

30 нс. В тех точках, где доверительный интервал не нанесен, он не превышает размера значка на графике. Реальный разброс заметно превышает аппаратную точность измерений (их делалось по несколько в одной точке пламени). Этот разброс объясняется флуктуациями концентраций компонентов в пламени, характерными для турбулентного течения. Он иллюстрирует возможность применения данной схемы для измерения мгновенных значений концентраций молекул и изучения параметров турбулентности. Аналогичные профили концентраций N_2 , H_2 , O_2 в том же сечении пламени, но с усреднением по времени с использованием непрерывного аргонового лазера, приведены в [6]. Наши эксперименты показывают такую же структуру пламени, но дают дополнительную информацию о локальных флуктуациях концентраций.

Проведенные измерения позволяют также оценить предельную чувствительность, достижимую для данной схемы. Сигнал, полученный в эксперименте от атмосферной концентрации молекул N_2 , например, составлял около 500 фотоэлектронов. Однако остались неиспользованными следующие возможности: 1) не использовались обратные зеркала для лазерного и рассеянного излучения, что привело бы к увеличению полезного сигнала в 4 раза и 2) не достигнута предельная для данного лазера энергия лазерного излучения в импульсе [4] (вместо 500 мДж на $HeCl$ было только 100 мДж). Это дало бы еще пятикратное увеличение сигнала. Еще некоторого увеличения сигнала можно было добиться посредством более строгого согласования толщины перетяжки лазерного пучка и ширины входной щели монохроматора. Таким образом, полученный в эксперименте сигнал от атмосферной концентрации молекул N_2 с учетом неиспользованных возможностей может быть доведен по меньшей мере до $500 \times 4 \times 5 = 10^4$ фотоэлектронов в импульсе. Ошибка измерений при таком уровне сигнала составит 1%, а с точностью 10% можно регистрировать концентрацию $\sim 2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ молекул N_2 .

Авторы выражают благодарность Ю. И. Красникову за помощь в создании схемы коррелированной выборки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Laser Raman Gas Diagnostics/Ed. M. Lapp, C. M. Penney.— N. Y.: Plenum Press, 1974.
2. Ахманов С. А., Коротеев Н. И. Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света.— М.: Наука, 1981.
3. Combustion Measurements/Ed. R. Goulard.— Washington: Academic Press, 1976.
4. Малов А. Н., Ражев А. М. ЖТФ, 1985, 55, 4, 664.
5. Гейдон А. Спектроскопия пламени.— М.: ИЛ, 1959.
6. Рудницкий А. Л., Федоров С. Ю., Якоби Ю. А.— В кн.: Оптические методы исследований газовых потоков и плазмы.— Минск: ИТМО, 1982.

Поступила в редакцию 1/VII 1987

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПЕРЕХОДА НИЗОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА В ВЕРХОВОЙ

*О. П. Брабандер, О. А. Вдовина, А. М. Гришин,
А. Д. Грузин
(Кемерово, Томск)*

Математическому моделированию лесных пожаров посвящены работы [1—5], основное внимание в которых уделяется вопросам корректного математического описания распространения верховых лесных пожаров, выяснению предельных условий распространения и взаимодействия с естественными и искусственными противопожарными преградами. В то же время очевидна необходимость изучения самой возможности возникновения процесса горения в пологе леса в результате воздействия низового пожара. Экспериментально этот вопрос рассматривался в [6—8].

В данной работе исследованы возможности возникновения горения в пологе леса в результате воздействия низового пожара. Использована относительно простая математическая модель для описания перехода низового лесного пожара в верховой в лесных массивах с достаточно высоким запасом лесных горючих материалов (в дальнейшем ЛГМ) в кронах деревьев.

Цель исследования — выяснение факторов, определяющих переход и получение обобщающих диаграмм предельных условий перехода для ряда основных параметров.

1. Наиболее распространены в природе низовые пожары, при которых горение происходит по напочвенному покрову, траве, низким кустарникам [9]. Верховые пожары возникают при переходе горения из очага низового пожара в кроны деревьев. При этом наиболее благоприятные условия такого перехода имеют место в молодых лесах с достаточно высоким запасом ($>0,15 \text{ кг/м}^3$) лесных горючих материалов в пологе леса. В таких лесах даже при значительной скорости ветра на открытой местности горизонтальные движения практически отсутствуют вплоть до верхней части крон [10].

Будем считать, что вплоть до верхней границы полога леса массовая скорость горизонтального движения много меньше массовой скорости восходящих потоков низового пожара, а ширина (в случае плоского фронта) или диаметр (в осесимметричном случае) фронта низового пожара значительно меньше высоты деревьев. Используем физические модели процессов переноса при лесных пожарах, предложенные в [1]. Лес моделируем сплошной многофазной реакционноспособной средой и применяем упрощенную схему физико-химических превращений, предложенную в [2].

Сформулированные предположения позволяют для описания переноса газообразных продуктов горения низового пожара и полога леса ограничиться приближением турбулентной струи с плавучестью. В пологе леса учитываем следующие физико-химические процессы: испарение влаги из ЛГМ, пиролиз сухой органической массы, горение летучих и конденсированных продуктов пиролиза. Таким образом, математически решение поставленной задачи сводится к интегрированию следующей системы уравнений в безразмерном виде (ограничимся плоским случаем):

$$\frac{\partial \rho_5}{\partial t} + \frac{\partial \rho_5 u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_5 w}{\partial z} = Q, \quad (1)$$

$$\rho_5 \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -(\rho_5 - 1) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_t \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \rho_5 c_s w^2, \quad (2)$$

$$\rho_5 \left(\frac{\partial c_\alpha}{\partial t} + u \frac{\partial c_\alpha}{\partial x} + w \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} \right) = R_{5\alpha} - c_\alpha Q + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial c_\alpha}{\partial x} \right), \quad \alpha = \overline{1,4}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & (\pi_{c1} \varphi_{\rho 1} \Phi_1 + \pi_{c2} \varphi_{\rho 2} \Phi_2 + \alpha_c \pi_{c3} \varphi_{\rho 1} \Phi_3 + \pi_{c4} \varphi_{\rho 4} \Phi_4) \frac{\partial T}{\partial t} + \\ & + \rho_5 c_{p5} \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\mu_t c_{p5}}{Pr_t} + \lambda_R \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \\ & + Da_3^{\text{II}} \alpha_c \varphi_{\rho 1} R_3 - Da_2^{\text{II}} \varphi_{\rho 2} R_2 + Da_5^{\text{II}} R_5, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\sum_{\alpha=1}^5 c_\alpha = 1, \quad \rho_5 = M/T, \quad 1/M = M_\infty \sum_{\alpha=1}^5 \frac{c_\alpha}{M_\alpha}. \quad (5)$$

Для полога леса ($h_2 \leq z \leq h_3$, рис. 1) наряду с уравнениями (1)–(5) необходимо выписать законы сохранения массы неподвижной конденсированной фазы

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_1, \quad \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_2, \quad \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = R_1 - \frac{M_c}{M_1} R_5, \quad \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0, \quad (6)$$

$$t = 0: \quad \varphi_1 = 1, \quad \varphi_2 = 1, \quad \varphi_3 = 0, \quad \varphi_4 = 1.$$

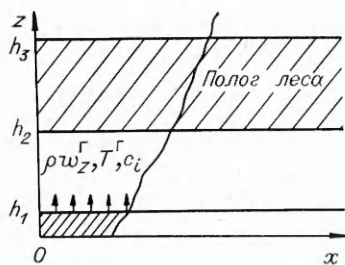


Рис. 1. Схема течения при низовом лесном пожаре.

Массовые скорости реакций пиролиза, испарения влаги, горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза, а также скорости образования индивидуальных компонентов и газовой фазы в целом записываются с использованием закона Аррениуса и эффективных термокинетических постоянных [4]:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= Da_1^I \varphi_1 \exp(-E_1/T), & R_2 &= Da_2^I \varphi_2 T^{-1/2} \exp(-E_2/T), \\
 R_3 &= Da_3^I \varphi_3 c_1 \exp(-E_3/T), & R_5 &= Da_5^I c_1^{0,25} c_2 M^{1,25} T^{-2,25} \exp(-E_5/T), \\
 R_{51} &= -\alpha_c \varphi_{\rho_1} R_3 - \frac{M_1}{2M_2} R_5, & R_{52} &= (1 - \alpha_c) v_{\Gamma} \varphi_{\rho_1} R_1 - R_5, \\
 R_{53} &= \varphi_{\rho_2} R_2, & R_{54} &= 0, & Q &= (1 - \alpha_c) \varphi_{\rho_1} R_1 + \varphi_{\rho_2} R_2 + \alpha_c \frac{M_c}{M_1} \varphi_{\rho_1} R_3.
 \end{aligned}$$

Систему (1) — (6) следует дополнить начальными и граничными условиями.

В начальный момент времени все искомые функции считаются известными, поле течения определяется в результате расчета стационарной многокомпонентной химически реагирующей струи с известными характеристиками в начальном сечении

$$\begin{aligned}
 T(x, 0) &= 1 + (T_{\Gamma} - 1) \exp(-x^2), \\
 c_{\alpha}(x, 0) &= c_{\alpha\infty} + (c_{\alpha\Gamma} - c_{\alpha\infty}) \exp(-x^2), \\
 w(x, 0) &= w_{\Gamma} \exp(-x^2).
 \end{aligned}$$

В последующие моменты дополнительно учитываются физико-химические превращения, происходящие в пологе леса. Граничные условия:

$$x = 0: \quad \frac{\partial c_{\alpha}}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = u = 0, \quad (7)$$

$$x = x_{\infty}: \quad T = T_{\infty}, \quad w = 0, \quad c_{\alpha} = c_{\alpha\infty}. \quad (8)$$

Коэффициент турбулентной динамической вязкости определяется по формуле Шеца [14]:

$$\mu_t = 0,037 \rho_c / \rho_s B_{1/2} (\rho_s w) \max,$$

где ρ_c — плотность на оси струи; $B_{1/2}$ — безразмерная полуширина струи; числа $Sc_t = Pr_t = 0,5$ полагаются постоянными для плоских струй.

Перенос энергии излучением учитываем в приближении лучистой теплопроводности. Принимаем, что при верховых лесных пожарах в основном излучают и поглощают элементы конденсированной среды, а газовая фаза оптически прозрачна. Характерная длина свободного пробега фотона $l_R \sim S^{-1} \sim 0,8$ м, в связи с чем справедлива оценка $l_R \ll h_3$ [1].

Для приведения уравнений (1) — (8) к безразмерному виду в качестве масштаба длины, времени, скорости выбраны соответственно величины x_0 , $\sqrt{x_0/g}$, $\sqrt{x_0 g}$, где x_0 — полуширина фронта низового пожара; g — ускорение свободного падения. Объемные доли компонентов исходной к-фазы относились к соответствующим величинам в начальный момент времени, в качестве масштаба для φ_3 выбрана величина $\alpha_c \varphi_{\rho_1} / \rho_s$ — «максимально возможный» выход конденсированного продукта пиролиза. Остальные переменные отнесены к их аналогам на удалении от фронта в невозмущенной атмосфере.

Входящие в систему уравнений безразмерные параметры имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \pi_{ci} &= \frac{c_{pi}}{c_{p5,\infty}}, \quad \varphi_{\rho i} = \frac{\rho_i \varphi_{iH}}{\rho_{5,\infty}}, \quad Da_1^I = \sqrt{\frac{x_0}{g}} k_{01}, \quad c_s = c_d S x_0, \\ Da_2^I &= \sqrt{\frac{x_0}{g}} \frac{k_{02}}{\sqrt{T_\infty}}, \quad Da_3^I = \sqrt{\frac{x_0}{g}} k_{03} S \sigma \frac{c_{5,\infty}}{c_3}, \\ Da_5^I &= \frac{M_2 k_{05} \sqrt{\frac{x_0}{g}} \left(\frac{M_\infty}{M_1}\right)^{0,25} M_\infty}{\rho_{5,\infty} T_\infty^{2,25}}, \\ Da_2^{II} &= \frac{q_2}{c_{p5,\infty} T_\infty}, \quad Da_3^{II} = \frac{q_3}{c_{p5,\infty} T_\infty}, \quad Da_5^{II} = \frac{q_5}{c_{p5,\infty} T_\infty}, \\ E_1 &= E'_1 / RT_\infty, \quad E_2 = E'_2 / RT_\infty, \quad E_3 = E'_3 / RT_\infty, \\ E_5 &= E'_5 / RT_\infty, \quad h_2 = h'_2 / x_0, \quad h_3 = h'_3 / x_0. \end{aligned}$$

Здесь и выше введены следующие обозначения: u, w — проекции безразмерной скорости на оси x и z ; $\rho_5, T, c_\alpha, c_{p5}$ — безразмерные плотность, температура, массовая концентрация компонентов и теплоемкость газовой фазы; $\rho_i, \varphi_i, c_{pi}$ — истинные плотности, объемные доли и теплоемкости конденсированной фазы; R_1, R_2, R_3, R_5 — безразмерные массовые скорости пиролиза органического вещества ЛГМ, испарения влаги, горения конденсированного и газообразных продуктов пиролиза соответственно; α_c и ν_r — массовые доли конденсированного продукта пиролиза и горючих газообразных компонентов в общей массе летучих продуктов пиролиза; M_α, M_c — молекулярные массы компонентов газовой фазы и конденсированного продукта пиролиза; c_d, S — коэффициент сопротивления и удельная поверхность элементов растительности; индексы: α — эффективные компоненты газовой фазы (1 — O_2 , 2 — CO , 3 — H_2O , 4 — N_2 , 5 — CO_2), i — компоненты к-фазы (1 — сухое органическое вещество, 2 — вода, 3 — коксик, 4 — минеральная часть), n — компоненты к-фазы в начальный момент времени, ∞ — значения функций в невозмущенной атмосфере.

2. Систему уравнений (1) — (8) численно интегрировали с помощью неявных разностных схем итерационно-интерполяционного метода [12] для параболических уравнений с двумя маршевыми переменными (2) — (4), а для уравнений химической кинетики (6) применялась неявная А-устойчивая схема первого порядка точности по времени [12]. Алгоритм расчета в целом подобен изложенному в [2, 4] и применяющемуся для расчета задач распространения верховых пожаров. Значения безразмерных параметров, определяющих процесс, выбирались соответствующими типичной структуре, реакционным свойствам сосновых молодняков [1, 13] и характерным параметрам низовых пожаров [7, 9]. Безразмерные параметры, общие для всех представленных ниже результатов: $\pi_{c1} = 2, \pi_{c2} = 4,18, \pi_{c3} = 0,9, \pi_{c4} = 1, Da_1^I = 7,16 \cdot 10^3, Da_2^I = 6,8 \cdot 10^3, Da_3^I = 0,92 \cdot 10^3, Da_5^I = 3,82 \cdot 10^8, Da_5^{II} = 33,3, Da_2^{II} = 10, Da_3^{II} = 40, E_1 = 31,3, E_2 = 20, E_3 = 33,3, E_5 = 38,3, c_s = 1,368 \cdot 10^{-2}, h_3 = 6, T_r = 4, c_{1r} = 0, c_{2r} = 0,02, c_{3r} = 0,02, c_{4r} = 0,3.$

Решение задачи позволило выяснить условия перехода низового пожара в верховой, проанализировать динамику этого процесса. К сожалению, используемая математическая модель не определяет важную для практики характеристику — время зажигания полога леса, а лишь дает грубую ее оценку снизу, так как эта величина складывается из времени формирования струи и времени индукции, а процесс формирования уравнениями в струйном приближении не описывается.

Ниже представлены некоторые результаты решения задачи. Их анализ показывает, что значительное влияние на возможность перехода

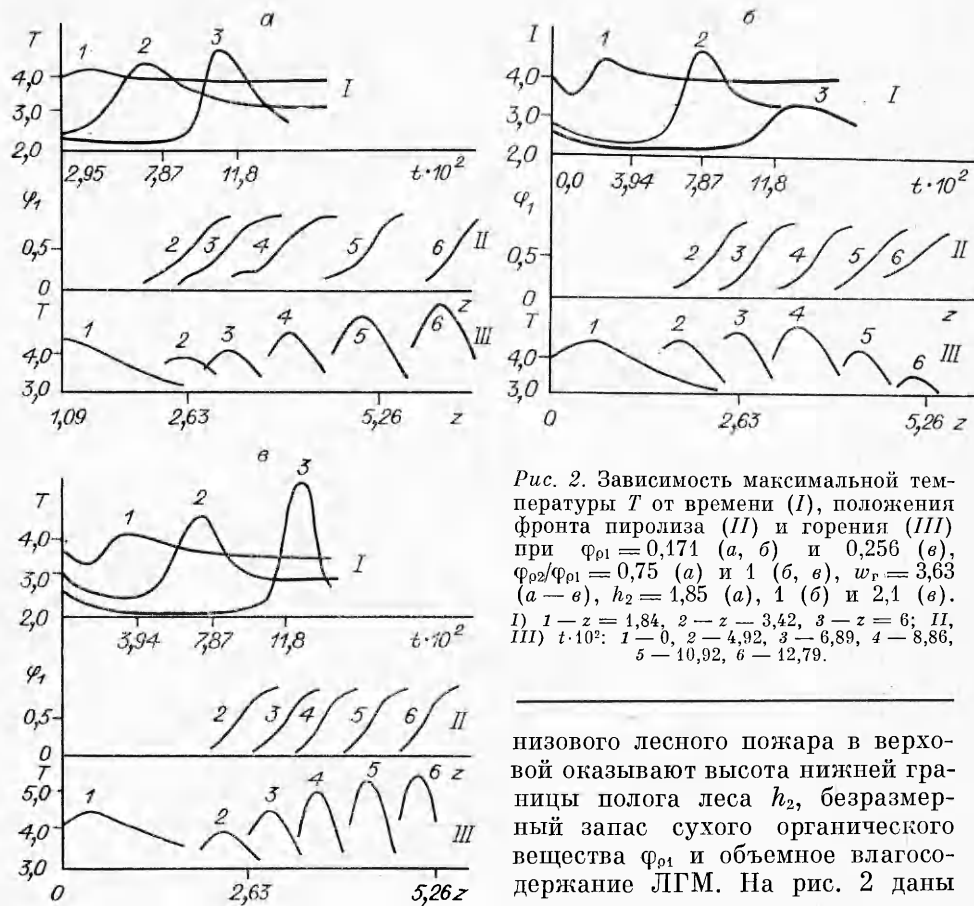


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры T от времени (I), положения фронта пиролиза (II) и горения (III) при $\varphi_{01} = 0,171$ (a, б) и $0,256$ (в), $\varphi_{02}/\varphi_{01} = 0,75$ (a) и 1 (б, в), $w_r = 3,63$ (a-в), $h_2 = 1,85$ (a), 1 (б) и $2,1$ (в). I) $1-z = 1,84$, $2-z = 3,42$, $3-z = 6$; II, III) $t \cdot 10^2$: $1-0$, $2-4,92$, $3-6,89$, $4-8,86$, $5-10,92$, $6-12,79$.

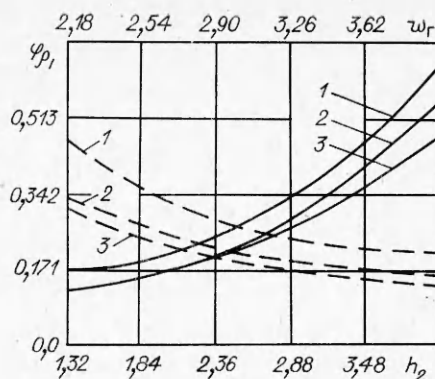
низового лесного пожара в верхней оказывают высота нижней границы полога леса h_2 , безразмерный запас сухого органического вещества φ_{01} и объемное влагосодержание ЛГМ. На рис. 2 даны кривые, характеризующие изменение максимальной температуры в пологе леса в различных точках. Динамика выгорания сухого органического вещества и положение фронта горения в пологе леса показаны на рис. 2, II, III соответственно. Критерием зажигания считалось наличие точки перегиба на участке сильного возрастания кривой изменения температуры во времени.

Анализ кривых на рис. 2 позволяет сделать вывод о последовательном зажигании и горении в пологе леса и проследить динамику этого процесса. Отметим, что во всех вариантах расчетов, где имело место зажигание, этот процесс происходил в газовой фазе в результате реакции горения летучих продуктов пиролиза, объемная доля конденсированного продукта практически не изменялась в результате реакции, т. е. в дальнейшем речь будет идти о газофазном зажигании и горении.

Выявлено, что в случае перехода горения в полог леса реализуется так называемый вырожденный режим зажигания, при котором в отличие от нормального режима большую роль играет выгорание горючего компонента газообразных продуктов пиролиза и, следовательно, его поступление в газовую фазу из ЛГМ. Отличительная особенность процесса перехода — заглубленное (т. е. при $z > h_2$) зажигание, что объясняется сном горючих продуктов пиролиза в глубь полога леса восходящим конвективным потоком. Из рис. 2, а видно, что до точки зажигания и фронт пиролиза и фронт повышенной температуры более протяженны, хотя уровень температуры невелик.

На рис. 2, б приведены результаты, иллюстрирующие потухание волны горения в верхней части полога. В отличие от рис. 2, а в этом случае полог леса имеет более высокое объемное влагосодержание. Несмотря на имеющее место зажигание ЛГМ, при дальнейшем заглублении горения в полог снижается уровень температуры и практически пожар

Рис. 3. Диаграмма процесса перехода в плоскости (φ_{p1} , h_2) при $w_r = 3,63$ (сплошные кривые) и в плоскости (φ_{p1} , w_r) при $h_2 = 1,84$ (штриховые кривые).
 1 — 3 — $\varphi_{p2}/\varphi_{p1} = 1,0; 0,8$ и $0,66$ соответственно.



потухает, что связано со значительными затратами энергии на высушивание избыточной влаги из ЛГМ. Обратим внимание на то обстоятельство, что высота нижней кромки полога леса в этом случае даже меньше, чем в варианте, представленном на рис. 2, а.

Влияние запаса сухого органического вещества ЛГМ в пологе на возможность перехода проиллюстрировано на рис. 2, в. Сравнивая кривые рис. 2, б и в, укажем, что в данном случае h_2 более чем в 2 раза выше, однако при том же влагосодержании происходит заживание и устойчивое распространение горения по пологу.

Наряду с исследованием особенностей процесса перехода в расчетах получали предельные обобщающие кривые, отделяющие область параметров, при которых возможен переход низового пожара в верховой, от области параметров, при которых переход невозможен. Подобные кривые могут служить основой для построения номограмм, позволяющих выявлять участки леса, опасные из-за возможности возникновения верхового пожара. На рис. 3 представлены предельные разделяющие кривые (сплошные) в плоскости параметров h_2 и φ_{p1} . В области параметров, расположенной ниже соответствующих кривых, низовой пожар в верховой не переходит, а в областях над кривыми наоборот. С увеличением относительной высоты нижней границы крон деревьев возможность возникновения горения в кронах уменьшается, причем при $h_2 > 5,3$ для данных характеристик низового пожара и реакционных свойств полога заживания в кронах не происходит в диапазоне значений φ_{p1} , отвечающих встречающимся в природе лесным массивам.

На рис. 3 обобщающие кривые (штриховые) построены также в плоскости параметров φ_{p1} , w_r . Видно, что с увеличением скорости оттока продуктов горения из очага низового пожара, т. е. с увеличением интенсивности последнего улучшаются условия для перехода горения в кроны деревьев. Это следует из анализа кривых на рис. 3, которые с ростом интенсивности низового пожара монотонно убывают. Отметим, что в обоих случаях существует некоторое предельное значение φ_{p1} (безразмерного запаса сухого органического вещества ЛГМ), ниже которого заживания в кронах не происходит.

Таким образом, приведенные результаты и их анализ позволяют считать предложенную математическую модель пригодной для описания процесса перехода низового лесного пожара в верховой в пределах ограничений, о которых говорилось выше. Появление экспериментальных данных, позволяющих более точно описывать реакционные и структурные свойства ЛГМ в пологе леса, даст возможность точной количественной оценки этого процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин А. М. Математические модели лесных пожаров. — Томск: изд-во ТГУ, 1981.
2. Гришин А. М., Грузин А. Д., Зверев В. Г. — В кн.: Теплофизика лесных пожаров. — Новосибирск, 1984.
3. Гришин А. М., Грузин А. Д., Зверев В. Г. Докл. АН СССР, 1983, 269, 4, 822.
4. Гришин А. М., Грузин А. Д., Зверев В. Г. ФГВ, 1985, 21, 1, 11.
5. Гришин А. М., Зверев В. Г. Докл. АН СССР, 1984, 267, 4, 825.
6. Исаков Р. В., Сосновский Е. И. — В кн.: Проблемы лесной пирологии. — Красноярск, 1975.

7. Исаков Р. В.— В кн.: Горение и пожары в лесу.— Красноярск, 1984.
8. Исаков Р. В. Канд. дис. Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1986.
9. Курбатский П. П.— В кн.: Вопросы лесоведения. Т. 1.— Красноярск, 1970.
10. Дубов А. С., Быкова Л. П., Маруняч С. В. Турбулентность в растительном покрове.— Л.: Гидрометеониздат, 1978.
11. Шец Дж. Турбулентное течение. Процессы вдува и перемешивания.— М.: Мир, 1984.
12. Гришин А. М., Берцун В. Н., Зинченко В. И. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения.— Томск: ТГУ, 1981.
13. Бузыкин А. М. Продуктивность сосновых лесов.— М.: Наука, 1978.

*Поступила в редакцию 22/XII 1986,
после доработки — 30/III 1987*

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОЧАГА ВНУТРИПЛАСТОВОГО ГОРЕНИЯ ПРИ ПОРЦИОННОЙ ПОДАЧЕ ВОДЫ И ВОЗДУХА В ПЛАСТ

*И. И. Богданов
(Москва)*

Внутрипластовое горение (ВГ) представляет собой совокупность взаимосвязанных процессов, каждому из которых в данных условиях соответствует свое характерное физическое время (при ВГ эти времена нередко отличаются на порядки для различных процессов и условий). Очаг горения поддерживается подводом окислителя через слой пористого пласта, освобожденного от углеводородной фазы¹, сопровождается теплообменом с окружающими пласт породами, фазовыми превращениями, конвективной и кондуктивной теплопередачей, фильтрационным переносом фаз, насыщающих пласт. Существенные различия в характерных временах приводят к тому, что относительно медленные процессы активно протекают лишь в узких зонах (например, кондуктивная теплопередача — в зонах сильных температурных градиентов) и слабо проявляются в других областях. Все это, однако, справедливо лишь при непрерывно поддерживаемом очаге реакции в пласте.

Ситуация принципиально меняется, если возникают достаточно длительные перерывы в подаче окислителя в пласт, когда тепловыделение и массообмен в реакции прекращаются. Обычно при ВГ в пласт подается смесь воды и воздуха [1]. Известно, однако, что при иницировании очага горения в прискважинной зоне воздухом за счет самовоспламенения топлива процесс может сопровождаться пульсациями с периодическим формированием обратного тока [2]. В [3] показано, что избежать пульсаций можно за счет попеременной подачи достаточно большими порциями отдельно пара и воздуха в зону иницирования. Пульсации появляются в результате взаимодействия фильтрации и горения при иницировании. Поскольку отношение характерных времен этих процессов сильно меняется с температурой, фаза притока окислителя сменяется резкой активизацией горения, формированием области повышенного давления и затем оттока окислителя в фазе релаксации давления и температуры [2]. Разделение во времени фильтрации и горения препятствует пульсационному распространению очага ВГ в прискважинной зоне. Рассмотрим подробнее эволюцию очага ВГ при временном прекращении подачи окислителя.

Постановка задачи. Система одномерных уравнений трехфазной пятикомпонентной фильтрации и баланса тепловой энергии записывается для тонкого однородного горизонтального пласта в пренебрежении капиллярным и диффузионным переносом при галерейной схеме размещения

¹ Рассматривается только проточный вариант горения.