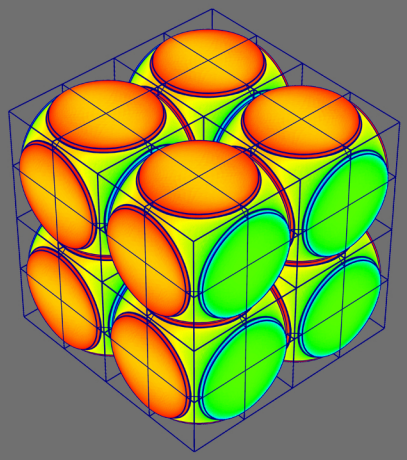
ISSN 2309-3684



Математическое моделирование и численные методы

Катаева Л.Ю., Ильичева М.Н., Лощилов А.А. Математическое моделирование тушения лесного пожара путем доставки воды в его очаг с помощью капсул с термически активной оболочкой. Математическое моделирование и численные методы. 2020. № 2. с. 59–80.

Источник: https://mmcm.bmstu.ru/articles/222/

Параметры загрузки:
IP: 216.73.217.22
18.11.2026 12:59:49

УДК 517.927.4: 614.841.1 DOI: 10.18698/2309-3684-2020-2-5980

Математическое моделирование тушения лесного пожара путем доставки воды в его очаг с помощью капсул с термически активной оболочкой

© Л.Ю. Катаева[1,2], М.Н. Ильичева[1], А.А. Лощилов[1]

[1]ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева», Нижний Новгород, 603950, Россия
[2]Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, 443066, Россия

В работе проведен численный анализ процессов тушения крупных лесных пожаров с применением капсул воды в термически активной оболочке. Предложена интегральная характеристика для капсул, позволяющая учесть процесс разрушения оболочки при перемещении ее в горячей среде. Предложен простой алгоритм, позволяющий учесть последовательное движение капсул друг за другом с учетом процессов распыления жидкости и процессов тепло- и массообмена. Распыление жидкости происходит в виде высвобождения дисперсных частиц жидкости и подчинено нормальному закону. В работе исследуется динамика процессов тушения лесного пожара при разных сценариях сброса капсул и интегрального параметра термоустойчивости оболочки. Показано, что полученные результаты хорошо согласуются по количеству тушащего состава, необходимого для тушения с результатами Гундар и Абдурагимова. Выполнен анализ таких ключевых параметров как термоустойчивость и количество последовательно сбрасываемых капсул. Анализ результатов численного моделирования показал, что значение интегрального параметра термоустойчивости является ключевым при тушении лесных пожаров, так как именно он определяет зону распыления дисперсных частиц тушащего состава. Если значение термоустойчивости слишком высокое, то капсулы пролетают зону уязвимости пожара и распыление тушащего состава происходит близко к поверхности земли. В случае слишком маленького значения параметра термоустойчивости - капсулы начинают распылять воду, не достигая зоны уязвимости пожара, и уносятся конвективными потоками, сформированными пожаром. Сброс капсул последовательно - позволяет более равномерно распределить тушащий состав по вертикали, покрывая зону уязвимости пожара. На основе полученных результатов можно с уверенностью сказать, что более эффективное тушение лесных пожаров можно осуществлять, используя «умную» термически активную оболочку, позволяющую доставить тушащий состав в зону уязвимости пожара.

Ключевые слова: *моделирование тушения, лесной пожар, механика реагирующих сред, численное моделирование, термически активная оболочка, капсулы с водой*

Введение. Увеличение масштабов лесных пожаров приводит к необходимости повышения эффективности различных способов тушения [1, 2]. Наибольшие трудности при локализации горения возникают в труднодоступных и удаленных районах. Добраться в такие районы наиболее быстро можно с помощью авиации. Однако эффективность дорогостоящих авиационных технологий не всегда соответствует возлагаемых на них ожиданиям. При сбросе большой массы жидкости

с самолета на высокой скорости с высоты коэффициент использования воды составляет менее двух процентов, при сбросе с вертолета при меньшей стоимости полета коэффициент будет в два-три раза больше [3, 4, 5]. Сброшенная вода с большой высоты превращается в облако мелкодисперсных капель и до попадания в очаг горения они успевают испариться [6]. При бреющем полете возможно формирование турбулентного течения, которое обеспечит приток кислорода для усиления пожара [7].

Множество экспериментов и теоретических исследований по технологии тушения распыленной водой доказали высокую эффективность при подаче в зону уязвимости пожара. Одним из примеров применения технологии пожаротушения «water mist» водяного тумана для охлаждения и удаления кислорода из источника горения в закрытых помещениях является установка SEMSAFE [10]. Увеличение площади охвата и образование большего количества пара позволяет резко охладить воздух в очаге возгорания. Низкий расход воды в системе водяного тумана высокого давления уменьшает ущерб от воды при пожаре. Мельчайшие капли воды препятствуют прохождению инфракрасного излучения, генерируемого пламенем. Составляющие дымовые газы частицы связываются с туманом и уменьшается концентрация токсичных веществ в воздухе. Анализ испарения воды и охлаждения воздуха на заданной поверхности при использовании водного спрея проведено в работе [11].

Успешное применение технологии тушения распыленной водой позволило применять данный метод для тушения крупномасштабных лесных пожаров. Экспериментальные исследования по электрическому взрыву в тонкостенной стеклянной ампуле [8] показали, что для тушения крупномасштабного пожара эффективно применение синхронно взрываемых зарядов, помещенных в легко разрушаемые, не дающие осколков объемы воды, равномерно размещенные в объеме пламени. Теоретическая модель полета капсулы под воздействием сопротивления воздуха [12] позволяет измерять параметры и реконструировать форму траектории капсулы для выбора оптимального момента для выпуска капсулы и инициирования разрыва на оптимальной высоте. Результаты полевых экспериментов по проверке теоретической модели [12] представлены в работе [13]. Экспериментальное исследование тушения пожара за счёт сочетания действия взрывной волны и водного тумана [14] показало, что взрыв разбивает воду на более мелкие частицы и разрушает структуру пламени в области активного горения [15]. Другим способом подачи воды является интервальная подача мелких частиц с большой скоростью [16]. Эксперименты показали, что применение противопожарных шаров, содержащих тушащий состав и активизирующихся в течении трех секунд без дополнительных средств пожаротушения малоэффективно [17].

Современные средства видеорегистрации и визуализации позволили получить более точные экспериментальные данные по динамике капель воды в различных условиях [18–20]. Изучены изменения объема воды объемом 0,1–0,5 л при свободном ее падении с высоты 5 м [9]. Увеличенный объем водяного ядра 1 литр при при свободном падении с высоты 15 м исследованы в работе [18]. Динамика взаимодействия жидкого аэрозоля с модельными очагами горения [19, 20] показала, что комбинированное тушение во фронт и перед ним дает наилучшие результаты тушения.

Средства компьютерной гидродинамики с учетом различных схем вентиляции [15] позволяют моделировать взаимодействие дисперсного облака воды и взрыва. Для сложных моделей спреев в областях с высокой массовой долей частиц [21] используют Лагранжев подход или комбинация Эйлерова и Лагранжева подходов. Модели для распределения размеров частиц по размерам исследуются в работе [23].

Процесс тушения лесного пожара является сложным динамическим физико-химическим процессом. Поведение и развитие лесного пожара зависит от сочетания природных взаимосвязанных факторов: вида пожара, горючих материалов, рельефа и метеорологических условий. При моделировании тушения требуется учитывать не только сами процессы горения, но процесс локализации пожара. Моделирование необходимо для определения возможных благоприятных и негативных сценариев тушения при различных параметрах. При тушении капсулами с тушащим веществом этими параметрами являются характеристики термически активной оболочки капсулы, необходимый объем воды для тушения, параметры процесса испарения и охлаждения окружающей газовой среды в результате попадания в нее дисперсной воды. Многочисленные современные исследования из-за сложности проблемы исследуют отдельные аспекты процесса горения и тушения. Немного работ по взаимодействию доставляемого тушащего состава с комплексом процессов происходящих при горении. Мало изучено влияние сильных конвективных течений при тушении верховых пожаров. Целью данной работы создание упрощенной физико-математической модели тушения лесного пожара с применением капсул воды с термически активной оболочкой и проведение на ее основе исследования динамики протекающих процессов.

Физико-математическая модель тушения лесного пожара путем доставки воды капсулами с термически активной оболочкой. Общая математическая модель пожара основана на математической формулировке [24]. В данной статье представлена модель тушения пожара при помощи сброса водяных капсул с термически активной оболочкой. Под воздействием температуры среды термически активная оболочка разрушаться. При полном разрушении оболочки

содержащейся в ней вода переходит в дисперсную фазу. Для характеристики капсулы вводится интегральный параметр $I_{capsule}$, который определяет скорость разрушения капсулы. Оболочка повреждается пропорционально расстоянию и превышению температуры среды над критической температурой. Соответственно не учитывается воздействие лучистого потока и постоянной скорости её падения в среде. Разрыв капсулы происходит в точке, где $I_{capsule}$ достигает значения интегрального параметра термоустойчивости капсулы I_{wat}, которое в свою очередь является константой

$$I_{capsule} = \int_l H\left(T - T_{cr}\right)\left(T - T_{cr}\right) dl,$$

где H — функция Хэвисайда, T_{cr} — критическая температура оболочки, T — температура среды, l — путь капсулы с верхней границы расчётной области до поверхности земли.

На первом этапе моделирования в течение 10 секунд выполняется расчёт горения лесного массива до квазистационарного режима. На втором этапе выполняет расчет сброса капсул с учетом влияния высвободившейся из капсул дисперсной воды на динамику пожара. Для упрощения расчетов не учитываются капсулы упавшие не во фронт пожара. При разрыве термически активной оболочки капсулы под воздействием давления внутри капсулы мгновенно освобождается вода в виде облака дисперсных частиц малого размера [14, 17] с заданной плотностью. При сбросе более одной капсулы на метр, моделируется последовательный сброс с учетом разбавления среды предыдущей капсулой. После сброса всех капсул моделируется горение лесного массива с учетом испарения дисперсной воды.

Законы сохранения массы (в целом и покомпонентно), импульса и энергии имеют вид

$$\begin{aligned} &\frac{\partial \rho_5}{\partial t} + \frac{\partial\left(\rho_5 U\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left(\rho_5 W\right)}{\partial z} = \\ &= \left(1-\alpha_c\right) R_1 + R_2 + \frac{M_c}{M_1} R_3 + \rho_{capsule}\delta\left(t - t_{capsule}\right); \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial\left(\rho_5 C_\alpha\right)}{\partial t} + \frac{\partial\left(\rho_5 C_\alpha U\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left(\rho_5 C_\alpha W\right)}{\partial z} = \\ &= \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho_5 D_t \frac{\partial C_\alpha}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\rho_5 D_t \frac{\partial C_\alpha}{\partial z}\right) + R_{5\alpha} + \Delta C_{capsule,\alpha}; \end{aligned} \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho_5 U)}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho_5 U^2+P\right)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho_5 UW)}{\partial z}= \\ =\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_t\frac{\partial U}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_t\frac{\partial U}{\partial z}\right)-\rho_5 Sc_d U\sqrt{U^2+W^2}; \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho_5 W)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_5 UW)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\rho_5 W^2+P\right)}{\partial z}= \\ =\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_t\frac{\partial W}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_t\frac{\partial W}{\partial z}\right)-\rho_5 Sc_d W\sqrt{U^2+W^2}-\rho_5 g; \tag{4}$$

$$\frac{\partial\left(\rho_5\sum_{\alpha=1}^{6}C_\alpha\left(Tc_{p5,\alpha}\right)+T\sum_{j=1}^{3}\rho_j\phi_j c_{pj}\right)}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho_5\sum_{\alpha=1}^{6}C_\alpha\left(Tc_{p5,\alpha}\right)U\right)}{\partial x}+ \\ +\frac{\partial\left(\rho_5\sum_{\alpha=1}^{6}C_\alpha\left(Tc_{p5,\alpha}\right)W\right)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_t\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_t\frac{\partial T}{\partial z}\right)+ \\ +k_s\left(cU_R-4k_p\sigma T^4\right)+\sum_{i=1}^{6}q_i R_i+\rho_{capsule}c_{p56}T_e\delta\left(t-t_{capsule}\right). \tag{5}$$

Для моделирования лучистого потока используем уравнение Гельмгольца

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{c}{3k_\Sigma}\frac{\partial U_R}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{c}{3k_\Sigma}\frac{\partial U_R}{\partial y}\right)-k_s\left(cU_R-4k_p\sigma\left(T^4-T_e^4\right)\right)=0. \tag{6}$$

Массовая скорость реакций пиролиза сухого органического вещества лесных горючих материалов, испарения влаги, горения конденсированных продуктов пиролиза, горения летучих продуктов пиролиза соответственно

$$R_1=k_1\rho_1\phi_1\exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right),R_2=k_2\rho_2\phi_2T^{-0.5}\exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right), \\ R_3=k_3S_\sigma\rho_5\phi_3C_1\exp\left(-\frac{E_3}{RT}\right); \tag{7}$$

$$R_5=\begin{cases}k_5M_2T^{-2.25}\exp\left(-\dfrac{E_5}{RT}\right)x_1^{0.25}x_2,\ x_1\geq 0,05\\ k_5M_2T^{-2.25}\exp\left(-\dfrac{E_5}{RT}\right)x_1x_2,\ x_1<0,05\end{cases},\ x_\alpha=\frac{MC_\alpha}{M_\alpha}. \tag{8}$$

В данной работе предполагается мгновенное преобразование воды в дисперсном состоянии со скоростью испарения R_6 [24] при температуре выше 373 К в газ.

Массовая скорость изменения количества кислорода в результате в результате горения коксика и летучих продуктов пиролиза

$$R_{51} = -R_3 - \frac{R_5 M_1}{2M_2}. \tag{9}$$

Массовая скорость изменения количества летучих продуктов пиролиза в результате пиролиза и горения этих продуктов

$$R_{52} = \left(1-\alpha_c\right)\nu_{\Gamma} R_1 - R_5. \tag{10}$$

Массовая скорость изменения количества углекислого газа в результате пиролиза, горения коксика и летучих продуктов пиролиза

$$R_{53} = \left(1-\alpha_c\right)\left(1-\nu_{\Gamma}\right)R_1 + \left(1+\frac{M_c}{M_1}\right)R_3 + \left(1+\frac{M_1}{2M_2}\right)R_5. \tag{11}$$

Массовая скорость изменения количества водяного пара в результате испарения влаги и дисперсной воды

$$R_{55} = R_2 + R_6. \tag{12}$$

Массовая скорость изменения количества дисперсной воды в результате её испарения

$$R_{56} = -R_6. \tag{13}$$

При моделировании процесса тушения капсулами с термически активной оболочкой предполагается отсутствие изменения инертных компонент

$$R_{54} = 0 \tag{14}$$

Уравнения сохранения объемных долей компонентов конденсированной фазы при изменении вследствие химико-физических процессов, представлены ниже.

Изменение доли сухого органического вещества в результате процесса пиролиза при горении

$$\rho_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial t} = -R_1. \tag{15}$$

Изменение доли, связанной с лесными горючими материалами воды в результате процессов испарения

$$\rho_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial t} = -R_2. \tag{16}$$

Изменение доли конденсированных продуктов пиролиза в результате процессов сушки и их горения

$$\rho_3 \frac{\partial \phi_3}{\partial t} = \alpha_c R_1 - \frac{M_c}{M_1} R_3. \tag{17}$$

Уравнение состояния газовой фазы описывается уравнением Клайперона-Менделева для многокомпонентной смеси с учетом изменения эффективной молярной массы газодисперсной смеси

$$P = \frac{\rho_5 RT}{M}, \ \frac{1}{M} = \sum_{\alpha=1}^{6} \frac{C_\alpha}{M_\alpha}. \tag{18}$$

Суммы концентраций газовых компонент и объёмных долей составляющих конденсированной фазы равны единице

$$\sum_{\alpha=1}^{6} C_\alpha = 1, \sum_{i=1}^{3} \phi_i = 1. \tag{19}$$

Для моделирования динамики движения и разрыва капсул определяется их распределение в лесном массиве $\rho_{capsule}(x,z)$. В уравнении (20) учитывается, что вся вносимая масса – это дисперсная вода. Дельта-функция показывает мгновенность процессов внесения воды в момент разрыва капсул (21).

$$\begin{gathered} \Delta C_{capsule,6} = \rho_{capsule} \delta\left(t - t_{capsule}\right), \\ \Delta C_{capsule,\alpha} = 0, \alpha = \overline{1,5}, \end{gathered} \tag{20}$$

где δ — дельта-функция по времени в форме

$$\int_a^b \delta\left(t - t_{capsule}\right) dt = \begin{cases} 1, a < t_{capsule} < b \\ 0, a > t_{capsule} \vee t_{capsule} > b \end{cases}. \tag{21}$$

Для замыкания системы уравнений необходимо корректно выставить начальные и граничные условия. На поверхности земли выставляются условия непротекания и прилипания для скорости газодисперсной фазы. В данной постановке задачи предполагается, твёрдая поверхность не пропускает тепловую энергию и вещество, что означает нулевую динамическую вязкость и теплопроводность. Верхняя и боковые границы расчётной области являются свободными. Граничные условия по скорости выставлены исходя из априори

заданной скорости ветра на данной высоте с добавлением слагаемого для гашения волн, проходящих через границу. Температура и концентрации газообразных и дисперсных веществ на свободных границах считаются равными значениям невозмущенной среды. Излучение на свободных краях расчётной области считается равным излучению среды, что не приводит к существенной погрешности при условии, что фронт находится на достаточном расстоянии от границы расчётной области для затухания излучения. Твёрдая граница считается полностью отражающей лучистую энергию, что позволяет реализовать на ней граничное условие практически без численной погрешности [25]. Описанные выше граничные условия представляются следующими соотношениями

$$z = h_{\max} : T = T_e,\ U = U_e,\ W = \frac{P - P_e}{P}\sqrt{\frac{RT}{M}},\ C_\alpha = C_{\alpha e},\ U_R = 0; \quad (22)$$

$$x = x_{\max} : T = T_e,\ U = \frac{z}{h_{\max}}U_e + \frac{P - P_e}{P}\sqrt{\frac{RT}{M}},$$
$$W = 0,\ C_\alpha = C_{\alpha e},\ \alpha = \overline{1,8},\ U_R = 0; \quad (23)$$

$$x = 0 : T = T_e,\ U = U_e - \frac{P - P_e}{P}\sqrt{\frac{RT}{M}},\ W = 0,\ C_\alpha = C_{\alpha e},\ U_R = 0; \quad (24)$$

$$G : D_t = 0,\ \mu_t = 0,\ \lambda_t = 0,\ U = 0,\ W = 0,\ \frac{\partial U_R}{\partial \overline{n}} = 0. \quad (25)$$

При записи системы уравнений (1) – (29) использованы следующие обозначения: U — горизонтальная, составляющие скорости газодисперсной фазы, м / с ; W — вертикальная, составляющие скорости газодисперсной фазы, м / с ; P — давление среды, Па; $\mu_t = 2 \cdot 10^{-5}$ Па · с — коэффициент динамической вязкости; λ_t — коэффициент турбулентной теплопроводности, Вт / (м·К); D_t — коэффициент турбулентной диффузии, м^2 / с ; $t_{capsule}$ — момент разрыва капсул, с; $\rho_{capsule}$ — распределение дисперсной воды в результате разрыва капсулы, кг / м^3 ; $c_d = 10^{-5}$ — коэффициент аэродинамического сопротивления; $S = 1$ м$^{-1}$ — удельная поверхность фитомассы полога; $k_s = 0,6$ — спектральный коэффициент поглощения; U_R — плотность потока излучения, Дж / м^4 ; $k_p = 1$ м$^{-1}$ — удельная оптическая поверхность излучающей среды; $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8}$ — постоянная Стефана-Больцмана, кг·с^3 / К^4 ; g — ускорение свободного падения, м / с^2 ; R — универсальная газовая постоянная, 8,31 Дж / (моль·К); S_σ —

удельная поверхность элемента горючих материалов, $м^{-1}$; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света; k_Σ — коэффициент ослабления, $с^{-2}$; M — молярные массы смеси в целом, кг/моль; $\alpha_c = 0,1$ — коксовое число растительных горючих материалов в общей массе летучих продуктов пиролиза; $\nu_\Gamma = 0,8$ — массовая доля горючего газа в общей массе летучих продуктов пиролиза; T — температура среды, К; C_α — массовые концентрации компонентов газодисперсной фазы $\alpha = 1...6$; $R_{5\alpha}$ — скорость образования α компоненты газодисперсной фазы (положительная скорость — выделение вещества, отрицательная — расход), $\alpha = 1...6$, $кг/\left(м^3 \cdot с\right)$; $\Delta C_{capsule,\alpha}$ — источник компонент газодисперсной фазы в результате разрыва капсул, $\alpha = \overline{1,6}$, $кг/\left(м^3 \cdot с\right)$; $c_{p5,\alpha}$ — удельная теплоемкость α – газодисперсной компоненты газовой фазы при постоянном давлении, $\alpha = \overline{1,6}$, $Дж/\left(кг \cdot К\right)$; M_α — молярные массы, $\alpha = 1...6$, кг / моль; $c_{v5,\alpha}$ — удельная теплоемкость α – газодисперсной компоненты газовой фазы при постоянном давлении, $\alpha = \overline{1,6}$, $Дж/\left(кг \cdot К\right)$; M_α — молярные массы, $\alpha = 1...6$, кг / моль; x_α — молярная доля α – й компоненты, $\alpha = \overline{1,6}$; ($\alpha = 1$ — кислород, $\alpha = 2$ — продукты пиролиза, $\alpha = 3$ — углекислый газ, $\alpha = 4$ — азот (инертный), $\alpha = 5$ — водяной пар, $\alpha = 6$ — вода (дисперсная фаза)), q_i — тепловые эффекты химико-физических процессов, $i = 1...6$, Дж / кг; R_i — массовые скорости химико-физических процессов, $кг/\left(м^3 \cdot с\right)$, $i = 1...6$; ($i = 1$ — пиролиз сухого органического вещества, $i = 2$ – испарение влаги из лесной растительности, $i = 3$ — горение конденсированных продуктов пиролиза, $i = 4$ — испарение воды с поверхности растительности, $i = 5$ — горение летучих продуктов пиролиза, $i = 6$ — испарение мелкодисперсной воды).

Расчеты проводились при следующих значениях тепловых эффектов

$$q_1 = q_{10} = \begin{cases} 1250000, T > 593\text{K} \\ -370000, T \le 593\text{K} \end{cases},$$

$$q_2 = -3 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}, \quad q_3 = 1,2 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг},$$

$$q_4 = -2,26 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}, \quad q_5 = 1 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг},$$

$$q_6 = -2,26 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}.$$

Обозначим c_{pj}, ρ_j, ϕ_j — удельная теплоемкость, истинная плотность и объемная доля, Дж/(кг·К), кг/м^3, $j = 1...3$; ($j = 1$ — сухое органическое вещество, $j = 2$ — связанная вода, $j = 3$ — конденсированные продукты пиролиза); ρ_5 — истинная плотность газодисперсной фазы, кг/м^3; $E_1 = 78114$ К — энергия активации сухого органического вещества; $E_2 = 49860$ К — энергия активации испарения влаги, Дж; (термокинетическая постоянная процесса сушки); $E_3 = 83100$ К — энергия активации горения конденсированных продуктов пиролиза (термокинетическая постоянная процесса окисления СО); $E_5 = 95565$ К — энергия активации горения летучих продуктов пиролиза; k_1 — предэкспоненциальный множитель для скорости реакции пиролиза сухого органического вещества РГМ, 1/с; k_2 — предэкспоненциальный множитель для скорости процесса испарения влаги, К^{0,5}·с$^{-1}$; k_3 — предэкспоненциальный множитель для скорости химической реакций горения конденсированных продуктов пиролиза, кг·с$^{-1}$/м^2; k_5 — предэкспоненциальный множитель для скорости химической реакций горения летучих продуктов пиролиза, К^{2,25}·моль·с$^{-1}$/м^3.

Расчеты проводились при следующих значениях предэкспоненциальных множителей $k_1 = 36300$ с$^{-1}$; $k_2 = 600000$ К^{0,5}·с$^{-1}$; $k_3 = 1000$ кг·с$^{-1}$/м^2; $k_5 = 3 \cdot 10^{13}$ К^{2,25}·моль·с$^{-1}$/м^3.

Индекс e — соответствует значениям невозмущенной среды. P_e — давление невозмущенной среды, Па; T_e — температура невозмущенной среды; $U_e = 12$ м/с — горизонтальная составляющая скорости невозмущенной среды; $W_e = 0$ м/с — вертикальная составляющая скорости невозмущенной среды; $h_{\max}$ — высота расчётной области, м; $x_{\max}$ — длина расчётной области, м; G – твёрдая граница, $\overline{n}$ — вектор нормали к границе G; x_c и y_c координаты разрыва, σ — дисперсия массы и энергии разрыва капсулы; $w_e = 0{,}0675$ — влагосодержание ЛГМ; $\zeta = 0{,}301$ — массовая доля золы; $\rho_c = 2$кг/м^3 — плотность элемента ЛГМ в абсолютно сухом состоянии.

Для моделирования динамики взаимодействия сбрасываемых капсул в термически активной оболочке рассматривается бесконечный лесной массив высотой 10 м. Параметры невозмущенной среды: температура $T_e = 300$ К и давление $P_e = 101325$ Па. В пологе леса значение массовых долей внутри полога леса: начальная объемная доля сухого органического вещества определялась соотношением $\phi_{1e} = \dfrac{\rho_c}{\rho_1}$;

начальная объемная доля воды $\phi_{2e} = \frac{\rho_c}{\rho_2}(1-\zeta)$; начальная объемная доля конденсированных продуктов пиролиза составляла $\phi_{3e} = 0,000002$, а за пределами лесного массива они равны нулю.

Молярные массы для расчетов

$$M_1 = 0,03200 \text{ кг/моль}, M_2 = 0,02801 \text{ кг/моль}, M_3 = 0,04400 \text{ кг/моль},$$
$$M_4 = 0,02815 \text{ кг/моль}, M_5 = 0,01802 \text{ кг/моль}, M_6 = \varepsilon^{-1} \text{ кг/моль},$$

где ε — малое число.

Теплоемкости активных газовых компонент среды для расчетов

$$c_{p51} = 1000 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}), c_{p52} = 1150 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}),$$
$$c_{p53} = 1200 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}), c_{p54} = 1150 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}),$$
$$c_{p55} = 2000 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}), c_{p56} = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Начальные концентрации газодисперсных компонент для расчетов

$$C_{e1} = 0,23142(1-C_{5e}), C_{e2} = 0, C_{e3} = 0,00055(1-C_{5e}),$$
$$C_{e4} = 0,76803(1-C_{5e}), C_{e5} = C_{5e}, C_{e6} = 0.$$

Абсолютная влажность воздуха $C_{5e} = 0,01$.

Для плотности конденсированных компонент использовались значения

$$\rho_1 = 360 \text{ кг/м}^3, \rho_2 = 1000 \text{ кг/м}^3, \rho_3 = 200 \text{ кг/м}^3.$$

Для теплоемкости конденсированных компонент использовались значения

$$c_{p1} = 2000 \text{ Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}, c_{p2} = 4200 \text{ Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}, c_{p3} = 900 \text{ Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}.$$

При моделировании процесса тушения крупного лесного пожара использовалась движущаяся прямоугольная сетка с шагом по координате *x* и *z* составляет 1,0 м; шаг по времени 0,0005 с. При расчетах количество ячеек расчетной области составляло 200 на 75 точек.

Источник горения задается в форме прямоугольника, в котором в течение определённого времени 5 с поддерживается температура не ниже 1200 К, давление в начальный момент времени совпадает с атмосферным, а координаты очага горения заданы в виде прямоугольной области $45\text{м} \le \text{x} \le 48\text{м}$, $0\text{ м} \le \text{z} \le 6\text{ м}$.

Описанная выше модель позволяет учесть динамику движения дисперсной воды и превращения её в пар. Хотя в модели принято предположение о малости размеров частиц, она позволяет более детально провести анализ динамики взаимодействия подаваемой воды

и крупного лесного пожара и провести поиск оптимальных условий ее доставки. Возможности применение предложенной модели не ограничивается случаем использования капсул с водой.

Описание численного метода решения задачи. Большое количество работ по решению системы уравнений газовой динамики реагирующих сред сформулировали "стандартный" подход к построению численной схемы. Для дискретизации законов сохранения массы, количества движения, импульса и других используются разностные сетки. Методом крупных частиц [25] выполняется расщепление по физическим процессам и на каждом шаге по времени выполняются поочерёдно эйлеров и лагранжев этапы.

В предложенной работе на первом этапе решаются обыкновенные дифференциальные уравнения, определяющие изменения объемных долей компонент газовой фазы в результате физико-химических процессов. Затем вычисляется корректировка объемных долей и скоростей физико-химических процессов для выполнения законов сохранения и не допущения отрицательных концентраций и объемных долей продуктов, уменьшая скорость слишком быстрых реакций.

Следующий эйлеров этап учитывает диффузионные процессы и источниковые слагаемые. При этом учитывается изменение плотности только вследствие выделения продуктов за счёт химико-физических процессов. На данном этапе учитывается изменение скорости в результате разбавления движущейся среды газообразными продуктами физико-химических процессов, перепад давления, аэродинамическое сопротивление элементов растительности и динамическая вязкость. Уравнения распространения плотности потока лучистой энергии решаются как правило итерационными методами. В представленной работе для решения уравнения Гельмгольца используется метод спектрального разложения на основе собственных функций.

На следующем лагранжевом этапе, используя схему «против потока», учитывается перенос сохраняющихся величин под действием поля скоростей. Давление вычисляется по уравнению Клапейрона-Менделеева для многокомпонентной смеси с учетом изменения эффективной молярной массы газодисперсной смеси.

Следующий этап – моделирование пролета капсул методом и вычисление изменения массовых долей газовых и дисперсных компонент за счёт добавления дисперсной воды при разрыве капсулы с термически активной оболочкой.

Результаты. В рамках данной задачи были проведены модельные расчёты тушения пожара при различных значениях по интегральному параметру термоустойчивости оболочки капсулы, количеству капсул и содержащейся в ней воды. В работе исследуется влияния интегрального параметра термоустойчивости оболочки капсулы на процесс тушения.

Рассмотрим влияние на динамику пожара интегрального параметра термоустойчивости оболочки капсулы при фиксированном значении количества капсул на метр горения $n_{wat} = 4$.

На рис. 1 показано, как при низком интегральном параметре термоустойчивости оболочки капсулы разрываются равномерно над фронтом пожара, не долетая до верхней границы леса. Возникающие вихри уносят большое образовавшееся дисперсное облако вверх. Влияния на динамику горения не оказывается, лесной пожар не потушился. Большой расход воды показывает неэффективность параметров тушения.

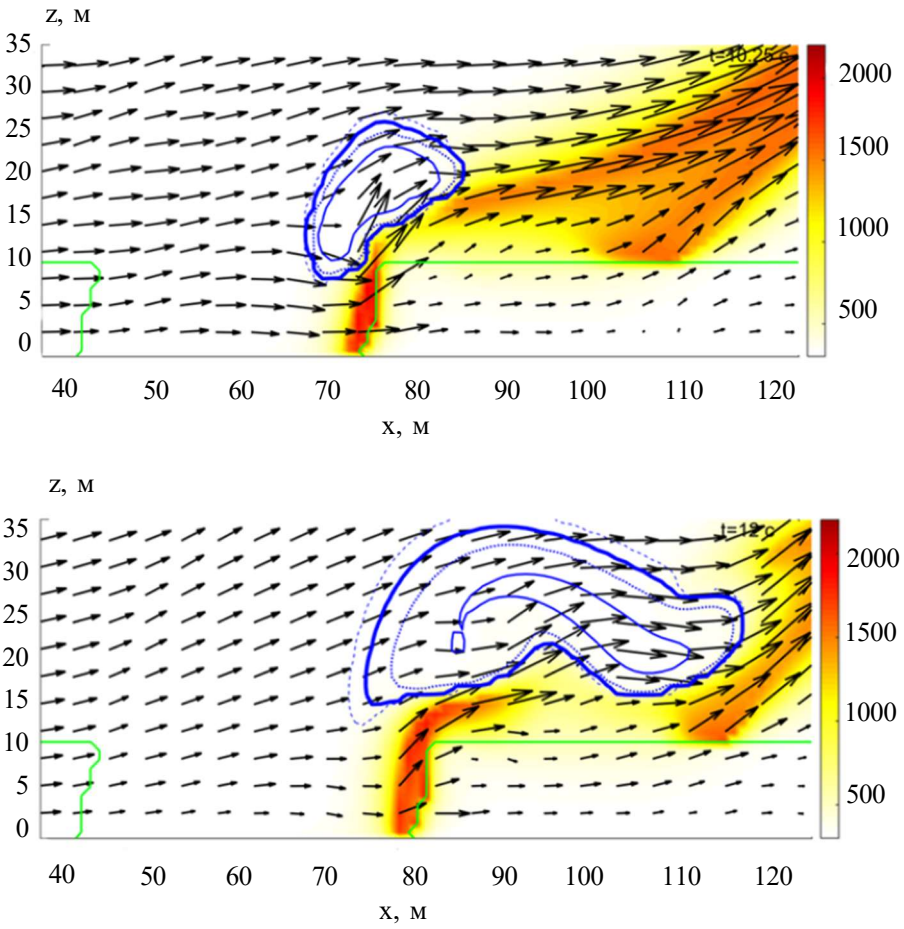


Рис. 1. Динамика тушения лесного пожара капсулами при $n_{wat} = 4$, $m_{wat} = 40{,}95$ кг/м^2, $I_{wat} = 1$ К·м

На рис. 2 показано, как увеличение интегрального параметра термоустойчивости оболочки капсулы до $I_{wat} = 2000$ К·м дает резкое снижение количества используемой воды до 7,3 кг/м^2 и горение прекращается.

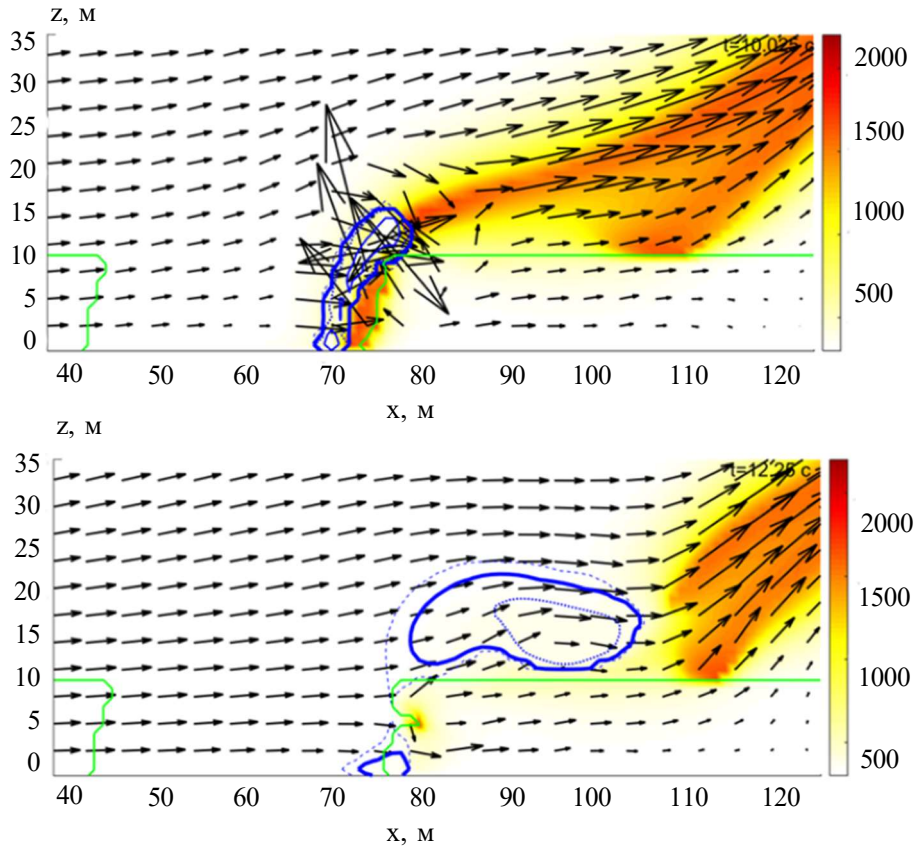


Рис. 2. Динамика тушения лесного пожара капсулами при $n_{wat} = 4$, $m_{wat} = 7{,}3$ кг/м^2, $I_{wat} = 2000$ К·м

Однако небольшое уменьшение воды до 7,28 кг/м^2 позволяет разгореться среднему ярусу леса, как показано на рис. 3. Капсулы разрываются по всему фронту пожара и уже через 0,5 секунды происходит снижение температуры по всему фронту пожара. На 12 секунде происходит разрыв дисперсного облака и большая часть его уносится в атмосферу. Температура среднего яруса лесного массива повышается и возможно возобновление горения при недостаточном количестве воды.

Увеличение интегрального параметра термоустойчивости до I_{wat} =5000 К·м снижает количество используемой воды для тушения до m_{wat} =3,64 кг/м^2, что вдвое меньше чем при I_{wat} =2000 К·м. Развитие динамики происходит по сходному сценарию при I_{wat} =2000 К·м. Облако дисперсной воды меньшего размера позволяет затушить пожар уже к 12 секунде горения.

Наиболее оптимальным вариантом параметров является изображённое на рис. 4 значение интегрального параметра термоустойчивости до I_{wat} =10000 К·м. Количество воды минимально

m_{wat} =1,86 кг/м^2. Большая часть капсул разрывается в среднем и нижнем слое лесного массива. Однако испарения воды с нижнего яруса достаточно для прекращения горения. При недостаточном количестве воды возможно возобновление горения в верхнем ярусе леса.

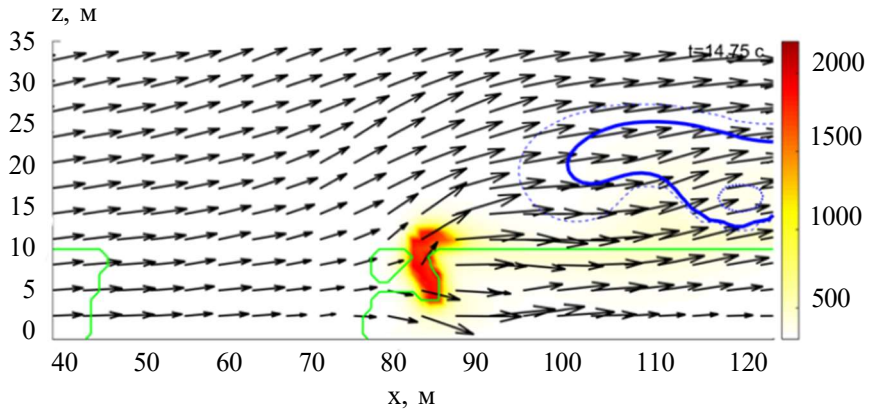


Рис. 3. Динамика тушения лесного пожара капсулами при n_{wat} = 4, $m_{wat} = 7,28$ кг/м^2, $I_{wat} = 2000$ К·м

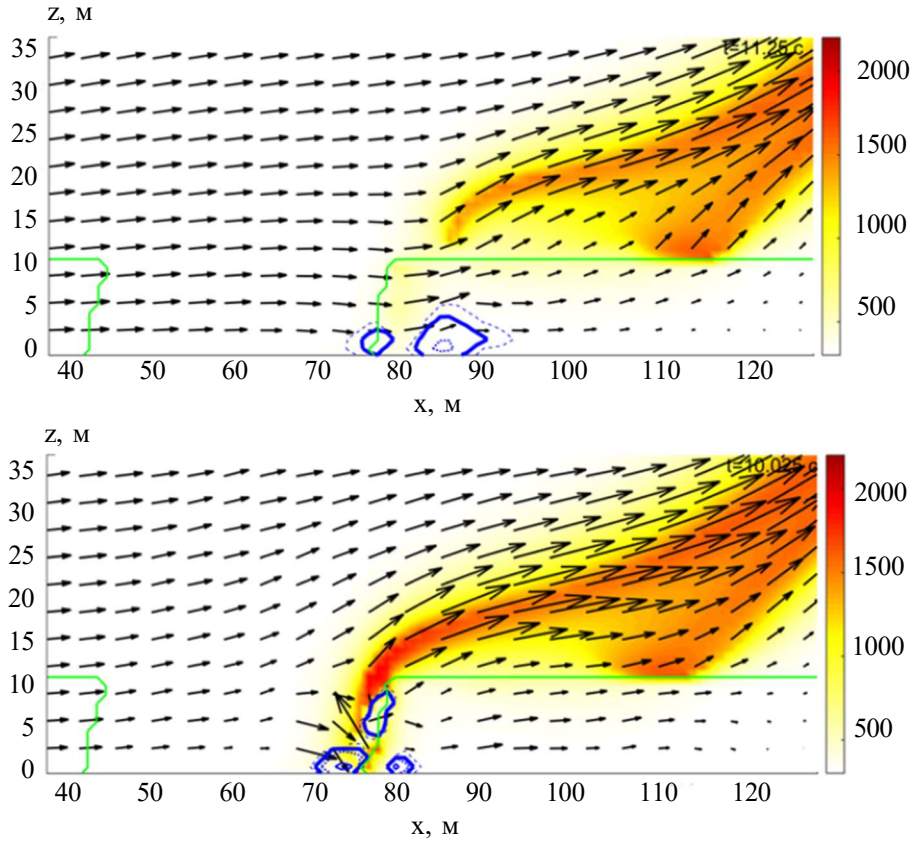


Рис. 4. Динамика тушения лесного пожара капсулами при n_{wat} = 4, $m_{wat} = 1,86$ кг/м^2, $I_{wat} = 10000$ К·м

При увеличении интегрального параметра термоустойчивости до I_{wat} =25000 К·м, как показано на рис. 5, практически все капсулы разрываются в нижем ярусе леса или у земли. Требуется большое количество воды, но испарившаяся вода не способна охладить весь лесной массив и поэтому горение продолжается в верхнем ярусе.

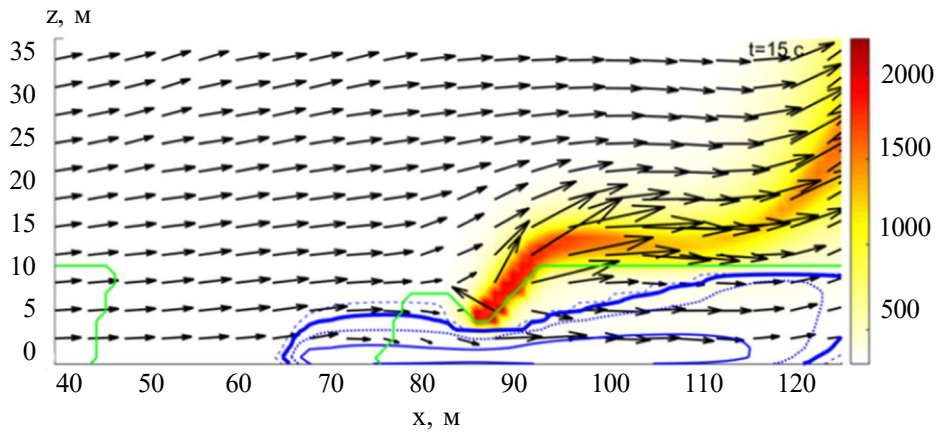


Рис. 5. Динамика тушения лесного пожара капсулами при n_{wat} = 4, $m_{wat} = 40{,}95$ кг/м^2, $I_{wat} = 25000$ К·м

По результатам проведенных исследований получено, что при интегральном параметре термоустойчивости I_{wat} =1 К·м наиболее эффективно тушение при количестве капсул равном 64 и количестве воды m_{wat} =17,99 кг/м^2. При интегральном параметре термоустойчивости I_{wat} =2000 К·м наиболее эффективно тушение при количестве капсул равном 16 и критическом количестве воды m_{wat} =4,55 кг/м^2. При интегральном параметре термоустойчивости I_{wat} =5000 К·м наиболее эффективно тушение при количестве капсул равном 8 и критическом количестве воды m_{wat} =3,11 кг/м^2. При интегральном параметре термоустойчивости I_{wat} =10000 К·м наиболее эффективно тушение при количестве капсул равном 4 и критическом количестве воды m_{wat} =1,85 кг/м^2. Под критическим значением понимается такое, что подача большего количества воды позволяет прекратить распространение пожара, а при меньшем – пожар возобновляется.

Критический расход воды показывает, что чем выше интегральном параметре термоустойчивости тем меньшее количество капсул необходимо.

Полученные результаты согласуются с работами [[27]7, [28]8], в которых расход воды составляет 5 литров на квадратный метр кромки пожара. Расчёты в работе [[29]9] используют 2 килограмма воды для прекращение пламенного горения килограмма топлива с теплотой сгорания 40–50 МДж. Отмечается, что на практике расход превышает

в 5–10 раз. При учете охлаждающего эффекта воды –расход считается пропорционально теплотворной способности топлива. В представленной работе плотность растительности составляет 20 кг/м^2, теплотворная способность 11 МДж. Согласно методике расчёта [[29]9] расход воды составляет 10 кг/м^2, при учите ширины кромки 30 кг/м. В данной работе ширина область подачи капсул составляет 8 м, таким образом, общий расход в наилучшем случае составляет 14,8 кг/м, что существенно меньше, чем при использовании традиционных методов тушения. Эффективность использования капсул с термически активной оболочкой при попадании в зону активного горения зависит от параметров оболочки капсулы, количества капсул и объема, содержащейся в них воды.

Выводы. В работе к общей математической модели пожара [[24]] добавлена динамика дисперсионной воды и капсулы с термически активной оболочкой. Решение поставленной задачи позволяет более реалистично моделировать доставку воды в зону горения и оценивать эффективность и количество необходимой воды при тушении лесного пожара.

В работе исследовано влияние интегрального параметра термоустойчивости оболочки капсулы на процесс тушения. Показано, что при низком значении интегрального параметра термоустойчивости разрыв капсулы происходит в верхнем ярусе леса или выше и образовавшееся облако дисперсных водяных частиц, которые быстро испаряются над пламенем и уносятся конвективным потоком, не успевая достичь зоны уязвимости пожара. Наибольшая эффективность тушения при низком значении интегрального параметра термоустойчивости достигается при большем количестве капсул. Но для успешного тушения требуется много воды. Слишком высокий интегральный параметр термоустойчивости оболочки приводит к разрыву капсулы в нижнем ярусе леса или на поверхности земли. Для успешного тушения необходимо много воды, чтобы испарения воды с нижнего яруса смогли охладить весь лес.

Нахождение оптимального количества капсул и их характеристик помогает существенно уменьшить расход воды в результате охлаждения среды в области изотермических процессов. Ограничением данного подхода является необходимость использования капсул с разными значениями интегрального параметра термоустойчивости оболочки для лесов разной высоты.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Vile´n T., Fernandes P.M. Forest Fires in Mediterranean Countries: CO2 Emissions and Mitigation Possibilities Through Prescribed Burning. *Environmental Management*, 2011, vol. 48(3), pp. 558–567.

[2] Van Der Werf G. R., Randerson J. T., Giglio L., Van Leeuwen T.T., Chen Y., Rogers B.M., Mu M., Van Marle M.J.E., Morton D.C., Collatz G.J., Yokelson R.J., Kasibhatla P.S. Global fire emissions estimates during 1997–2016. *Earth Sysem Scence Data*, 2017, vol. 9(2), pp. 697–720.

[3] Ковалев А.Н., Журавлева Л.А. Перспективные направления тушения низовых лесных и степных пожаров. *Научная жизнь*, 2012, № 4, с. 153–157.

[4] Хасанов И.Р., Москвилин Е.А. Авиационные методы тушения крупных лесных пожаров. *Материалы XV научо-практической конференции «Проблемы горения и тушения пожаров на рубеже веков»*, 1999, ч. 1, с. 300–301.

[5] Абдурагимов И.М. Новая стратегия и тактика тушения лесных пожаров. *Пожаровзрывобезопасность*, 2011, т. 20, №11, с. 44–52.

[6] Абдурагимов И.М., Куприн Г.Н., Куприн Д.С. Быстротвердеющие пены - новая эра в борьбе с лесными пожарами. *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация,* 2016, № 2, с. 7–13.

[7] Satoh K., Maeda I., Kuwahara K., Yang K. A Numerical Study Of Water Dump In Aerial Fire Fighting. *Fire Safety Science,* 2005, vol. 8, pp. 777–787.

[8] Алеханов Ю.В., Близнецов М.В., Власов Ю.А., Дудин В.И., Левушов А.Е., Ломте С.А., Мешков Е.Е. Взаимодействие диспергированной воды с пламенем. *Письма в журнал технической физики*, 2003, т. 29, вып. 6, с. 1–6.

[9] Мешков Е.Е., Орешков В.О., Янбаев Г.М. Образование облака капель при разрушении водяного ядра в процессе свободного падения. *Письма в журнал технической физики*, 2011, т. 37, вып. 15, с. 79–86.

[10] Система пожаротушения водяным туманом высокого давления [Электронный ресурс]. URL: https://semsafe.danfoss.com/technologies/watermist/ (дата обращения: 04.04.2020).

[11] Raoult F., Lacour S., Carissimo B. CFD Water Spray Model Development and Physical Parameter Study on the Evaporative Cooling. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 149, pp. 960–974.

[12] Śmigielski G., Lewandowski D., Dygdała R.S., Stefański K. Water capsule flight – a theoretical analysis and experimental verification. *International Conference on Metrology of Environmental, Food and Nutritional Measurements, 2nd IMEKO TC19 Conference on Environment Measurement, Budapest*, 2008, p. 10.

[13] Śmigielski G., Dygdała R., Kunz M., Lewandowski D., Stefański K. High precision delivery of a water capsule: theoretical model, numerical description, control system and results of field experiments. *XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology*, 2009, p. 2208–2213.

[14] Zheng L., Wang Q. Experimental Study of Explosive Water Mist Extinguishing Fire. *Procedia Engineering*, 2011, vol. 11, pp. 258–267.

[15] Dale E.K. Simulation and modelling of water spray in the 3D explosion simulation program FLACS [Электронный ресурс]. URL: http://bora.uib.no/bitstream/handle/1956/1326/Masteroppgave-dale.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата обращения: 04.04.2020).

[16] EmiControls [Электронный ресурс]. URL: https://www.emicontrols.com/en/fire-fighting/application-areas/forest-fires (дата обращения: 04.04.2020).

[17] Aydin Burchan, Selvi Emre, Tao Jian, Starek Michael Use of Fire-Extinguishing Balls for a Conceptual System of Drone-Assisted Wildfire Fighting. *Drones*, 2019, vol. 3(17), pp. 1–15.

[18] Накоряков В.Е., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. О предельных поперечных размерах капельного облака при разрушении водяного массива в процессе падения с большой высоты. *Доклады академии наук*, 2017, т. 475, № 2, с. 145–149.

[19] Жданова А.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А., Шлегель Н.Е. Влияние способа подачи тушащей жидкости на площадь и скорость распространения лесного пожара. *Материалы седьмой Российской национальной конференции по теплообмену*, 2018, с. 236–239.
[20] Жданова А.О., Кузнецов Г.В., Няшина Г.С., Войтков И.С. Взаимодействие жидкостного аэрозоля с фронтом горения лесного горючего материала в условиях встречного потока воздуха. *Инженерно-физический журнал*, 2019, т. 9, №3, с. 711–717.
[21] Nijdam J.J., Guo B., Fletcher D.F., Tim A.G. Langrish Lagrangian and Eulerian models for simulating turbulent dispersion and coalescence of droplets within a spray. *Applied Mathematical Modelling*, 2006, vol. 30, iss. 11, pp. 1196–1211.
[22] Beau P. A. Modelisation de l'atomisation d'un jet liquid. Application aux sprays diesel. *Ph.D. Thesis*, 2006.
[23] Babinsky E., Sojka P.E. Modeling drop size distributions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2002, vol. 28, № 4, pp. 303–329.
[24] Kataeva L.Y., Maslennikov D.A., Loshchilova N.A. On the laws of combustion wave suppression by free water in a homogeneous porous layer of organic combustible materials. *Fluid Dynamics,* 2016, vol. 51(3), pp. 389–399.
[25] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н, Селиванов В.В. *Численные методы в задачах физики быстропротекающих процессов: учебник для втузов*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 520 с.
[26] Толстых О.Д., Гозбенко В.Е. *Уравнения математической физики. Учебное пособие для студентов технических специальностей*. Иркутск, ИрГУПС, 2008, 119 с.
[27] Абдурагимов И.М., Говоров В.Ю., Макаров В.Е. *Физико-химические основы развития и тушения пожаров*. Москва, ВИПТШ МВД СССР, 1980, с. 195–198.
[28] Гундар С.В., Денисов А.Н. Риск потерь воды при тушении лесных пожаров. *Материалы двадцатой научно-технической конференции «Системы безопасности – 2011»*, 2011, с. 166–169.
[29] Гундар С.В., Денисов А.Н., Трифонов Н.Я. Приемлемый пожарный риск. *Пожаровзрывобезопасность*, 2009, №3, с. 57–66.

Статья поступила в редакцию 20.02.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:
Катаева Л.Ю., Ильичева М.Н., Лощилов А.А. Математическое моделирование тушения лесного пожара путем доставки воды в его очаг с помощью капсул с термически активной оболочкой. *Математическое моделирование и численные методы.* 2020. № 2. с. 59–80.

Катаева Лилия Юрьевна — д-р физ.-мат. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Самарский государственный университет путей сообщения. e-mail: kataeval2010@mail.ru

Ильичева Мария Николаевна — старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева». e-mail: poman99@mail.ru

Лощилов Александр Андреевич — аспирант, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева». e-mail: aloschil@gmail.com

Mathematical modeling of extinguishing a forest fire by delivering water to its hearth using capsules with a thermally active shell

© L.Yu. Kataeva[1,2], M.N. Ilicheva[1], A.A. Loshchilov[1]

[1]Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, 603950, Russia
[2]Samara State Transport University, Samara, 443066, Russia

A numerical analysis of the extinguishing processes of large forest fires using water capsules in a thermoset is carried out. In the work, an integral characteristic for capsules is proposed, which allows one to take into account the process of shell destruction when moving it in a hot environment. A simple algorithm is proposed that allows one to take into account the successive movement of the capsules one after another, taking into account the processes of liquid atomization and the processes of heat and mass transfer. Atomization of liquid occurs in the form of the release of dispersed particles of liquid and is subject to normal law. The paper investigates the dynamics of extinguishing a forest fire under different scenarios of capsule discharge and the integral parameter of shell thermal stability. It is shown that the results obtained are in good agreement with the amount of extinguishing composition required for extinguishing with the results of Gundar and Abdurahimov. The analysis of such key parameters as thermal stability and the number of sequentially discharged capsules is carried out. An analysis of the results of numerical modeling showed that the integral parameter of thermal stability is the key in extinguishing forest fires, since it determines the dispersion zone of dispersed particles of the extinguishing composition. If the value of thermal stability is too high, then the capsules fly through the zone of vulnerability of the fire and the spraying of the extinguishing composition occurs close to the surface of the earth. If the thermal stability parameter is too small, the capsules begin to spray water without reaching the zone of vulnerability of the fire, and are carried away by convective streams formed by the fire. Dropping capsules sequentially allows you to more evenly distribute the extinguishing composition vertically, covering the zone of vulnerability of the fire. Based on the results obtained, it can be said with certainty that more effective extinguishing of forest fires can be carried out using a "smart" thermoactive shell, which makes it possible to deliver the extinguishing composition to the zone of vulnerability of the fire.

***Keywords**: simulation of extinguishing a forest fire, the mechanics of reacting media, numerical modeling, thermo shell, a capsule with water*

REFERENCES

[1] Vile´n T., Fernandes P.M. Forest Fires in Mediterranean Countries: CO2 Emissions and Mitigation Possibilities Through Prescribed Burning. Environmental Management, 2011, vol. 48(3), pp. 558–567.

[2] Van Der Werf G. R., Randerson J. T., Giglio L., Van Leeuwen T.T., Chen Y., Rogers B.M., Mu M., Van Marle M.J.E., Morton D.C., Collatz G.J., Yokelson R.J., Kasibhatla P.S. Global fire emissions estimates during 1997–2016. *Earth Sysem Scence Data*, 2017, vol. 9(2), pp. 697–720.

[3] Kovalev A.N., Zhuravleva L.A. Perspective directions of suppressing forest and steppe fires. *Scientific Life*, 2012, no. 4, pp. 153–157.

[4] Khasanov I.R., Moskvilin E.A. Aviation methods for extinguishing large forest fires. *Materials of the XV scientific-practical conference «Problems of combustion and extinguishing fires at the turn of the century»*, 1999, pt. 1, pp. 300–301.

[5] Abduragimov I.M. New strategy and tactics for extinguishing forest fires. *Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 11, pp. 44–52.

[6] Abduragimov I.M., Kuprin G.N., Kuprin D.S. Fast-setting foams are a new era in forest fire fighting. *Fire and emergencies: prevention, elimination*, 2016, no. 2, pp. 7–13.

[7] Satoh K., Maeda I., Kuwahara K., Yang K. A Numerical Study Of Water Dump In Aerial Fire Fighting. *Fire Safety Science*, 2005, vol. 8, pp. 777–787.

[8] Alekhanov Yu.V., Bliznetsov M.V., Vlasov Yu.A., Dudin V.I., Levushov A.E., Lomte S.A., Meshkov E.E. Interaction of dispersed water with a flame. *Technical Physics Letters*, 2003, vol. 29, iss. 6, pp. 1–6.

[9] Meshkov E.E., Oreshkov V.O., Yanbaev G.M. Droplet cloud formation upon disintegration of free-falling water bal. *Technical Physics Letters*, 2011, vol. 37, iss. 8, pp. 728–730.

[10] High pressure water mist fire extinguishing system [Electronic resource]. URL: https://semsafe.danfoss.com/technologies/watermist/ (accessed: 04.04.2020).

[11] Raoult F., Lacour S., Carissimo B. CFD Water Spray Model Development and Physical Parameter Study on the Evaporative Cooling. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 149, pp. 960–974.

[12] Śmigielski G., Lewandowski D., Dygdała R.S., Stefański K. Water capsule flight – a theoretical analysis and experimental verification. *International Conference on Metrology of Environmental, Food and Nutritional Measurements, 2nd IMEKO TC19 Conference on Environment Measurement*, Budapest, 2008, p. 10.

[13] Śmigielski G., Dygdała R., Kunz M., Lewandowski D., Stefański K. High precision delivery of a water capsule: theoretical model, numerical description, control system and results of field experiments. *XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology*, 2009, p. 2208–2213.

[14] Zheng L., Wang Q. Experimental Study of Explosive Water Mist Extinguishing Fire. *Procedia Engineering*, 2011, vol. 11, pp. 258–267.

[15] Dale E.K. Simulation and modelling of water spray in the 3D explosion simulation program FLACS [Electronic resource]. URL: http://bora.uib.no/bitstream/handle/1956/1326/Masteroppgave-dale.pdf?sequence=1&isAllowed=y (accessed: 04.04.2020).

[16] EmiControls [Electronic resource]. URL: https://www.emicontrols.com/en/fire-fighting/application-areas/forest-fires (accessed: 04.04.2020).

[17] Aydin Burchan, Selvi Emre, Tao Jian, Starek Michael Use of Fire-Extinguishing Balls for a Conceptual System of Drone-Assisted Wildfire Fighting. *Drones*, 2019, vol. 3(17), pp. 1–15.

[18] Nakoryakov V.E., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Limited Transverse Sizes Of A Droplet Cloud Under Disintegration Of A Water Mass During Its Fall From A Great Height. *Doklady Physics*, 2017, vol. 62, no. 7, pp. 333–336.

[19] Zhdanova A.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Shlegel N.E. *Vliyanie sposoba podachi tushashchej zhidkosti na ploshchad' i skorost' rasprostraneniya lesnogo pozhara* [Influence of the method of supplying the extinguishing liquid on the area and speed of propagation of a forest fire]. Materialy sed'moj Rossijskoj nacional'noj konferencii po teploobmenu [Materials of the Seventh Russian National Conference on Heat Transfer], 2018, pp. 236–239.

[20] Zhdanova A.O., Kuznetsov G.V., Nyashina G.S., Voitkov I.S. Interaction of liquid aerosol with the combustion front of forest combustible material under conditions of oncoming airflow. *Journal of engineering physics and thermophysics*, 2019, vol. 9, no. 3, pp. 711–717.

[21] Nijdam J.J., Guo B., Fletcher D.F., Tim A.G. Langrish Lagrangian and Eulerian models for simulating turbulent dispersion and coalescence of droplets within a spray. *Applied Mathematical Modelling*, 2006, vol. 30, iss. 11, pp. 1196–1211.

[22] Beau P. A. Modelisation de l'atomisation d'un jet liquid. Application aux sprays diesel. Ph.D. Thesis, 2006.
[23] Babinsky E., Sojka P.E. Modeling drop size distributions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2002, vol. 28, № 4, pp. 303–329.
[24] Kataeva L.Y., Maslennikov D.A., Loshchilova N.A. On the laws of combustion wave suppression by free water in a homogeneous porous layer of organic combustible materials. *Fluid Dynamics*, 2016, vol. 51(3), pp. 389–399.
[25] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., Selivanov V.V. *Chislennye metody v zadachah fiziki bystroprotekayushchih processov: uchebnik dlya vtuzov* [Numerical methods in problems of physics of fast processes: a textbook for technical colleges.]. Moscow, BMSTU Publ., 2006, 520 p.
[26] Tolstykh O.D., Gozbenko V.E. *Uravneniya matematicheskoj fiziki. Uchebnoe posobie dlya studentov tekhnicheskih special'nostej* [Equations of mathematical physics. Study guide for students of technical specialties]. Irkutsk, Irkutsk State Transport University Publ., 2008, 119 p.
[27] Abduragimov IM, Govorov V.Yu., Makarov V.E. *Fiziko-himicheskie osnovy razvitiya i tusheniya pozharov* [Physicochemical basis for the development and extinguishing of fires]. Moscow, Higher Engineering Fire-Technical School of the Ministry of Internal Affairs of the USSR, 1980, pp. 195–198.
[28] Gundar S.V., Denisov A.N. *The risk of water loss when extinguishing forest fires.* Materials of the twentieth scientific and technical conference «Security Systems - 2011», 2011, pp. 166–169.
[29] Gundar S.V., Denisov A.N., Trifonov N.Ya. Acceptable fire risk. *Fire and Explosion Safety*, 2009, no. 3, pp. 57–66.

Kataeva L.Yu., Dr. Sci. (Phys. — Math.), Professor, Nizhny Novgorod State Technical University, Samara State Transport University. e-mail: kataeval2010@mail.ru

Ilyicheva M.N., senior lecturer, Nizhny Novgorod State Technical University. e-mail: poman99@mail.ru

Loshchilov A.A., postgraduate, Nizhny Novgorod State Technical University. e-mail: aloschil@gmail.com