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука, 1977.
3. Г. А. Доррер. Математические модели динамики лесных пожаров. М.: Лесная пром-сть, 1979.
4. Э. Н. Валендик, П. М. Матвеев, М. А. Софронов. Крупные лесные пожары. М.: Наука, 1979.
5. А. М. Гришин. Математические модели лесных пожаров. Томск: Изд-во ТГУ, 1981.
6. А. С. Дубов, Л. П. Быкова, С. В. Марунич. Турбулентность в растительном покрове. Л.: Гидрометеиздат, 1978.
7. А. М. Гришин, В. Е. Абалтусов, В. М. Бабаев и др. Экспериментальное исследование тепло- и массопереноса в приземном слое атмосферы при лесных пожарах. ТГУ, 1980. Деп. ВИНТИ, № 4224-81.
8. А. М. Гришин, А. Д. Грузин. Докл. АН СССР, 1980, 253, 3.
9. А. Д. Грузин. Канд. дис. ТГУ, 1983.
10. А. П. Бузыкни. Продуктивность сосновых лесов. М.: Наука, 1978. 229 с.
11. А. М. Гришин, В. Н. Берцун, В. П. Зинченко. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. Томск: Изд-во ТГУ, 1981.
12. С. С. Кутателадзе, А. И. Леонтьев. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергия, 1972.
13. А. М. Гришин, В. Е. Абалтусов и др. Экспериментальное исследование механизма распространения верховых лесных пожаров и тепломассообмена фронта пожара с окружающей средой. ТГУ, 1982. Деп. ВИНТИ, № 4873-82.
14. А. М. Гришин, А. Д. Грузин, В. Г. Зверев. Докл. АН СССР, 1983, 269, 4.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ФРОНТА ВЕРХОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА

А. М. Гришин, В. В. Плюхин

(Томск)

Известно, что количество верховых пожаров, происходящих в природе, существенно меньше числа низовых, но они наносят огромный ущерб лесам, так как скорость их распространения значительно выше. Вопрос об экспериментальном исследовании верховых лесных пожаров обсуждался в работах [1—5]. В [1, 2] приводятся некоторые результаты наблюдений за распространением спонтанно возникающих верховых лесных пожаров. В частности, в [2] обсуждался вопрос о формировании конвективных колонок над фронтом пожара. Подчеркивается, что горящие частицы (тонкие веточки и частицы коры), возникающие во фронте пожара, переносятся ветром на десятки метров вперед, вызывают загорание опада и тем самым способствуют распространению пожара. В [3—

5] дается анализ механизма тепло- и массопереноса в условиях заранее запланированных верховых лесных пожаров, что позволило использовать количественные методы определения температур и тепловых потоков во фронте.

В работе [5] фронт верхового пожара моделировали штабелем горячей древесины, а естественный лес — продуваемым (терминология из [7]) искусственным насаждением из молодых сосенок, полученных в результате рубок ухода. Установлено, что верховой пожар возникает при скорости ветра, превосходящей 3 м/с, причем основную роль в передаче энергии от фронта к продуваемому лесному массиву играет вынужденная конвекция, хотя вблизи фронта лучистый и конвективный тепловые потоки по величине сравнимы между собой. Скорость распространения верхового пожара в продуваемом лесном массиве сравнима со скоростью ветра.

В данной работе исследуются поля температур и механизм переноса энергии от фронта пожара для непродуваемых лесных массивов. Показано, что профиль температуры напоминает гауссову кривую, а роль переноса энергии излучением выше, чем в случае продуваемых лесных массивов. Последнее объясняется тем, что в силу аэродинамического сопротивления скорость ветра в кронах деревьев для непродуваемых лесных массивов мала по сравнению со скоростью ветра в продуваемых лесных массивах.

#### Постановка задачи и методика исследования

Для исследования механизма распространения верхового пожара использовали три искусственные лесные полосы из молодых сосенок, которые вкапывали с плотностью посадки 0,7—2,8 шт./м<sup>2</sup> так, чтобы направление полос совпадало с направлением ветра. Длина такой лесной полосы составляла 15—20, ширина 2,0—2,5 и высота 2,5—3,0 м, расстояние между нижней границей полога леса и подстилкой 0,1 м. С наветренной стороны из сушиняка собиралась зона зажигания высотой 0,5—0,7, шириной 2,0—2,5 м и плотностью упаковки 0,3 (под плотностью упаковки понимается отношение собственного объема сушиняка к объему всей зоны зажигания). Размеры зоны зажигания и массу горючего материала в ней подбирали экспериментально для надежного инициирования верхового пожара и в то же время минимального влияния горения зоны зажигания на последующее распространение верхового пожара. Другими словами, размеры зоны зажигания подбирали так, чтобы энергосодержание факела пламени от зоны зажигания было того же порядка, что и фронта пожара в кронах деревьев искусственной полосы леса. Для надежности инициирования верхового пожара зону зажигания непосредственно перед началом эксперимента обливали соляркой. Наряду с верховым пожаром одновременно осуществлялся и низовой пожар. В качестве напочвенного покрова использовали мох-беломошник, который в данных условиях, как и хвоя в пологе леса, служил проводником огня. Мох укладывали слоем толщиной 0,10—0,15 м с плотностью укладки 1,5—2,0 кг/м<sup>2</sup> (что близко к запасу лесных горючих материалов в природных условиях [1, 3]) по земле в искусственной лесной полосе. На рис. 1 представлена схема эксперимента. Для наилучшего сравнения процесс инициировали одновременно в трех лесных полосах с различной плотностью посадки. Цель исследования состояла в определении структуры

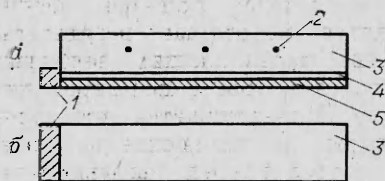


Рис. 1. Схема эксперимента.

а) вид сбоку; б) вид сверху. 1 — зона зажигания; 2 — точки расположения датчиков; 3 — полог леса; 4 — пространство между напочвенным покровом и пологом леса; 5 — напочвенный покров (слой мха-беломошника).

фронта, условий и скорости распространения пожара, механизма передачи энергии от фронта к горючим материалам. Для решения поставленной задачи использовали методики определения температуры и тепловых потоков перед фронтом пожара и во фронте, описанные в [4, 6]. Датчики тепловых потоков и термопары устанавливали в трех точках полого леса на высоте 2 м и на расстоянии от зоны зажигания 4, 8, 12 м соответственно. В каждой из них находились датчики суммарного теплового потока, лучистого теплового потока и термопара (см. рис. 1).

Термопары готовили из хромель-алюмелевой проволоки с диаметром спая до 1 мм. Такая термопара позволяла определять температуру газовой фазы с точностью до 5%, при частоте изменения процесса до 1 Гц. Для определения тепловых потоков использовали датчики, работа которых основывалась на измерении скорости нагрева тонкой медной пластины. Из показаний термопар и датчиков тепловых потоков получали распределения  $T(t)$  и  $q(t)$  ( $t$  — время) в фиксированных точках  $\xi_i$ . Если за точки отсчета в неподвижной системе координат взять начало лесополосы со стороны зоны зажигания, то  $\xi_1$ ,  $\xi_2$  и  $\xi_3$  равны соответственно 4, 8, 12 м. В подвижной системе координат, связанной с равномерно распространяющимся фронтом пожара, координата любой точки  $x$  определяется по формуле

$$x = \xi_i - \omega t, \quad (1)$$

где  $\omega$  — скорость распространения фронта пожара;  $t$  — время;  $\xi_i$  — координата соответствующей точки в неподвижной системе отсчета. Зная  $\omega$  и время, при помощи (1) можно от зависимостей  $T(t)$  и  $q(t)$  перейти к  $T(x)$ ,  $q(x)$ , и по этим функциям судить о структуре фронта в подвижной системе координат. Величину  $\omega$  легко определить по формуле

$$\omega = (\Delta \xi)_i / (\Delta t)_i \quad (i = 1, 2),$$

где  $(\Delta \xi)_i$  — расстояние между точками  $\xi_1$ ,  $\xi_2$ ,  $\xi_3$ ;  $(\Delta t)_i$  — время, за которое фронт пламени преодолевает это расстояние.

### Результаты термопарных измерений и их анализ

При верховых пожарах основным горючим является хвоя, а в крупных пожарах — и тонкие (диаметром до 5 мм) веточки. Верховой пожар может распространяться в кронах деревьев (вершинный верховой пожар) одновременно с низовым пожаром (повальный верховой пожар) [1]. В экспериментах реализован второй тип распространения верхового пожара. Установлено, что при скорости ветра 5 м/с в лесном массиве с плотностью посадки 2,8 м<sup>-2</sup> наблюдалось самостоятельное устойчивое распространение верхового пожара с полным выгоранием хвои в пологе лесной полосы и мха на поверхности почвы. При плотности посадки 1,2 м<sup>-2</sup> верховой пожар самостоятельно распространялся, но хвойный материал выгорал не полностью, а при плотности посадки 0,7 м<sup>-2</sup> верховой пожар вообще не возникал. При скорости ветра менее 3 м/с верховой пожар самостоятельно не распространялся даже при плотности посадки 2,8 м<sup>-2</sup>. Все эксперименты проводили при температуре воздуха 293—298 К.

На рис. 2 представлена зависимость  $T(x)$  в подвижной системе координат. Данное распределение температуры определено во фронте верхового пожара при скорости ветра 5 м/с и плотности посадки деревьев 2,8 м<sup>-2</sup> (скорость распространения фронта пожара  $\omega = 0,1$  м/с). При  $\omega = \text{const}$  распределение  $T(t)$  в неподвижной системе координат графически будет выглядеть аналогично  $T(x)$ . Профиль температуры в подвижной системе координат напоминает гауссову кривую. Максимум температуры составляет ~1300 К, что согласуется с литературными данными. Немонотонность профиля температуры обнаружена теоретически [8, 9] и объясняется тепловыми потерями от фронта пожара в окружающую среду вследствие свободной и вынужденной конвекции и излучения.

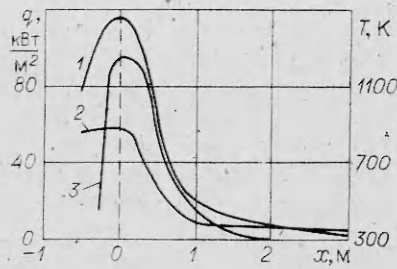


Рис. 2. Распределение суммарного теплового потока (1), лучистого теплового потока (2) и температуры (3) во фронте верхового лесного пожара в подвижной системе координат.

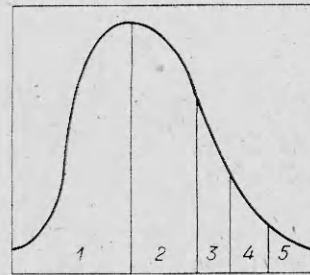


Рис. 3. Схема структуры фронта верхового лесного пожара.

Зоны: 1 — догорания, 2 — горения, 3 — пиролиза, 4 — сушки, 5 — прогрева.

На рис. 3 фронт верхового лесного пожара схематически разбит на отдельные участки. Зона 5 характеризуется только прогревом лесного горючего материала (ЛГМ). Процесс сушки здесь пока практически отсутствует, а температура газовой фазы не превышает 310 К. В зоне 4 происходит интенсивное высушивание ЛГМ и температура среды меняется от 310 до 380 К. В третьей, где температура среды меняется от 370 до 670 К, происходит пиролиз ЛГМ. Лесной материал горит в зоне 2, где температура среды достигает 1300 К и  $\frac{\partial T}{\partial x} \leq 0$ . В области  $\frac{\partial T}{\partial x} > 0$  происходит догорание конденсированных продуктов пиролиза (коксика) (рис. 3, 1). При делении фронта верхового пожара на области использовали профиль температуры, полученный экспериментально, и результаты теоретических исследований [8, 9]. Зная изменения температуры во фронте пожара в подвижной системе координат (1), можно произвести оценку запаса тепла во фронте пожара, используя формулу

$$Q_{\pm} = \int_{-\Delta x/2}^{+\Delta x/2} \sum_{i=1}^5 \rho_i c_{pi} (T - T_e) s dx, \quad s = 1 \text{ м}^2. \quad (2)$$

Здесь  $\Delta x$  — ширина фронта пожара;  $\rho^i = \varphi_i \rho_i^0$  — парциальная плотность  $i$ -й компоненты; индексы: 1 — исходное сухое органическое вещество, 2 — вода в жидкокапельном состоянии, 3 — конденсированные продукты пиролиза, 4 — зола, 5 — газовая фаза.

Поскольку в проведенных экспериментах в пологе леса выгорала только хвоя, а в единице объема масса хвои много меньше массы воздуха, то  $\sum_{i=1}^4 \rho_i c_{pi} \ll \rho_5 c_{p5}$  и (2) можно записать в виде

$$Q_{\pm} = \int_{-\Delta x/2}^{+\Delta x/2} \rho_5 c_{p5} (T - T_e) s dx. \quad (3)$$

Для данных условий эксперимента  $Q_{\pm} \approx 4000$  кДж. При проведении оценок под  $c_{p5}$  и  $\rho_5$  понималась теплоемкость и плотность воздуха при соответствующей температуре, причем  $\varphi_5 = 1$ .

На основании термометрических измерений получено, что уменьшение содержания хвои в единице объема полого леса приводит к увеличению ширины фронта пожара, последнее — приводит к росту запаса тепла во фронте и в конечном счете влечет за собой ускорение распространения пожара. Таким образом, можно сделать вывод, что при достаточной величине скорости ветра уменьшение до определенных пределов плотности ЛГМ в пологе леса способствует росту скорости распространения пожара. Этот вывод согласуется с результатами теоретических исследований [8, 9].

## Измерение тепловых потоков во фронте пожара и анализ результатов

Суммарный тепловой поток во фронте пожара можно представить в виде суммы следующих слагаемых:

$$q_{\Sigma} = q_{\lambda} + q_{\kappa} + q_{\tau}, \quad (4)$$

где  $q_{\lambda}$ ,  $q_{\kappa}$ ,  $q_{\tau}$  — соответственно лучистая, конвективная и кондуктивная составляющие суммарного теплового потока.

Оценивая число Пекле  $Pe = u \cdot \Delta x / a$ , можно убедиться, что  $Pe \gg 1$ , т. е. теплообмен за счет теплопроводности пренебрежимо мал по сравнению с конвективным теплообменом, тогда формула (4) принимает вид

$$q_{\Sigma} = q_{\lambda} + q_{\kappa}. \quad (5)$$

Из рис. 2 следует, что максимальное значение суммарного теплового потока достигает  $120 \text{ кВт/м}^2$ , а на долю лучистой составляющей приходится до  $55 \text{ кВт/м}^2$ . На рис. 4 показано распределение доли лучистой составляющей суммарного теплового потока в подвижной системе координат. Видно, что во фронте пожара доли лучистой и конвективной составляющих суммарного теплового потока примерно равны. При удалении от фронта резко возрастает лучистый теплообмен и на расстоянии  $x = 2 \text{ м}$  (в данном случае за начало координат в подвижной системе взята точка во фронте пожара, где  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ ) на него приходится до 95%. Этот эффект можно объяснить тем, что в данном случае верховой пожар реализуется в непродуваемом пологе леса. При  $x > 2 \text{ м}$  лучистый поток ослабевает, поскольку полог леса является рассеивающей средой, и с увеличением  $x$  он убывает по экспоненциальному закону.

Для той части фронта, где температуры относительно низки и теплоприходом (теплоотводом) от химических реакций и испарения можно пренебречь (зона прогрева), уравнение сохранения энергии в подвижной системе координат имеет вид

$$\left( -\omega \sum_{i=1}^5 \rho_i c_{pi} + u \rho_5 c_{p5} \right) \frac{dT}{dx} = \frac{d}{dx} \left( \lambda_{\text{эф}} \frac{dT}{dx} \right) + \frac{\alpha}{h} (T - T_e), \quad (6)$$

где  $u$  — равновесная скорость ветра в пологе леса;  $\omega$  — линейная скорость пожара;  $\lambda_{\text{эф}} = \lambda_{\tau} + \lambda_{\lambda}$  — эффективный коэффициент теплопроводности;  $\lambda_{\tau}$ ,  $\lambda_{\lambda}$  — коэффициенты турбулентной и лучистой теплопроводности;  $\rho_5 c_{p5}$  — плотность и теплоемкость газа (воздуха);  $\alpha$  — коэффициент теплообмена;  $h$  — высота полога леса. При записи (6) считалось, что начало координат связано с левой границей зоны прогрева. С учетом того, что  $\sum_{i=1}^4 \rho_i c_{pi} \ll \rho_5 c_{p5}$ , а для зоны прогрева  $T \approx T_e$ , уравнение (6) упрощается и принимает вид

$$\rho_5 c_{p5} (u - \omega) = \frac{d}{dx} \left( \lambda_{\text{эф}} \frac{dT}{dx} \right). \quad (7)$$

Поскольку из измерений известны суммарный тепловой поток, распределение температуры  $T(x)$  и скорость распространения пожара  $\omega$ , проинтегрировав уравнение (7), можно получить оценку скорости ветра в пологе леса

$$u = q_{\Sigma} \left( \int_0^{+\infty} \rho_5 c_{p5} \frac{\partial T}{\partial x} dx \right)^{-1} + \omega. \quad (8)$$

При плотности посадки деревьев  $2,8 \text{ м}^{-2}$  и скорости ветра  $5 \text{ м/с}$  скорость в пологе леса в зоне подогрева составляет  $0,4 \text{ м/с}$ , т. е. много меньше скорости ветра. Этот результат подтверждает предположение о непродуваемости полога леса при плотности посадки деревьев  $2,8 \text{ м}^{-2}$ . Скорость

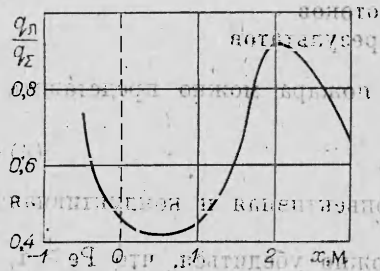


Рис. 4. Распределение доли лучистого теплового потока относительно центра фронта верхового лесного пожара.

распространения верхового пожара составляла 0,1 м/с, а низового 0,06 м/с, т. е. в данных условиях осуществлялся повоальный верховой пожар в продуваемом лесном массиве (в соответствии с терминологией, принятой в [4, 7]). В работе же [6] моделировался верховой пожар в продуваемом массиве, когда скорость ветра в пологе леса близка к скорости ветра в приземном слое атмосферы. Поэтому в данном случае, в отличие от результатов [6], перенос энергии излучением играет значительно большую роль. Иными словами, с изменением структуры полога леса меняется механизм теплопереноса от фронта пожара к свежим лесным горючим материалам.

Следует также отметить, что сделанный ранее вывод, что при определенных скоростях ветра некоторое уменьшение содержания ЛГМ в единице объема полога леса приводит к увеличению скорости распространения верхового пожара, относится в большей степени к вершинным верховым пожарам, так как этот эффект обнаружен при скорости ветра 5 м/с в лесополосах с плотностью посадки деревьев от 1,5 до 2,8 м<sup>-2</sup>. В данных условиях выгорание хвои в кронах деревьев было полное. При скорости ветра менее 5 м/с выгорание хвои было неполное и данное явление не наблюдалось. В теоретических исследованиях [8, 9] этот результат получен для скорости распространения верхового лесного пожара более 1 м/с, а такая скорость соответствует распространению вершинных верховых пожаров.

Таким образом, скорость и механизм распространения верхового лесного пожара в основном определяются содержанием ЛГМ и скоростью ветра, причем экспериментальные данные по исследованию распространения повоальных верховых пожаров в непродуваемых лесных массивах, приведенные выше, согласуются в качественном отношении с теоретическими результатами [8, 9], полученными для продуваемых лесных массивов. В количественном отношении характеристики горения, найденные экспериментально и теоретически, различаются, так как они относятся к разным типам верховых пожаров.

Поступила в редакцию 5/IV 1983,  
после доработки — 17/X 1983

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Э. В. Конев. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука, 1977.
2. Э. Н. Валендик, И. М. Матвеев, М. А. Софронов. Крупные лесные пожары. М.: Наука, 1979.
3. А. М. Гришин. Математические модели лесных пожаров. Томск: Изд-во ТГУ, 1981.
4. А. М. Гришин, В. Е. Абалтусов, И. В. Копылов и др. Экспериментальное исследование тепло- и массообмена в приземном слое атмосферы при лесных пожарах. Деп. ВИНТИ, № 4224-81.
5. А. М. Гришин, В. Е. Абалтусов, А. Д. Грузин и др. Экспериментальное исследование механизма распространения верховых лесных пожаров и тепло- и массообмена фронта пожара с окружающей средой. Деп. ВИНТИ, № 4873-82.
6. В. Е. Абалтусов, А. Н. Голованов, В. В. Илюхин и др. В кн.: Газодинамика неравновесных процессов. Новосибирск, 1981.
7. А. С. Дубов, Л. П. Быков, С. В. Марунич. Турбулентность в растительном покрове. Л.: Гидрометеиздат, 1978.
8. А. М. Гришин, А. Д. Грузин, В. Г. Зверев. Теоретическое исследование верховых лесных пожаров. Деп. ВИНТИ, № 552-83.
9. А. М. Гришин, А. Д. Грузин, В. Г. Зверев. ФГВ, 1985, 21, 1.