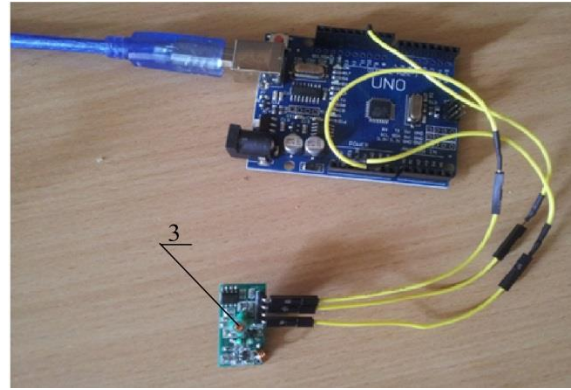


а)



б)

Рис.3. Действующий макетный образец системы контроля за движением спасателя

### Список информационных источников

1. Форум инженерия для освоения космоса (дата обращения 15.05.2016). <http://portal.tpu.ru/science/konf/tomskspace/outcomes>
2. Сигнализатор неподвижного состояния MSA AUER Motion Scout <http://www.dees.ru/?do=catalog&id=37&PHPSESSID=a65b78dc293914208fb4f81b893c4e91> (дата обращения 15.05.2016).
3. Сигнальное средство спасателя и система оповещен[Электронный ресурс]. (URL<http://сhem.net/mc/mc324.php>) . (дата обращения 15.05.2016).

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЕРХОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ С УЧЕТОМ СКОРОСТИ ВЕТРА И ПАРАМЕТРОВ ЛЕСНЫХ МАССИВОВ

*Лаутениллегер Н.Н.*

*Томский политехнический университет, г. Томск*

*Научный руководитель: Перминов В.А. к. ф-м. н., профессор кафедры  
экологии безопасности жизнедеятельности*

Лесной пожар — это неконтролируемое распространение огня по лесному массиву. В любой ситуации даже небольшое возгорание может перерасти в стихийное бедствие. В настоящее время вероятность возгорания и масштабного распространения огня из-за природных факторов не превышает 20 % [1]. Большинство лесных пожаров спровоцировано деятельностью людей. Лесные пожары наносят

большой ущерб экосистеме страны, его последствия негативны и для биоты, и для атмосферы, гидросферы, литосферы. А экономический ущерб от лесного пожара исчисляется миллиардами рублей в год.

Возникновение и распространение лесных пожаров зависит от различных условий: метеорологических (скорости и направления ветра, температуры окружающей среды, состояния атмосферы и др.), состояния лесного массива (запаса и влагосодержания лесных горючих материалов, вида растительного покрова и т.д.), а также рельефа местности и других факторов. Наиболее опасным видом пожаров являются верховые. В этом случае горение распространяется по верхнему ярусу леса. На долю данного вида пожаров приходится до 70% выгоревшей площади [1]. В связи с тем, что экспериментальные исследования верховых лесных пожаров являются очень трудоемкими и дорогостоящими, представляет интерес использование методов математического моделирования.

Пусть в бесконечном лесном массиве имеется очаг горения, заданный повышенной температурой. Предполагается, что очаг верхового пожара имеет конечные размеры и над пологом леса задана скорость ветра. Ось  $Ox_3$  направлена вверх, а оси  $Ox_1$  и  $Ox_2$  - параллельно поверхности земли (ось  $Ox_1$  совпадает с направлением ветра). Схема данного процесса представлена на рис.1. Для описания данного процесса используется постановка задачи, полученная на основе математической модели пожаров предложенной А.М. Гришиным [1].

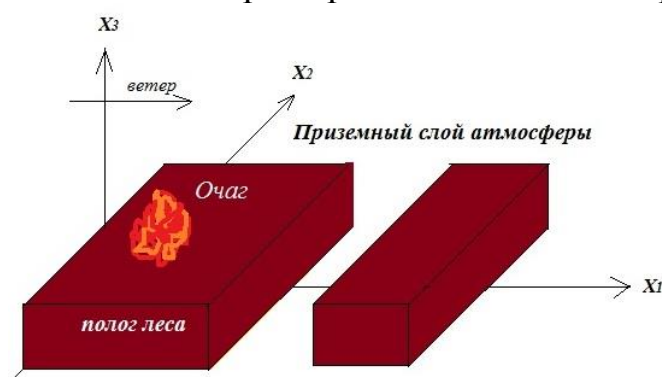


Рис.1. Схема расчётной области.

Так как вертикальные размеры лесного массива значительно меньше горизонтальных, трехмерная система дифференциальных уравнений, описывающая процессы теплопереноса в лесном массиве [1,2], может быть проинтегрирована по вертикальной координате  $x_3$ . Приводя основную систему уравнений к дивергентному виду, проинтегрируем по высоте от почвенного покрова до уровня

верхней границы полого леса. В результате получим двумерную нестационарную систему дифференциальных уравнений. Сформулированная выше задача сводится к решению следующей системы уравнений:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j) = \dot{m} - (c^- - c^+) / h, \quad j = 1, 2, \quad i = 1, 2, 3; \quad (1)$$

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{v_i' v_j'}) - \rho s c_d v_i |\vec{v}| - \rho g_i - \dot{m} v_i + (\tau_i^- - \tau_i^+) / h; \quad (2)$$

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho c_p v_j' T') + q_5 R_5 - \alpha_v (T - T_s) + (q_T^- - q_T^+) / h + k_g (c U_R - 4\sigma T^4); \quad (3)$$

$$\rho \frac{dc_\alpha}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho v_j' c_\alpha') + R_{5\alpha} - \dot{m} c_\alpha + (J_\alpha^- - J_\alpha^+) / h, \quad \alpha = 1, 2; \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_j} \right) - k c U_R + 4k_s \sigma T_s^4 + 4k_g \sigma T^4 + (q_R^- - q_R^+) / h = 0, \quad k = k_g + k_s; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^4 \rho_i c_{pi} \varphi_i \frac{\partial T_s}{\partial t} = q_3 R_3 - q_2 R_2 + k_s (c U_R - 4\sigma T_s^4) + \alpha_v (T - T_s); \quad (6)$$

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_1, \quad \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_2, \quad \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_1 - \frac{M_c}{M_1} R_3, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0; \quad (7)$$

$$\sum_{\alpha=1}^3 c_\alpha = 1, \quad p_e = \rho R T \sum_{\alpha=1}^3 \frac{c_\alpha}{M_\alpha}, \quad \vec{v} = (v_1, v_2, v_3), \quad \vec{g} = (0, 0, g), \quad (8)$$

$$\dot{m} = (1 - \alpha_c) R_1 + R_2 + \frac{M_c}{M_1} R_3,$$

$$R_{51} = -R_3 - \frac{M_1}{2M_2} R_5, \quad R_{52} = \nu(1 - \alpha_c) R_1 - R_5, \quad R_{53} = 0.$$

Скорости реакций пиролиза, испарения влаги, горения кокса, и летучих продуктов пиролиза рассчитываются по формулам:

$$R_1 = k_1 \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_s}\right), \quad R_2 = k_2 \rho_2 \varphi_2 T_s^{-0.5} \exp\left(-\frac{E_2}{RT_s}\right),$$

$$R_3 = k_3 \rho \varphi_3 s_\sigma c_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_s}\right), \quad R_5 = k_5 M_2 \left(\frac{c_1 M}{M_1}\right)^{0.25} \frac{c_2 M}{M_2} T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right). \quad (9)$$

где  $x_i$  – координаты (Рис.1);  $v_i$  – проекции скорости на оси  $x_i$ .

В представленной выше постановке задачи используются следующие обозначения:  $R_1 - R_5$ ,  $R_{5\alpha}$  – массовые скорости пиролиза лесных горючих материалов, испарения влаги, горения

конденсированных и летучих продуктов пиролиза, образования  $\alpha$  - компонентов газодисперсной фазы; объемные доли  $i$  - ой фазы (1 - сухое органическое вещество, 2-вода в жидко- капельном состоянии, 3 - конденсированные продукты пиролиза, 4 - минеральная часть, 5 - газовая фаза);  $T, T_s$  - температура газовой и конденсированной фаз;  $c_\alpha$  - массовые концентрации ( $\alpha=1$  - кислород, 2 - горючие продукты пиролиза, 3 - инертные компоненты воздуха);  $p$  - давление;  $U_R$  - плотность энергии излучения;  $\sigma$ -постоянная Стефана-Больцмана;  $k$  - коэффициент ослабления излучения;  $k_g, k_s$  - коэффициенты поглощения для газодисперсной и конденсированной фаз;  $\alpha_V$ -коэффициент обмена фаз,  $q_i, E_i, k_i$  - тепловые эффекты, энергии активации и предэкспоненты реакций пиролиза, испарения, горения кокса и летучих продуктов пиролиза;  $s_\sigma$  - удельная поверхность элемента лесных горючих материалов;  $M_o, M_c, M$  - молекулярные веса индивидуальных компонентов газовой фазы, углерода и воздушной смеси;  $s, c_d$  - удельная поверхность фитомассы и эмпирический коэффициент сопротивления полого леса;  $c$  - скорость света;  $v_i$  - проекции скорости на оси  $x_i$ ;  $\alpha_c, v$  - коксовое число и массовая доля горючих газов в массе летучих продуктов пиролиза;  $\dot{m}$  -массовая скорость образования газодисперсной фазы;  $v_{3*}$  - характерная скорость вдува из очага лесного пожара;  $\alpha_4, \alpha_6$  - эмпирические константы;  $g$  - ускорение свободного падения. Индексы "0" и "e" относятся к значениям функций в очаге горения и на большом расстоянии от зоны пожара соответственно. Верхний индекс " ' " относится к пульсационной составляющей данной величины.

Система уравнений (1) - (8) описывает процессы переноса в пологе леса. Термодинамические, теплофизические и структурные характеристики соответствуют лесным горючим материалам соснового леса [1-3] обозначения и численные значения приведены в работах [1,2].

На основе изложенной математической постановки проводились численные расчеты по определению картины процесса возникновения и распространения верхового лесного пожара от заданного очага горения. В результате численного интегрирования получены поля массовых концентраций компонент газовой фазы, температур, объемных долей компонентов твердой фазы в различные моменты времени.

Так же ходе нашей работы исследуется такой параметр лесного массива, как противопожарные разрывы различного рода (просеки, дороги, поляны и т.д.). Были проведены численные расчеты для определения значений ширины разрыва, при котором пожар переходит

его либо не преодолевает данный разрыв. Так же экспериментально получено минимальное расстояние разрыва, при котором фронт пожара останавливается и уже не распространяется на дальнейшие участки. На рисунках 2,3 представлено распределение изолиний изотермы газовой фазы  $\bar{T}$  ( $\bar{T} = T/T_e, T_e = 300K$ ): 1- 2., 2 – 2.6, 3 – 3, 4 – 3.5, 5 – 4. Изолинии концентрации кислорода ( $\bar{c}_1 = c_1/c_{1e}, c_{1e} = 0.23$ ): 1 – 0.1, 2 – 0.5, 3 – 0.6, 4 – 0.7, 5 – 0.8, 6 – 0.9. Изолинии концентрации продуктов пиролиз  $\bar{c}_2$  ( $\bar{c}_2 = c_2/c_{1e}, c_{1e} = 0.23$ ): 1- 0.1, 2 – 0.05, 3 – 0.01. Изолинии объёмных долей фаз.

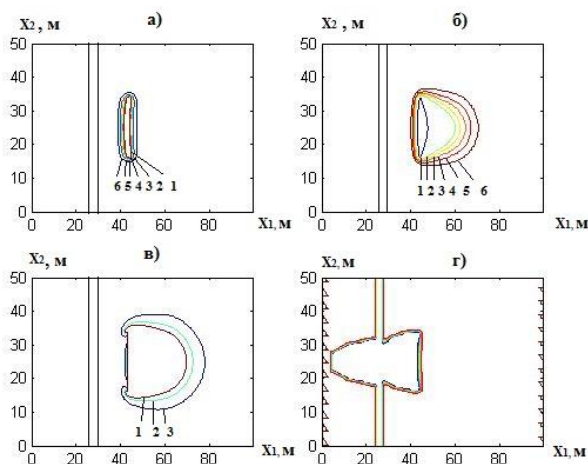


Рис.2. Распределения изолиний  $\bar{T}$ ,  $\bar{c}_1$ ,  $\bar{c}_2$  и объёмных долей фаз при наличии разрыва в 2.5м.

При заданной влажности, запасе ЛГМ и скорости ветра пожар с лёгкостью пройдёт заданный разрыв в 2.5м. Далее рассмотрим график в котором разрыв увеличен всего на 1 метр, и пожар уже не распространяется дальше.

На рис. 2,3 представлены перечисленные выше характеристики, равномерно распределенные по всей области, где есть разрывы, на рис. 2 разрыв составляет 2.5м, на рис. 3 разрыв составляет 3.5 м. Изотермы газовой фазы и изолинии концентраций кислорода и продуктов пиролиза равномерно распределены по всей области. Фронт движется по направлению ветра (ось  $x_1$ ) и расширяется в перпендикулярном направлении ветру по оси  $x_2$ .

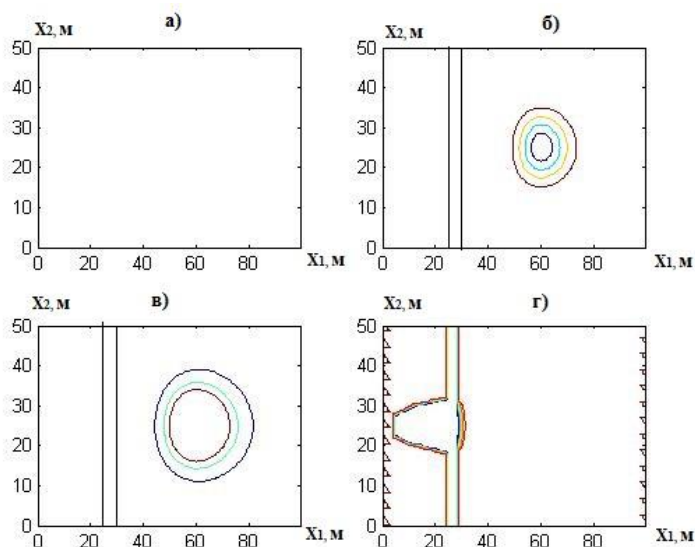


Рис.3. Распределения изолиний  $\bar{T}$ ,  $\bar{c}_1$ ,  $\bar{c}_2$  и объёмных долей фаз при наличии разрыва в 3.5м.

### Список информационных источников

1. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. -Новосибирск: Наука, 1992. –408 с.
2. Перминов В.А. Математическое моделирование возникновения верховых и массовых лесных пожаров: Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. –Томск, 2011. –39 с.
3. Патанкар С.В. Численные метода решения задач теплообмена и динамики жидкости. -М.: Энергоатомиздат, 1984. –152 с.

## ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ РОЗЛИВОВ НЕФТИ

*Лаухин Е.В.*

*Томский политехнический университет, г. Томск*

*Научный руководитель: Перминов В.А., д. ф-м.н., профессор кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности*

Разливы нефти и нефтепродуктов имеют место в процессах производства, транспортировки, переработки, хранения, приема, отпуска, а также при использовании товарных продуктов. Чрезвычайно актуальна эта проблема в России, где в связи с несоблюдением технологической дисциплины на территориях промышленных предприятий, а также в местах прохождения технологических эстакад,