

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ВОСПЛАМЕНЕНИИ ТОРФА

Р.Н. Кулеш, А.Н. Субботин

Томский политехнический университет
E-mail: ronikul@tpu.ru, subbot@inbox.ru

Исследуется влияние теплообмена на воспламенение торфа локальным внешним источником тепла цилиндрической формы. Приведена математическая модель рассматриваемого явления. На основании численных расчетов определена минимальная энергия источника заданных размеров, воспламеняющего торф при разных значениях влагосодержания и условий теплообмена источника с окружающей средой. Найдены зависимости времени прогрева от величины среднего теплового потока и влагосодержания торфа, а также критические их значения, при которых зажигание и распространение торфяного пожара не происходит. Показаны результаты экспериментальных исследований, проведенных в лабораторных условиях при разных значениях исследуемых параметров. При сравнении результатов математического моделирования с экспериментальными данными получено согласование по начальной температуре источника и времени прогрева, в результате чего можно заключить, что рассмотренная математическая модель теплообмена в торфяном пласте с достаточной для практики точностью описывает процессы зажигания и горения торфа.

Ключевые слова:

Теплообмен, торф, минимальная энергия воспламенения, источник тепла, влагосодержание.

Введение

Анализ обстановки, сложившейся в Москве и Московской области в 2002 и 2005 гг., показывает, что до настоящего времени нет действительно эффективных методов борьбы с торфяными пожарами. Те методы, которые были использованы, не эффективны и требуют больших материальных и людских ресурсов. Ситуация с торфяными пожарами в Подмосковье является типичной для многих регионов России. Чтобы разработать новые методы тушения пожаров на торфяниках, необходимо выявить определяющие параметры данного процесса, провести исследование условий возникновения пожара и закономерностей его распространения. В данной работе изучен механизм зажигания от локального источника тепла и найдена минимальная энергия зажигания в зависимости от определяющих параметров.

Физическая и математическая постановка задачи

Торфяные пожары возникают, как правило, после прохождения низового пожара от образовавшихся очаговых источников тепла (тлеющая кочка, ветка, гнилой пень и т. д.), в результате чего происходит воспламенение торфа и заглубление очага горения. Распространение низкотемпературного горения по торфянику исследовалось как в одномерной, так и в двумерной постановке в работах [1–7] и др.

В данной работе исследуются условия теплообмена, при которых может образоваться очаг горения, соответствующий схеме на рис. 1. Предполагается, что на поверхности цилиндрического торфяного пласта находится цилиндрический источник тепла радиуса r . Моделируется слой торфа пористой многокомпонентной многофазной реагирующей средой. Обозначая температуру источника в начальный момент времени T_0 , исследуем влияние теплообмена источника с окружа-

ющим воздухом и влагосодержания торфа на энергию, необходимую для его воспламенения.

Источник тепла

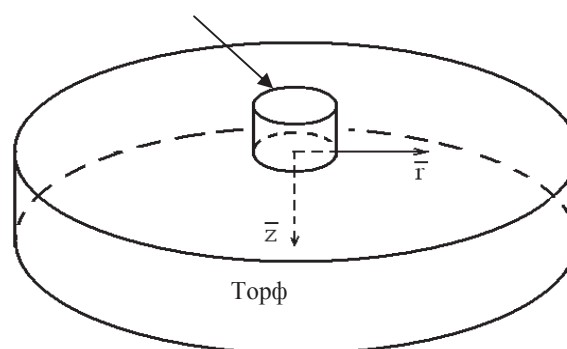


Рис. 1. Модель очага горения

Пусть в слое торфа отсутствуют неоднородности, а условия тепло- и массообмена с окружающей средой и подстилающей поверхностью одинаковые вдоль соответствующих поверхностей, тогда задача будет цилиндрически симметричной и ее целесообразно решать в цилиндрической системе координат. Поместим начало координат в центр основания источника тепла, направим ось r вдоль верхней поверхности торфа, а ось z – от верхней поверхности вглубь слоя. Будем учитывать испарение влаги, разложение торфа, гетерогенную и гомогенную реакции окисления кокса и оксида углерода. Распределением температуры по радиусу и высоте источника зажигания, в силу его высокой теплопроводности, пренебрегаем. Учитываем изменение энергии источника за счет тепловых потерь во внешнюю среду вследствие конвекции и излучения и в слой торфа вследствие молекулярной и лучистой теплопроводности. Тогда система уравнений, описывающая рассматриваемый физический процесс, будет иметь вид:

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_p, \quad \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{S2},$$

$$\rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \gamma_c R_p - R_{S3}, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \gamma_s R_p, \quad \sum_{j=1}^5 \varphi_j = 1; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_5 \varphi_5) + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}}(\bar{r} \rho_5 \varphi_5 u) + \frac{\partial}{\partial \bar{z}}(\rho_5 \varphi_5 v) =$$

$$= \gamma_g R_p + R_{S2} + R_{S3}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_5 \varphi_5 c_\alpha) + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}}(\bar{r} \rho_5 \varphi_5 u c_\alpha) + \frac{\partial}{\partial \bar{z}}(\rho_5 \varphi_5 v c_\alpha) =$$

$$= \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}}\left(\bar{r} \rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial \bar{r}}\right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial \bar{z}}\left(\rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial \bar{z}}\right) + R_{S\alpha} + R_{S5\alpha},$$

$$\alpha = 1, 2, 3, \quad \sum_{\alpha=1}^4 c_\alpha = 1; \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^5 \rho_j \varphi_j c_{pj} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_5 \varphi_5 c_{p5} \left(u \frac{\partial T}{\partial \bar{r}} + v \frac{\partial T}{\partial \bar{z}}\right) =$$

$$= \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}}\left(\bar{r} \lambda \frac{\partial T}{\partial \bar{r}}\right) + \frac{\partial}{\partial \bar{z}}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \bar{z}}\right) +$$

$$+ q_{CO} R_{CO} + q_{S3} R_{S3} - q_{S2} R_{S2}; \quad (4)$$

$$u = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial \bar{r}}, \quad v = -\frac{K}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial \bar{z}} - \rho_5 g\right),$$

$$p = \frac{\rho_5 RT}{M}, \quad M = 1 / \sum_{\alpha=1}^4 \frac{c_\alpha}{M_{5\alpha}}. \quad (5)$$

Система уравнений (1)–(5) решалась при следующих краевых условиях:

$$t = 0: \quad \varphi_j = \varphi_{jH}, \quad j = \overline{1,4}, \quad c_\alpha = c_{\alpha H}, \quad \alpha = \overline{1,3},$$

$$\rho_5 = \rho_{5H}, \quad T|_{\bar{r} \leq \bar{r}_0, \bar{z}=0} = T_0, \quad T|_{\bar{r} > \bar{r}_0, \bar{z}=0} = T_H, \quad T|_{\bar{r} \neq 0} = T_H; \quad (6)$$

$$\bar{r} = 0: \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial \bar{r}} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial \bar{r}} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial \bar{r}} = 0;$$

$$\bar{r} = L: \quad c_\alpha = c_{\alpha H}, \quad T = T_H, \quad p = p_H; \quad (7)$$

$$\bar{z} = 0: \quad p|_{\bar{r} > \bar{r}_0} = p_e, \quad \frac{\partial p}{\partial \bar{z}}|_{\bar{r} \leq \bar{r}_0} = 0,$$

$$V_0 c_0 \rho_0 \frac{dT_0}{dt} = S_0 \lambda_s \frac{\partial T}{\partial \bar{z}}|_{\bar{r} \leq \bar{r}_0} - S_e q_e,$$

$$\lambda_s \frac{\partial T}{\partial \bar{z}}|_{\bar{r} > \bar{r}_0} = \bar{\alpha}_1 (T - T_e),$$

$$\rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial \bar{z}}|_{\bar{r} > \bar{r}_0} = \beta_1 (c_\alpha - c_{\alpha e}),$$

$$\rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial \bar{z}}|_{\bar{r} \leq \bar{r}_0} = 0; \quad (8)$$

$$\bar{z} = h: \quad \frac{\partial p}{\partial \bar{z}} = -\rho_5 g, \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial \bar{z}} = 0, \quad \lambda_s \frac{\partial T}{\partial \bar{z}} = \alpha_2 (T - T_s).$$

Уравнения (1) – закон сохранения массы исходного конденсированного вещества (торфа), влаги, кокса и золы соответственно; (2) – уравнение сохранения массы газовой фазы; (3) – уравнение сохранения массы отдельных компонентов ($\alpha=1$ – кислорода, $\alpha=2$ – оксида углерода, $\alpha=3$ – водяного пара) и алгебраическое соотношение, необходимое для замыкания системы уравнений (3); (4) – уравнение сохранения энергии; (5) – уравнение движения в форме Дарси в проекциях на оси координат \bar{r} и \bar{z} и уравнение состояния; (6) – начальные условия; (7), (8) граничные условия по r и z соответственно.

В уравнениях (1)–(8) индексы 0, e, H соответствующих величинам, характеризующим источник зажигания, внешнюю среду и слой торфа (слой торфа в начальный момент времени и на большом расстоянии от источника зажигания) соответственно; t – время, с; \bar{r} , \bar{z} – цилиндрические координатные оси, м; T_s , T_e – температура подстилающей поверхности и окружающей среды, К; T_H , p_H , γ_H , $c_{\alpha H}$ – температура, давление, плотность и массовая концентрация α -компоненты в начальный момент времени в слое торфа; h и L – толщина и радиус исследуемого торфяного пласта, м; u и v – скорость фильтрации газообразных продуктов в направлении цилиндрических осей координат \bar{r} и \bar{z} , м/с; $\gamma_c = v'_3 M_3 / v_1 M_1$, $\gamma_s = v'_4 M_4 / v_1 M_1$, $\gamma_g = \sum_{\alpha=2}^4 v'_{5\alpha} M_{5\alpha} / v_1 M_1$, $\gamma_{CO} = v'_{52} M_{52} / v_1 M_1$, $\gamma_{H2O} = v'_{53} M_{53} / v_1 M_1$ – массовые доли кокса, золы, газовой фазы оксида углерода и водяного пара, образующиеся при пиролизе торфа; v_1 , v'_3 , v'_4 , $v'_{5\alpha}$ – стехиометрические коэффициенты; M_3 , M_{51} , M_{52} , M_{53} , M_{54} – атомарная масса углерода и молекулярные массы кислорода, оксида углерода, паров воды и азота, кг/моль; $\lambda = \lambda_s + \lambda_R$, $\lambda_R = 16 \sigma T^3 / s$ – лучистая теплопроводность, Вт/(м·К); $\lambda_s = \sum_{j=1}^5 \lambda_j \varphi_j$ – теплопроводность многофазной сре-

ды, Вт/(м·К); φ_j , ρ_j , c_{pj} ($j=1, \dots, 5$) – объемные доли, истинные плотности и удельные теплоемкости торфа, воды, кокса, золы и газовой фазы соответственно, м³/м³, кг/м³, Дж/(кг·К); $K = k_* \varphi_5^3 / (1 - \varphi_5)^2$ – коэффициент проницаемости, Дарси (1 Дарси = $1,022 \cdot 10^{-12}$, м²), k_* – эмпирическая константа, Дарси; φ_5 – пористость торфа; $c_{p5} = \sum_{\alpha=1}^4 c_{p5\alpha} c_\alpha$, $\lambda_s = \sum_{\alpha=1}^4 \lambda_{5\alpha} c_\alpha$ – удельная теплоемкость и теплопроводность газовой фазы в порах, Дж/(кг·К), Вт/(м·К); c_1 , c_2 , c_3 , c_4 – массовые концентрации кислорода, оксида углерода, водяного пара и инертного компонента соответственно; q_e – тепловой поток от источника зажигания в окружающую среду, Вт/м²; $q_e = \alpha_0 (T_0 - T_e) + \varepsilon_0 \sigma (T_0^4 - T_e^4)$; α_0 – коэффициент теплоотдачи, характеризующий конвективный теплообмен источника зажигания с внешней средой, Вт/(м²·К); $\varepsilon_0 \sigma T_0^4$, $\varepsilon_0 \sigma T_e^4$ – слагаемые, описыва-

вающие по закону Стефана–Больцмана лучистый теплообмен источника зажигания с окружающим его воздухом, Вт/м²; ε_0 – степень черноты источника; σ – постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м²·К⁴); T_0 – температура источника зажигания, К; T_e – температура воздуха во внешней среде К; $R_{s2} = \rho_2 \varphi_2 (k_{s2}/\sqrt{T}) \exp(-E_{s2}/RT)$, $R_p = k_p \rho_1 \varphi_1 \exp(-E_p/RT)$ – массовые скорости испарения влаги и разложения торфа, кг/(м²·с); $R_{s3} = (M_3/M_{51}) s \rho_3 \varphi_3 c_1 k_{s3} \varphi_3 (-E_{s3}/RT)$ – массовая скорость окисления кокса, кг/(м²·с); s – удельная поверхность пор, 1/м; μ – коэффициент динамической вязкости, Н·с/м²; q_{s2} , q_{s3} , q_{CO} – тепловые эффекты реакций испарения влаги, окисления кокса и оксида углерода, Дж/кг; $R_{CO} = T^{-2,25} k_{CO} (c_1 M/M_{51})^{0,25} (c_2 M/M_{52}) \exp(-E_{CO}/RT)$ – массовая скорость окисления оксида углерода, кг/(м³·с); E_{s3} , k_{s3} , E_{s2} , k_{s2} – энергии активации и предэкспоненциальные множители гетерогенных реакций горения кокса и испарения влаги, Дж/моль, м/с, а E_p , k_p , E_{CO} , k_{CO} – гомогенных реакций разложения торфа и окисления оксида углерода, Дж/моль, 1/с; α_1 , α_2 – коэффициенты теплоотдачи, характеризующие теплообмен слоя торфа с внешней средой и подстилающей поверхностью, Вт/(м²·К); для пористой поверхности коэффициент теплоотдачи вычислялся по формуле $\bar{\alpha}^1 = \alpha_1 [1 - k_1 (\rho_3 \varphi_3 v_w)]$, k – эмпирическая константа, v_w – скорость уноса газообразных продуктов из слоя торфа через верхнюю поверхность, которая вычислялась по эмпирической формуле, приведенной в [8], м/с; p – давление газообразных продуктов в порах, Па; $\beta_0 = \alpha_{0m}/c_{p5}$, $\beta_1 = \alpha_{1m}/c_{p5}$ – коэффициенты массообмена слоя торфа с очагом зажигания и внешней средой, кг/(м²·с); $\alpha_{0m} = \alpha_0 L_m$, $\alpha_{1m} = \alpha_1 L_m$, $0 \leq L_m \leq 1$; L_m – эмпирическая константа, аналог эффективного числа Льюиса–Семенова (параметр подобия процессов тепло- и массообмена); D_α – эффективный коэффициент диффузии α -компоненты, м²/с; $W = (m_{вл}/m_t) \cdot 100\%$ – влагосодержание; $m_{вл}$ – масса влаги; m_t – масса сухого торфа. Кроме того, в уравнениях (3) использованы обозначения $R_{51} = -(M_{51}/2M_{52})R_{CO}$, $R_{551} = -(M_{51}/M_3)R_{s3}$, $R_{552} = 0$, $R_{s2} = \gamma_{CO}R_p - R_{CO}$, $R_{s3} = \gamma_{H2O}R_p$, $R_{4s3} = R_{s2}$.

Результаты численных расчетов и их анализ

При численном решении краевой задачи (1)–(9) применялся итерационно-интерполяционный метод [8]. Теплофизические и кинетические величины для торфа и газообразных компонентов были взяты из работ [9–14]. Полная база данных по рассматриваемой модели приведена в работе [6]. В данной работе проводились исследования по воспламенению торфа малой степени разложения, плотность которого 60...80 кг/м³. Такой торф наиболее опасен при пожаре, т. к. пористость его очень большая и запаса окислителя достаточно для горения даже при отсутствии поступления кислорода из приземного слоя атмосферы. Рассматривалось воспламенение стальным цилиндрическим источником тепла диаметра 0,05 м и высотой 0,05 м, по-

мещенным на верхней поверхности торфяного пласта, влагосодержание которого 15 %. Вначале предполагалось, что внешняя поверхность источника тепла покрыта тепловой изоляцией, т. е. тепловые потери во внешнюю среду отсутствуют ($\varepsilon_0=0$, $\alpha_0=0$). Остывание нагретого источника происходит в данном случае лишь за счет теплоотдачи в слой торфа молекулярной и лучистой теплопроводностью через нижнее основание. В процессе решения задачи определялось количество тепла, переданного от источника через нижнее основание в слой торфа и время прогрева. Время прогрева определялось из условия смены знака теплового потока в торф. На рис. 2 время прогрева соответствует точке перегиба (t_p) кривой $T(t)$. После момента времени t_p температура торфа в области воспламенения резко увеличивается и затем начинает медленно уменьшаться.

Интегрируя тепловой поток, поступающий от источника в торф, по площади основания S_0 и по времени до момента прогрева, получим количество тепла, поступившее в торф за время прогрева. Разделив поступившее количество тепла на площадь основания и на время прогрева, получим средний тепловой поток от источника q_c . На рис. 3 показано, какой начальной температуре источника соответствует средний тепловой поток при отсутствии тепловых потерь во внешнюю среду.

Используя таким способом определяемый средний тепловой поток, были построены зависимости некоторых величин от q_c . На рис. 4 приведено время прогрева для различных значений среднего теплового потока источника. При среднем тепловом потоке менее 171 Вт/м², который соответствует начальной температуре источника равной 605 К, торф не воспламеняется. Анализируя рис. 4, приходим к выводу, что при увеличении теплового потока в три раза время прогрева уменьшается более чем в 5 раз – с 62 до 12 минут.

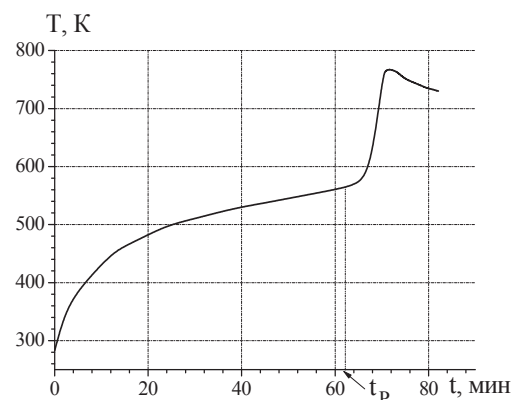


Рис. 2. Изменение со временем температуры торфа на глубине $0,8 \cdot 10^{-3}$ м

Известно, что влагосодержание влияет на процессы воспламенения и горения, поэтому были проведены расчеты по воспламенению нагретым телом торфа различного влагосодержания. На рис. 5 показано, как влияет влагосодержание торфа на

средний тепловой потока. Здесь и ниже под средним тепловым потоком понимается минимальный средний тепловой поток, при котором нагретое тело способно воспламенить торф.

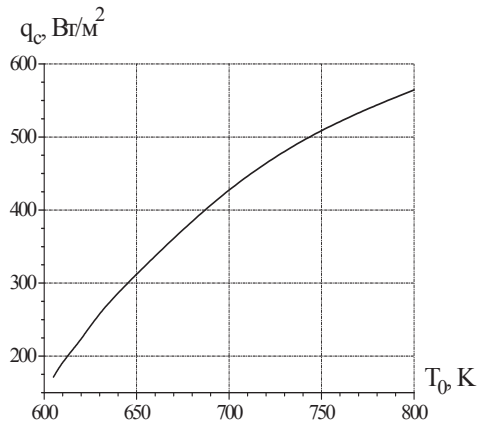


Рис. 3. Средний тепловой поток от источника заданной начальной температуры при $\alpha=20 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, $\varepsilon_0=0$, $\alpha_0=0$, $W=15 \%$, $\varphi_{\text{н}}=0,043$

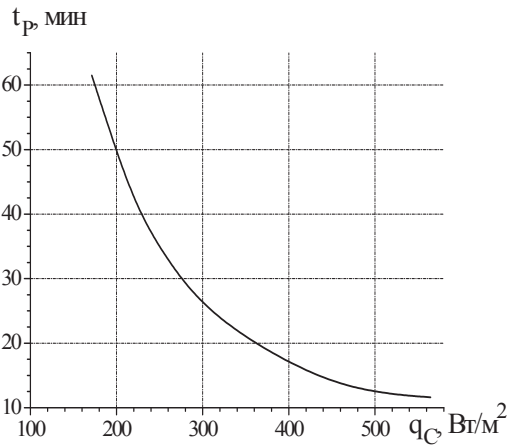
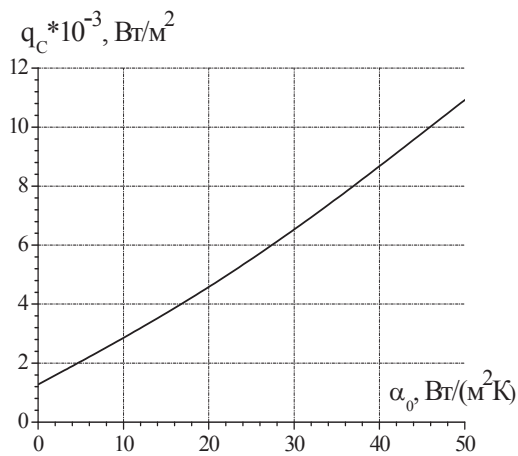


Рис. 4. Зависимость времени прогрева от среднего теплового потока источника при $\alpha=20 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, $\varepsilon_0=0$, $\alpha_0=0$, $W=15 \%$



а

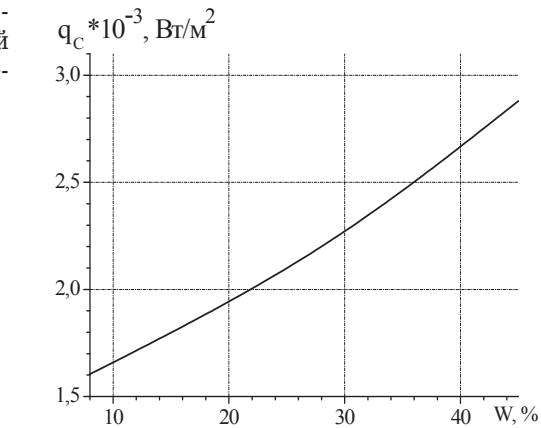
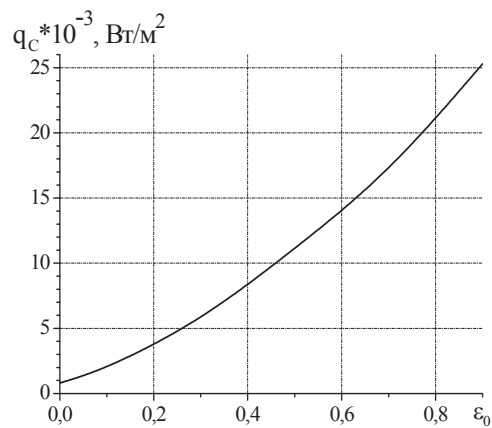


Рис. 5. Зависимость среднего теплового потока от влагосодержания торфа $\alpha_0=4,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, $\alpha=14,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, $\varepsilon_0=0,1$, $\varphi_{\text{н}}=0,043$

В работе [6], при исследовании распространения торфяного пожара при разных условиях теплообмена с внешней средой, было показано, что предельное влагосодержание торфа, по которому возможно распространение низкотемпературного горения, равно 195 % для торфа с парциальной плотностью (60...80 кг/м³) и 100 % для торфа, плотность которого равна 360 кг/м³. Численные расчеты по воспламенению влажного торфа источником тепла конечных размеров (рис. 5), который, кроме теплоотдачи в торф, теряет энергию вследствие излучения и конвективного теплообмена с приземным слоем воздуха, показали, что воспламенить торф, влагосодержание которого более 45 %, не удается. Температура нагретого тела при влагосодержании торфа 50 % варьировалась до 1300 К, в результате очень быстро образуется узкий сгоревший слой торфа, объем под источником заполняется парами воды и продуктами разложения и горения, а окислитель оттесняется в холодную область. К моменту времени, когда продукты пиролиза и горения будут вытеснены из-под источ-



б

Рис. 6. Зависимость среднего значения теплового потока источника воспламенения от его конвективного и радиационного теплообмена с окружающей средой при $\alpha=14,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, $W=15 \%$, $\varphi_{\text{н}}=0,043$; а) $\varepsilon_0=0,1$, б) $\alpha_0=4,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$

ника воздухом, прогревая область и источник зажигания остывают до такой температуры, при которой воспламенения не происходит.

Влияние степени черноты ε_0 и конвективного теплообмена источника тепла с окружающей средой на его средний тепловой поток представлено на рис. 6. Из рисунка следует, что существует довольно сильная зависимость q_c от ε_0 и α_0 . В частности при изменении ε_0 от 0 до 0,9 средний тепловой поток источника возрастает при прочих одинаковых условиях более чем в тридцать раз.

Кроме численных расчетов были проведены и лабораторные исследования по воспламенению торфа нагретым стальным цилиндром тех же размеров, которые использовались при численных расчетах. Цилиндрическая кювета высотой 0,1 м и диаметра 0,2 м с пористой боковой поверхностью заполнялась торфом плотности 650 кг/м³ и 8 % влагосодержания. Сверху по центру ставился нагретый цилиндр, который зажигал торф. Определялась минимальная начальная температура, при которой источник воспламенит торф.

В ходе эксперимента измерялась температура в слое торфа и источника тепла. Распределение температуры по слою торфа определялось с помощью термопар, расположенных под источником тепла на различной глубине и пространственно разнесенных относительно последнего. При этом фиксировался момент выравнивания температур источника и в области зажигания торфяного пласта и последующее повышение температуры в очаге горения, т. е. использовалось то же условие зажигания, что и при численных расчетах – смена знака теплового потока. На рис. 7 приведены численные и экспериментальные исследования изменения начальной температуры источника с изменением влагосодержания.

В частности, при 8 % влагосодержании торфа минимальная температура источника тепла в эксперименте оказалась равной 748 К, а время прогрева – 38,4 мин. Численные расчеты для данного

эксперимента дали значение начальной температуры источника, равное 786 К, а время прогрева 32,5 мин. Получено удовлетворительное согласование теоретических и экспериментальных данных также и по времени прогрева.

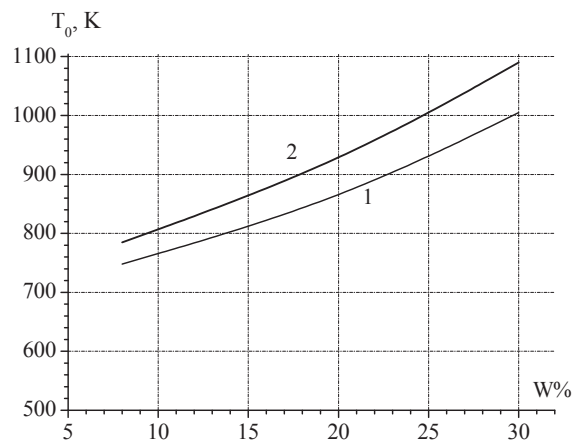


Рис. 7. Зависимость начальной температуры теплового источника от влагосодержания торфа 1) эксперимент, 2) теоретические расчеты (источник зажигания цилиндрический $h_0=2r_0$)

Заключение

Из анализа приведенных численных расчетов и лабораторных исследований следует, что рассмотренная математическая модель тепломассопереноса в торфяном пласте с достаточной для практики точностью описывает процессы зажигания и горения торфа, поэтому полученные зависимости для среднего теплового потока при разных значениях влагосодержания и условиях теплообмена можно использовать для оценки пожарной опасности торфяника.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» по мероприятию 1.3.1, номер соглашения 14.В37.21.1496.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов А.А., Борисов Ал.А., Горелик Р.С. Экспериментальные исследования и математическое моделирование торфяных пожаров // Теплофизика лесных пожаров. – Новосибирск: Наука, 1984. – С. 5–12.
2. Субботин А.Н. Математическое моделирование распространения фронта пожара на торфяниках / Механика реагирующих сред и ее приложения: сборник научных трудов. – Новосибирск: Наука, 1989. – С. 57–63.
3. Субботин А.Н. О некоторых особенностях распространения подземного пожара // Инженерно-физический журнал. – 2003. – Т. 76. – № 5. – С. 159–165.
4. Субботин А.Н. Влияние тепломассообмена на критические условия зажигания и горения торфяника // Сибирский физико-технический журнал. – 1992. – В. 6. – С. 133–137.
5. Субботин А.Н. Закономерности развития подземного пожара при разных условиях тепло- и массообмена с внешней средой // Тепломассообмен ММФ. – 2000. – Т. 4. – С. 224–231.
6. Субботин А.Н. Распространение торфяного пожара при разных условиях тепломассообмена с внешней средой // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – Т. 16 – № 5. – С. 42–49.
7. Звягильская А.И., Субботин А.Н. Влияние влагосодержания и тепло- и массообмена с окружающей средой на критические условия возникновения очага низового пожара // Физика горения и взрыва. – 1996. – Т. 32. – № 5. – С. 99–106.
8. Гришин А.М., Зинченко В.И., Субботин А.Н. и др. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. – Томск: Изд-во ТГУ, 2004. – 320 с.
9. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. – Новосибирск: Наука, 1992. – 408 с.
10. Теплотехнический справочник: в 2-х т. Т. 2 / под ред. В.Н. Юренина, Н.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1976. – 896 с.
11. Щетинков Е.С. Физика горения газов. – М.: Наука, 1965. – 739 с.
12. Померанцев В.В. и др. Основы практической теории горения. – Л.: Энергия, 1986. – 310 с.
13. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
14. Борисов А.А., Киселев Я.С., Удилов В.П. Кинетические характеристики низкотемпературного горения торфа // Теплофизика лесных пожаров. – Новосибирск: Наука, 1984. – С. 23–30.

Поступила 20.09.2013 г.

UDC 536.24:533.6

MATHEMATICAL MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER AT PEAT IGNITION

R.N. Kulesh, A.N. Subbotin

Tomsk Polytechnic University

The authors have studied the influence of heat and mass transfer on peat ignition with a local external heat source of cylindrical shape. The paper introduces the mathematical model of this phenomenon. Based on numerical calculations the minimum energy of a specified dimension source was determined. The source inflames peat at different moisture values and conditions of source heat exchange with the environment. The authors found out the dependences of warm-up time on average heat flow value and peat moisture content as well as their critical values at which the ignition and peat fire spread do not occur. The paper introduces the results of laboratory experiments at different values of the studied parameters. When comparing the results of mathematical modeling and the experimental data the authors obtained the matching in source initial temperature and heating time; one can conclude that the studied mathematical model of heat and mass transfer in peat formation describes peat ignition and burning with accuracy sufficient for practice.

Key words:

Heat-Mass Exchange, peat, minimum energy of ignition, source of heat, moisture content.

REFERENCES

1. Borisov A.A., Borisov A.I., Gorelik R.S. *Ekspериментальные исследования и математическое моделирование торфяных пожаров. Теплофизика лесных пожаров* (Experimental research and mathematical modeling of peat fires. Thermal physics of wild fires). Novosibirsk, Nauka, 1984. pp. 5–12.
2. Subbotin A.N. *Математическое моделирование распространения фронта пожара на торфяниках. Механика реагирующей среды и ее приложения. Сборник научных трудов* (Mathematical modeling of fire front propagation in peat bogs. Mechanics of agents and its application. Proceedings). Novosibirsk, Nauka, 1989. pp. 57–63.
3. Subbotin A.N. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 2003. 76, 5, pp.159–165.
4. Subbotin A.N. *Sibirskiy fiziko-tekhnicheskiy zhurnal*, 1992. 6, pp. 133–137.
5. Subbotin A.N. *Teplomassoobmen MMF*, 2000. 4, pp. 224–231.
6. Subbotin A.N. *Pozharovzryvobezopasnost*, 2007. 16, 5, pp. 42–49.
7. Zvyagil'skaya A.I., Subbotin A.N. *Fizika goreniya i vzryva*, 1996. 32, 5, pp. 99–106.
8. Grishin A.M., Zinchenko V.I., Subbotin A.N. *Iteratsionno-interpolyatsionnyy metod i ego prilozheniya* (Iterated-Interpolation method and its supplement). Tomsk, Tomsk State University Publ., 2004. 320 p.
9. Grishin A.M. *Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними* (Mathematical modeling of wild fires and new methods to control them). Novosibirsk, Nauka, 1992. 408 p.
10. Yureneva V.N., Lebedeva N.D. *Teplotekhnicheskiy spravochnik* (Heat engineering catalogue). Moscow, Energiya, 1976. 2, 896 p.
11. Shchetnikov E.S. *Fizika goreniya gazov* (Physics of gas combustion). Moscow, Nauka, 1965. 739 p.
12. Pomerantsev V.V. *Osnovy prakticheskoy teorii goreniya* (Fundamentals of practical combustion theory). Leningrad, Energiya, 1986. 310 p.
13. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* (Reference book on thermal physical properties of gases and liquids). Moscow, Nauka, 1972. 720 p.
14. Borisov A.A., Kiselev Ya.S., Udilov V.P. *Kineticheskie kharakteristiki nizkotemperaturnogo goreniya torfa. Теплофизика лесных пожаров* (Kinetic performance of low-temperature peat combustion. Thermal physics of wild fires). Novosibirsk, Nauka, 1984. pp. 23–30.