

УДК 533.6.011.6

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ ПОЛОГА ЛЕСА ТЕПЛОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ПРИ ВЗРЫВЕ УГЛЕВОДОРОДОВ

Э. Алтамирова, В. А. Перминов

Томский политехнический университет, 634050 Томск, soprunenko.elina@yandex.ru, perminov@tpu.ru

На основе законов механики реагирующих сред представлена физико-математическая постановка задачи о зажигании полога леса, приведены результаты численных расчетов времени и радиуса зажигания лесного массива при воздействии на него источника теплового излучения — огненного шара, возникающего в результате взрыва углеводородов. Полог леса (совокупность крон деревьев) рассматривается как однородная двухтемпературная пористая реагирующая среда. Описаны изменения температур и концентраций на верхней границе полога леса от начала его нагрева до момента зажигания.

Ключевые слова: огненный шар, тепловое излучение, зажигание, лесной горючий материал, лесные пожары.

DOI 10.15372/FGV20190508

ВВЕДЕНИЕ

Повышение уровня промышленной безопасности опасных производственных объектов газодобывающих предприятий до сих пор остается актуальной проблемой. Осуществление эффективных профилактических мероприятий по предупреждению аварий, а при их наступлении — быстрая отлаженная локализация и ликвидация требуют максимально точного и оперативного определения зоны поражения объектов окружающей среды. Такие аварии сопровождаются не просто пожарами и выбросами токсичных веществ в воздух, но и взрывами с образованием огненного шара (ОШ), что вызывает наибольшую тревогу и опасения специалистов. Натурные и лабораторные эксперименты этого явления трудноосуществимы и затратны. Наиболее эффективным и доступным инструментом для исследования этой проблемы является метод математического моделирования.

За последний век произошли сотни аварий и десятки катастроф, сопровождаемых взрывами с образованием огненного шара.

Основную опасность при образовании ОШ представляет тепловое излучение.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований — Томская область (проект № 16-41-700022) и гранта программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

© Алтамирова Э., Перминов В. А., 2019.

Методы расчета, используемые в настоящее время при составлении ГОСТ и в методических документах [1–3], основаны на обработке результатов экспериментов и описывают определяющие интегральные параметры ОШ как функции массы вовлеченного топлива. Такие методы дают возможность определить эффективный диаметр ОШ, время его существования и интенсивность теплового излучения. Однако в существующих методах расчета не учитывается текущее состояние конкретного объекта окружающей среды.

Главной целью работы является определение времени и радиуса зажигания лесных горючих материалов (ЛГМ) при воздействии источника теплового излучения на полог леса с учетом состояния ЛГМ, термических и физико-химических процессов, протекающих в этот период в пологе леса.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Постановка численного эксперимента заключалась в расчете аварий с взрывами пропана различной массы ($10 \div 50$ т) в условиях изменяющегося влагосодержания ЛГМ ($0.4 \div 0.6$). Исходная масса топлива принималась согласно опубликованным материалам расследования аварий на производственных объектах [4]. Изменение влагосодержания ЛГМ отражало различные сезонные состояния растительности и текущие погодные условия. Другие характеристики ЛГМ (термоди-

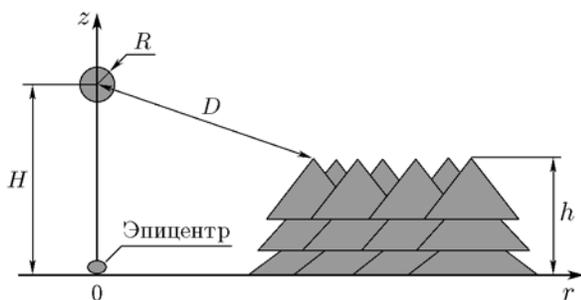


Рис. 1. Модель воздействия светового излучения от огненного шара на полог леса

намические, теплофизические и структурные) при численном решении задачи соответствовали ЛГМ соснового леса.

Прежде всего, задавая в качестве исходных данных массу углеводородов и влагосодержание ЛГМ, необходимо вычислить, на каком расстоянии от эпицентра взрыва может произойти возгорание лесной растительности. Источник лучистой энергии находится на высоте H от поверхности Земли (рис. 1). Так как его размеры малы по сравнению с расстоянием до полога леса, источник излучения считается точечным, D — расстояние от центра ОШ до текущей точки поверхности лесного массива, h — высота лесного массива, r^* — радиус зоны зажигания. С поверхности ОШ на верхнюю границу $z = h$ лесного массива действует интенсивный тепловой поток $q_R(r, t)$, который ослабляется по мере удаления от эпицентра.

Максимум интенсивности источника достигается в момент времени t_m , далее интенсивность затухает с расстоянием согласно данным о $q_R(r, t)$ [5–7]. Соответствующая зависимость может быть аппроксимирована следующим образом [5]:

$$q_R(r, t) = \frac{t_p P_m \sin L}{4\pi D^2} \begin{cases} t/t_m, & t \leq t_m, \\ \exp(-k_0(t/t_m - 1)), & t \geq t_m, \end{cases} \quad (1)$$

$$t_m = 0.032 w_0^{0.5}, \quad (2)$$

$$P_m = 4w_0^{0.5}, \quad (3)$$

где t_p — коэффициент пропускания атмосферы; P_m — максимальный световой импульс в момент времени t_m , кДж/с; L — угол между

направлением вектора плотности потока излучения и верхней границей растительного покрова; w_0 — мощность источника, кДж; k_0 — аппроксимационный коэффициент ($k_0 = 0.75$).

Перенос лучистой энергии в растительный покров лесного массива ($z_0 \leq z \leq h$) вызывает нагрев ЛГМ, затем испарение влаги и термическое разложение конденсированной фазы с выделением летучих продуктов пиролиза.

Газовая фаза представлена кислородом, горючими продуктами пиролиза, продуктами горения и инертными компонентами, конденсированная фаза — сухим органическим веществом, влагой, конденсированными продуктами пиролиза. Поступление тепловой энергии в растительный материал инициирует нагрев ЛГМ, затем происходят испарение влаги и пиролиз с выделением летучих продуктов последнего, которые, взаимодействуя с кислородом воздуха, сгорают в атмосфере.

Для описания данного процесса используется система дифференциальных уравнений, выражающих законы сохранения в рассматриваемой области. Математически задача сводится к решению системы дифференциальных уравнений, полученных на основе общей математической модели. Расчетная область разбивается на конечное число объемов, затем для каждого из них записывается баланс субстанции (энергии, импульса, массы и т. д.) [8]. Типичный контрольный объем для одномерного случая показан на рис. 2.

Дискретный аналог для данной краевой задачи получен методом контрольного объема Патанкара. Решение алгебраических уравнений осуществлялось методом прогонки (алгоритм трехдиагональной матрицы TDMA). Скорость сходимости метода прогонки (TDMA) достаточно высока, так как сведения о граничных условиях на концах линии мгновенно переходят во внутреннюю долю области вне зависимости от числа точек на линии [8].

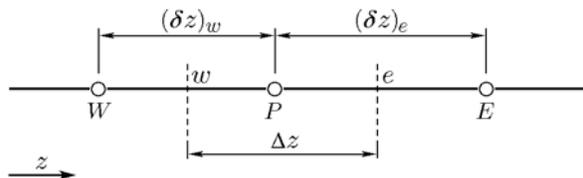


Рис. 2. Типичный контрольный объем в случае одномерного приближения

Предполагалось, что скорость ветра в рассматриваемой области лесного массива мала по сравнению со скоростью подъема нагретых газообразных продуктов горения и притоком окружающего воздуха в зону горения. Это позволяет рассматривать задачу в квазиодномерной постановке, которая сводится к решению следующей системы уравнений [5]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = \dot{m}; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w^2) = \\ = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}(-\overline{\rho w'^2}) - \rho s C_d w^2 - \rho g; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w c_p T) = \frac{\partial}{\partial z}(-\rho c_p \overline{w' T'}) + \\ + k_g(cU_R - 4\sigma T^4) + q_5 R_5 + \alpha_v(T_s - T); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho C_\alpha) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w C_\alpha) = \\ = \frac{\partial}{\partial z}(-\rho w' C'_\alpha) + R_{5\alpha}, \quad \alpha = 1, 2; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial z} \right) - kcU_R + \\ + 4\sigma(k_g T^4 + k_s T_s^4) = 0, \quad k = k_g + k_s; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^4 \rho_i c_{pi} \varphi_i \frac{\partial T_s}{\partial t} = q_3 R_3 - q_2 R_2 + \\ + k_s(cU_R - 4\sigma T_s^4) + \alpha_v(T - T_s); \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_1, \quad \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_2, \\ \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_1 - \frac{M_c}{M_1} R_3, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\sum_{\alpha=1}^3 C_\alpha = 1, \quad P_e = \rho RT \sum_{\alpha=1}^3 \frac{C_\alpha}{M_\alpha},$$

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

$$R_{51} = -R_3 - \frac{M_1}{2M_2} R_5,$$

$$R_{52} = v(1 - \alpha_c)R_1 - R_5;$$

$$R_1 = k_1 \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_s}\right), \quad (11)$$

$$R_2 = k_2 \rho_2 \varphi_2 T_s^{-0.5} \exp\left(-\frac{E_2}{RT_s}\right),$$

$$R_3 = k_3 \rho_3 \varphi_3 s_\sigma C_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_s}\right),$$

$$\begin{aligned} R_5 = M_2 k_5 \left(\frac{C_1 M}{M_1} \right)^{0.25} \times \\ \times \left(\frac{C_2 M}{M_2} \right) T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right). \end{aligned}$$

Сформулированная задача решалась с учетом следующих начальных и граничных условий:

$$t = 0: \quad w = 0, \quad T = T_e, \quad T_s = T_e, \quad C_\alpha = C_{\alpha e}, \quad (12)$$

$$\varphi_i = \varphi_{ie}, \quad i = 1, 2, 3;$$

$$z = z_0: \quad \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial C_\alpha}{\partial z} = 0, \quad (13)$$

$$-\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial z} = \frac{\varepsilon}{2(2 - \varepsilon)} (4\sigma T_s^4 - cU_R);$$

$$z = h: \quad \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial C_\alpha}{\partial z} = 0, \quad (14)$$

$$\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial z} + \frac{c}{2} U_R = 2q_R(r, z).$$

Здесь z — координата, отсчитываемая от поверхности земли; r — ось вдоль поверхности земли; w — проекция скорости на ось z ; \dot{m} — массовая скорость образования газодисперсной фазы; g — ускорение свободного падения; T , T_s — температура газовой и конденсированной фаз; U_R — плотность энергии излучения; c — скорость света; σ — постоянная Стефана — Больцмана; c_{pi} , ρ_i , φ_i — удельная теплоемкость, истинная плотность и объемная доля i -й фазы ($i = 1$ — сухое органическое вещество, 2 — вода в жидкокапельном состоянии, 3 — конденсированные продукты пиролиза, 4 — минеральная часть, 5 — газовая фаза); C_α — массовая концентрация ($\alpha = 1$ — кислород, 2 — CO, 3 — инертные компоненты воздуха (N₂, CO₂, водяной пар)); R_1 – R_5 ,

$R_{5\alpha}$ — массовые скорости пиролиза, испарения влаги, горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза, образования компонентов α газодисперсной фазы; k — коэффициент ослабления излучения; k_g, k_s — коэффициенты поглощения для газодисперсной и конденсированной фаз; α_v — коэффициент обмена фаз; s_σ — удельная поверхность элемента ЛГМ; s — удельная поверхность фитомассы, C_d — эмпирический коэффициент сопротивления растительного покрова; α_c, v — коксовое число и массовая доля горючих газов в летучих продуктах пиролиза; q_i, E_i, k_i — тепловые эффекты, энергии активации и предэкспоненты реакций пиролиза, испарения, горения кокса и летучих продуктов пиролиза; M_α, M_c, M — молекулярные массы индивидуальных компонентов газовой фазы, углерода и воздушной смеси; p — давление. Верхний индекс штрих относится к пульсационной составляющей величины. Принятые при численном решении задачи термодинамические, теплофизические и структурные характеристики соответствуют ЛГМ соснового леса [5]: $E_1/R = 4562$ К, $k_1 = 3.36 \cdot 10^4$ с⁻¹, $q_1 = 0$ Дж/кг, $E_2/R = 2720$ К, $k_2 = 6 \cdot 10^5$ с⁻¹, $q_2 = 3 \cdot 10^6$ Дж/кг, $E_3/R = 9000$ К, $k_3 = 10^3$ с⁻¹, $q_3 = 1.2 \cdot 10^7$ Дж/кг, $E_5/R = 11500$ К, $k_5 = 3 \cdot 10^{13}$ с⁻¹, $q_5 = 10^7$ Дж/кг, $c_{p1} = 2000$ Дж/(кг·К), $c_{p2} = 4180$ Дж/(кг·К), $c_{p3} = 2000$ Дж/(кг·К), $c_p = 1100$ Дж/(кг·К), $s_\sigma = 1000$ м⁻¹, $s_{cd} = 0.02$, $\alpha_c = 0.06$, $\rho_4\phi_4 = 0.08$ кг/м³, $v = 0.7$, $\rho_1 = 500$ кг/м³, $\rho_2 = 1000$ кг/м³, $\rho_3 = 200$ кг/м³, $C_{1e} = 0.23$, $C_{2e} = 0$, $p_e = 10^5$ Н/м², $T_e = 300$ К.

Для замыкания системы уравнений (4)–(11) компоненты тензора турбулентных напряжений, а также турбулентные потоки тепла и массы записываются через градиенты среднего течения согласно [9, 10]. Используя допущение, предположенное в [9], о том, что в уравнении для кинетической энергии турбулентности можно пренебречь нестационарным и конвективными членами, а также членами диффузии турбулентной кинетической энергии, приходим к явному выражению для кинетической энергии турбулентности и турбулентной динамической вязкости. Полученные таким образом формулы соответствуют локально-равновесной модели турбулентности [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчеты воздействия источника теплового излучения на полог леса проводились для массы топлива $m = 10$ т и влагосодержания $W = 0.6$ на расстоянии 36 м от эпицентра (рис. 3).

С повышением температуры в пологе леса начинаются процессы нагрева, сушки и пиролиза ЛГМ. Протекание физико-химических процессов на верхней границе полога леса иллюстрируют рис. 4 и 5 в виде изменения концентраций и объемных фаз в рассматриваемой области.

Из рис. 3 видно, что температура твердой фазы превышает газовую, так как прогрев в пологе леса осуществляется за счет внешнего

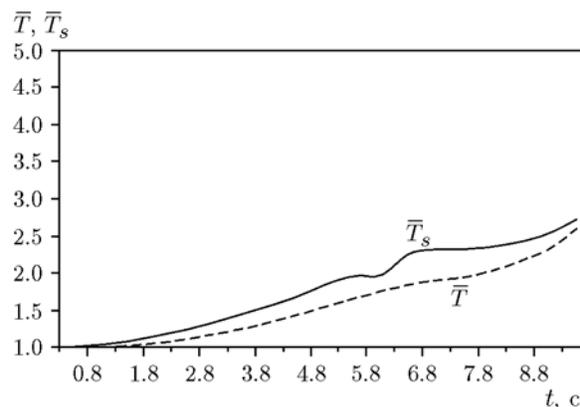


Рис. 3. Распределение температур газовой (\bar{T}) и твердой (\bar{T}_s) фаз на верхней границе полога леса до момента зажигания:

$$\bar{T} = T/T_e, \bar{T}_s = T_s/T_e, T_e = 300 \text{ К}$$

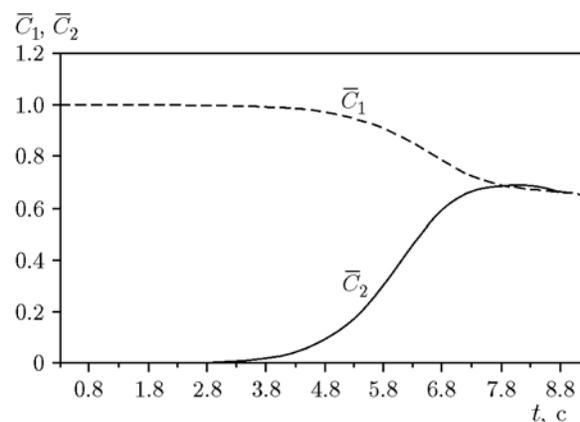


Рис. 4. Распределение концентраций кислорода (\bar{C}_1) и оксида углерода (\bar{C}_2) на верхней границе полога леса до момента зажигания:

$$\bar{C}_\alpha = C_\alpha/C_{\alpha e} \quad C_{1e} = 0.23, C_{2e} = 0.23$$

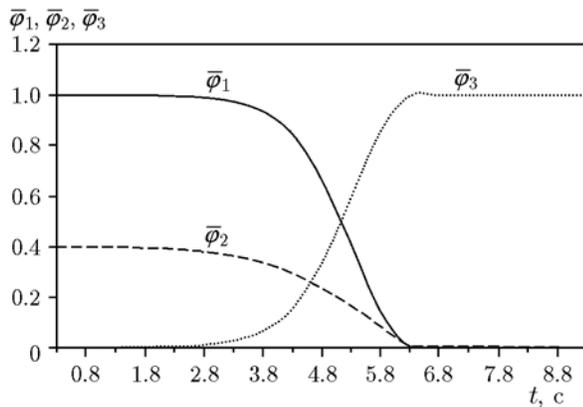


Рис. 5. Распределение объемных фаз сухого органического вещества ($\bar{\varphi}_1$), воды в жидкокапельном состоянии ($\bar{\varphi}_2$) и коксика ($\bar{\varphi}_3$) на верхней границе полога леса до момента зажигания:

$$\bar{\varphi}_1 = \varphi_1/\varphi_{1,e}, \bar{\varphi}_2 = \rho_2\varphi_2/\rho_e, \bar{\varphi}_3 = \rho_3\varphi_3/\alpha_c\rho_1\varphi_{1,e}, \varphi_{1,e} = 0, \rho_e = 0.2 \text{ кг/м}^3$$

потока излучения. При интенсивном испарении воды ее объемная доля $\bar{\varphi}_2$ вместе с объемной долей сухого органического вещества $\bar{\varphi}_1$ уменьшается (см. рис. 5). При этом образующиеся газообразные горючие продукты пиролиза полностью не выгорают. В рассматриваемой области возникает облако газообразных горючих продуктов пиролиза, смешанных с воздухом.

На рис. 6 показано распределение теплового потока q_R на верхней границе полога леса от начала нагрева ЛГМ до момента его зажигания на максимальном расстоянии от эпицентра, при котором зажигание еще происходит, — 36 м. Максимальное значение теплового потока в момент зажигания ЛГМ равно 7.2 кВт/м^2 .

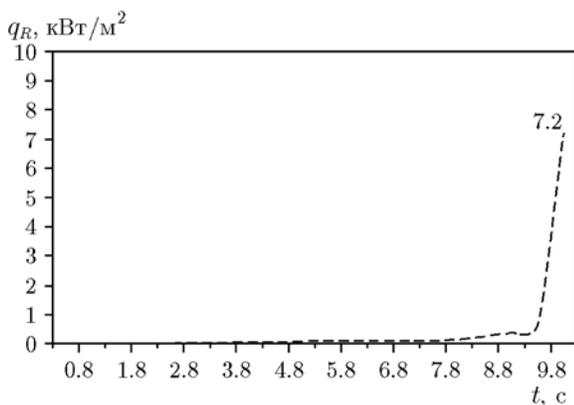


Рис. 6. Распределение теплового потока на верхней границе полога леса

Этот результат численного эксперимента хорошо согласуется с нормативным значением критического теплового потока, при котором происходит зажигание ЛГМ, — 7 кВт/м^2 , приведенным в [2].

Результаты численных расчетов максимального расстояния от эпицентра взрыва до полога леса (радиус зажигания), на котором происходит зажигание ЛГМ, при варьировании их влагосодержания представлены на рис. 7. Видно, что с увеличением массы топлива радиус зажигания ЛГМ увеличивается с 36 до 96 м. С ростом влагосодержания ЛГМ радиус зажигания уменьшается в среднем на $6 \div 16 \text{ м}$ для масс топлива $m = 10 \div 50 \text{ т}$: с 42 до 36 м при $m = 10 \text{ т}$; с 60 до 54 м при $m = 20 \text{ т}$; с 72 до 64 м при $m = 30 \text{ т}$; с 84 до 72 м при $m = 40 \text{ т}$; с 96 до 80 м при $m = 50 \text{ т}$. Полученные данные вполне закономерны: с увеличением массы топлива увеличивается и масса углеводородов, участвующая в образовании ОШ, что приводит к росту всех его определяющих параметров, в том числе и интенсивности тепловыделения с поверхности ОШ и, как следствие, нагрева полога леса.

На рис. 8 показано влияние массы топлива на время и радиус зажигания при влагосодержании ЛГМ $W = 0.6$. Увеличение радиуса зажигания ЛГМ с ростом массы топлива характерно как для основного параметра безопасности — максимального радиуса зажигания, так и для промежуточных расстояний. Радиус и соответствующее время зажигания для каждой массы топлива находятся в следующих пределах:

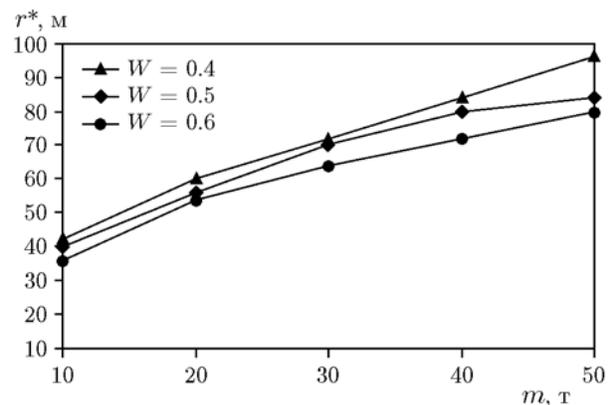


Рис. 7. Зависимость радиуса зажигания от массы и влагосодержания топлива

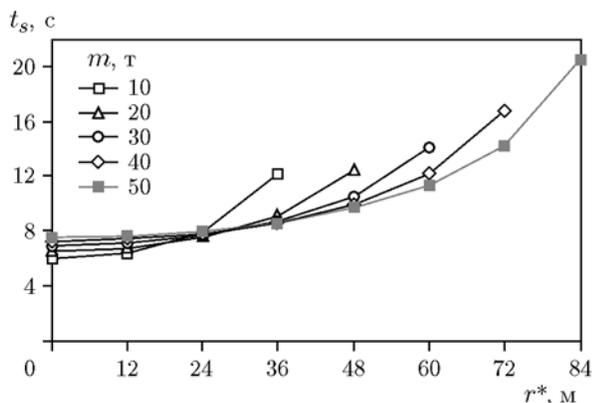


Рис. 8. Зависимость времени и радиуса зажигания от массы топлива

$$\begin{aligned}
 m = 10 \text{ т: } & t = 6.03 \div 12.25 \text{ с, } r^* = 36 \text{ м;} \\
 m = 20 \text{ т: } & t = 6.57 \div 12.42 \text{ с, } r^* = 48 \text{ м;} \\
 m = 30 \text{ т: } & t = 6.97 \div 14.19 \text{ с, } r^* = 60 \text{ м;} \\
 m = 40 \text{ т: } & t = 7.27 \div 16.89 \text{ с, } r^* = 72 \text{ м;} \\
 m = 50 \text{ т: } & t = 7.52 \div 20.54 \text{ с, } r^* = 84 \text{ м.}
 \end{aligned}$$

Для проверки сеточной сходимости число контрольных объемов было увеличено в два раза, что не привело к изменению размеров радиуса зажигания.

ВЫВОДЫ

В работе численно решена задача о зажигании полога леса тепловым излучением огненного шара, возникающего при взрыве углеводородов. Изучены термические и физико-химические процессы, протекающие в пологе леса, с учетом запаса и текущего влагосодержания ЛГМ.

Получены значения максимального радиуса зажигания при взрыве различных масс топлива с учетом влагосодержания ЛГМ. Из полученных результатов следует, что без учета влагосодержания ЛГМ — величины, сезонно и метеорологически меняющейся, невозможно получить достоверные данные о радиусе зажигания.

Валидация полученных данных численного эксперимента осуществлялась по определяющему параметру — критическому значению теплового потока для зажигания лесного массива; его величина согласуется с установленными нормативными значениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 12.3.047-2012.** ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. — Утв. Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2012 г. — № 1971-ст.
2. **СТО Газпром 2-2.3-400-200.** Методика анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром». — Разработан обществом с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий — Газпром ВНИИГАЗ». — М., 2009.
3. **Методика** оценки пожаробезопасных расстояний при проектировании промышленных предприятий. — Федеральное автономное учреждение «Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве». — М., 2016.
4. **Маршалл В.** Основные опасности химических производств. — М.: Мир, 1989.
5. **Гришин А. М., Перминов В. А.** Зажигание лесных массивов под действием высотного источника лучистой энергии // Вычислит. технологии. — 1997. — Т. 2, № 2. — С. 33–43.
6. **Перминов В. А.** Математическое моделирование возникновения верховых и массовых лесных пожаров: дис. . . д-ра физ.-мат. наук / Том. гос. ун-т. — Томск, 2010.
7. **Гришин А. М.** Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. — Новосибирск: Наука, 1992.
8. **Патанкар С. В.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
9. **Гришин А. М., Грузин А. Д., Зверев В. Г.** Математическая теория верховых лесных пожаров // Теплофизика лесных пожаров. — Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1984.
10. **Монин А. С., Яглом А. М.** Статистическая гидромеханика. — М.: Наука, 1965. — Ч. 1.

Поступила в редакцию 09.04.2018.

После доработки 02.08.2018.

Принята к публикации 12.09.2018.