

DOI: [10.7242/1999-6691/2020.13.3.26](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2020.13.3.26)

УДК 517.927.4: 614.841.1

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУШЕНИЯ ЛЕСНОГО ПОЖАРА КАПСУЛАМИ С ВОДОЙ В ТЕРМОАКТИВНОЙ ОБОЛОЧКЕ

Л.Ю. Катаева^{1,2}, М.Н. Ильичева¹, А.А. Лоцилов¹¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация²Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, Российская Федерация

В статье предложена новая математическая модель процесса тушения лесного пожара дисперсной водой, доставляемой в очаг пожара водяными капсулами с термоактивной оболочкой. При движении в среде с температурой выше критической оболочка капсулы накапливает интегральное количество повреждений с интенсивностью, пропорциональной пройденному пути и величине превышения критической температуры. При достижении интегральным параметром значения коэффициента термоустойчивости оболочки происходит её разрыв и высвобождение воды, которая принимает дисперсную форму. При последовательном сбросе нескольких капсул каждая из них попадает в среду, температура которой формируется предыдущими сбросами капсул. После вычисления распределения дисперсной воды из капсул производится расчёт динамики лесного пожара на основе физико-математической модели. В работе выполнен анализ ключевых параметров и факторов, определяющих эффективность тушения пожара. Исследована динамика подавления горения в зависимости от количества капсул, приходящихся на единицу длины фронта пожара, значений интегрального параметра термоустойчивости оболочки и объёма сброшенной воды. Результаты численного моделирования показали, что при малом значении интегрального параметра термоустойчивости разрыв капсульной оболочки происходит на уровне верха лесного полога, поэтому для успешной ликвидации огня требуется последовательный сброс большого количества капсул. Слишком высокое значение коэффициента термоустойчивости приводит к разрыву оболочек на земле, и сброс капсул не сказывается на процессе горения в верхней части слоя растительности. Наибольший успех в борьбе с лесным пожаром достигается при разрыве термоактивной оболочки в середине высоты фронта горения. Последовательный сброс капсул позволяет распределять воду по вертикали, более полно покрывать зону уязвимости пожара и тем самым обеспечивать большую эффективность его тушения.

Ключевые слова: лесной пожар, тушение, физико-химическая гидромеханика, численное моделирование, капсулы с водой, термоактивная оболочка

MATHEMATICAL MODELING OF FOREST FIRE EXTINGUISHING USING WATER CAPSULES WITH A THERMOACTIVE SHELL

L.Yu. Kataeva^{1,2}, M.N. Ilicheva¹ and A.A. Loshchilov¹¹Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation²Samara State University of Transport, Samara, Russian Federation

The paper proposes a new mathematical model of the process of extinguishing a forest fire with dispersed water delivered to the fire source with water capsules with a thermoactive shell. When moving in a medium with a temperature above the critical, the capsule shell accumulates the integral value of the damage with the intensity proportional to the distance traveled and the critical temperature exceed. When the integral parameter of the thermal stability of the shell is reached, the capsule ruptures and water is released in dispersed form. During the sequential discharge of several capsules, each of them is affected by the temperature of the medium formed after exposure to the previous capsules. After calculating the distribution of dispersed water from the capsules, the calculation of the dynamics of a forest fire based on a physical and mathematical model is resumed. The analysis of key parameters and effects that determine the effectiveness of extinguishing is carried out. The extinguishing dynamics is shown for a different number of capsules per unit length of the fire front, an integral parameter of thermal stability, and the amount of water in the capsule. The results of numerical modeling showed that in the case of a small value of the capsule integral parameter of thermal stability, the capsule ruptures in the upper part of the vegetation layer, and therefore a great number of water capsules must be sequentially dumped to extinguish. Too high value of the thermal stability coefficient leads to rupture of capsules on the ground and to continuation of the combustion process in the upper part of the vegetation layer. The greatest efficiency of forest fire extinguishing occurs when the thermoactive shell of capsules ruptures in the middle of the combustion front. Sequential discharge of capsules allows one to distribute water vertically, more fully covering the zone of vulnerability of the fire. It is shown that the use of capsules with a thermoactive shell allows one to deliver water in the zone of vulnerability of the fire, thereby providing more effective firefighting.

Key words: forest fire, fire extinguishing, physicochemical hydromechanics, numerical modeling, water capsules, thermoactive shell

1. Введение

Исследование и повышение эффективности процессов локализации и ликвидации лесного пожара становится жизненно необходимым в связи с возрастающим количеством возгораний [1, 2]. Одним из способов тушения в удалённых и труднодоступных районах является использование авиационных технологий. Однако высокая стоимость и малая производительность делают данный способ малоэффективным [3, 4]. При большой скорости сброшенная с самолёта масса жидкости превращается в облако мелкодисперсных капель, которые успевают испариться до попадания в зону уязвимости пожара [5, 6]. Полёт самолёта на сверхнизкой высоте с целью уменьшения потерь воды может сформировать

турбулентное течение, способствовать притоку кислорода к зоне горения и тем самым усилить его. Аэродинамическое взаимодействие с неоднородным по высоте и составу пологом леса негативно сказывается на динамической устойчивости летательного аппарата и, как следствие, на безопасности противопожарной операции. Прямые эксперименты по сбросу воды с летательных средств стоят слишком дорого, поэтому актуальным является математическое моделирование. Компьютерная симуляция сброса воды с воздушного судна и вычисление поверхностного распределения воды на земле показали, что увеличение до определённого предела высоты сброса воды способствует её распылению на большую площадь [7].

Экспериментальные и теоретические работы по изучению технологии подавления пожара при помощи распылённой воды или тушащего состава выявили высокую эффективность её использования при условии прямого воздействия на зону уязвимости пожара. В настоящее время появилось довольно много экспериментальных работ, связанных с исследованием динамики взаимодействия воды с горячей средой [8] и при свободном движении воды под действием силы тяжести [9]. При тушении возгораний в помещениях активно применяется тонко распылённая вода. В условиях замкнутого пространства и при отсутствии сильных конвективных течений вода, попадая в зону уязвимости пожара, подавляет горение более эффективно. Эта особенность распылённой воды положена в основу установки SEMSAFE [10], которая предназначена для подачи воды под высоким давлением при тушении пожара в помещении. Использование установки позволяет экономить воду, уменьшает вероятность повреждения помещений и оборудования. Исследование динамики водного струя при охлаждении поверхностей за счёт испарения воды проведено в работе [11]. Для воды авторами учитывается логнормальное распределение по размерам частиц, различные значения угла её распыления и абсолютная влажность среды. Показано хорошее согласование результатов, полученных при помощи CFD расчётов, и данных экспериментов.

Активно развивающиеся подходы к устранению разного рода возгораний включают изучение способов доставки распылённого тушащего состава непосредственно в зону уязвимости пожара. Так, в работе [8] проведены экспериментальные исследования по электрическому взрыву в тонкостенной стеклянной ампуле. Результаты показали, что для ликвидации крупномасштабного пожара эффективно применение синхронно взрывааемых зарядов, помещённых в легко разрушаемые и не дающие осколков оболочки с водой, равномерно распределяемые в объёме пламени. При грубой оценке получено, что для пожара 100×100 м с высотой пламени 10 м потребуется 10^5 м^3 аэросмеси или 10^2 м^3 воды. Предложенная в [12] теоретическая модель полёта капсулы под воздействием сопротивления воздуха позволяет измерять параметры и реконструировать форму траектории капсулы для выбора оптимального момента для её выпуска и инициирования взрыва на расчётной высоте. Результаты полевых экспериментов по проверке теоретической модели [12] представлены в работе [13]. В [14] выполнено экспериментальное исследование тушения пожара за счёт сочетания действия взрывной волны и водного тумана. Взрыв разрушает структуру пламени, разбивает воду на еще более мелкие частицы и доставляет её в область активного горения, в том числе в основание пламени. Испарение воды приводит к охлаждению и разбавлению нагретой среды, что предотвращает продолжение горения. Авторами показано, что взрывная волна придаёт частицам воды большой импульс, вследствие этого они становятся способными преодолеть задымлённую зону. Исследование взаимодействия дисперсного облака воды и взрыва на различных стадиях проведено в работе [15].

Альтернативным способом преодоления нагретой среды для водного тумана является интервальная подача мелких частиц с большой скоростью с помощью специальной установки. Как отмечено в [16], использование такой установки позволяет экономить воду за счёт большей эффективности тумана по сравнению с традиционными способами тушения пожаров. Установка для распыления воды устанавливается на автомобиль-внедорожник, который обеспечивает её мобильность. На основе анализа результатов работы [16] можно сказать, что, хотя импульс быстро перераспределяется между мелкими частицами воды и газовой средой, разгон воздушно-дисперсной массы турбиной создаёт условия для преодоления конвективной колонки (слоя смеси с воздухом продуктов полного и неполного сгорания, поднимающегося над очагом пожара) и достижения средой очага горения в результате инерционного движения. Недостатком данного подхода является возможное создание новых вихрей, которые могут ускорить распространение пожара в окрестности области подачи воды. Вопросы применения противопожарных шаров, содержащих тушащий состав, рассматриваются в работе [17]. Активация распыления тушащего состава происходит при нахождении шара в пламени в течение 3 секунд. Эксперименты показали, что такой способ подавления горения в помещениях без привлечения к нему дополнительных средств неэффективен. Тем не менее, изделие хорошо показывает себя при уничтожении низовых пожаров.

Авторы работ [18–20] использовали современные средства видеорегистрации и визуализации и получили более точные экспериментальные данные по динамике капель воды в различных условиях. Динамике объёма воды при её свободном падении с высоты посвящены экспериментальные исследования [9]. Показано, что при свободном падении ядра воды объёмом $0,1\text{--}0,5 \text{ дм}^3$ с высоты 5 м формируется облако мелкодисперсных частиц, которое под воздействием аэродинамических сил разрастается

в вертикальном и горизонтальном направлениях. Основные стадии движения ядра воды объёмом 1 дм^3 при свободном падении с высоты 15 м определены в работе [18]. Авторы [19, 20] исследовали динамику взаимодействия жидкого аэрозоля с модельными очагами горения. В качестве горючих материалов выступают листья берёзы и смесь компонентов почвенного покрова, что более характерно для низовых пожаров. Показано, что наиболее эффективным является комбинирование воздействия на фронт и перед ним. По результатам экспериментальных исследований процессов подавления пламенного горения и термического разложения лесных горючих материалов аэрозольными потоками воды вычислены времена тушения верхового и низового лесных пожаров и выявлена определяющая роль размеров капель аэрозоля [21].

Для моделирования взаимодействия дисперсного облака воды и взрыва в [15] применяется компьютерная гидродинамика с учетом различных схем вентиляции. В более сложных моделях спреев используется сочетание эйлерова и лагранжева подходов. При этом лагранжев подход практикуется в областях с высокой массовой долей частиц [22]. Критерий перехода между моделями исследован в работе [23]. Распределение частиц по размерам оказывает существенное влияние на их динамику, поэтому рассматриваются различные виды распределения частиц по размерам [24]: нормальное, логнормальное, Нукиямы–Танасавы и Розина–Раммлера. Выбор способа аппроксимации определяется тем, какому распределению размеров соответствует исследуемый спрей в конкретных условиях.

Израильская компания по разработке и модернизации различных видов вооружения Elbit Systems разработала и в конце 2019 года провела испытания новой системы пожаротушения с помощью воды, запечатанной в тонкостенные пакетики [25]. Такое решение позволяет тушить пожары на земле с высоты больше 30–40 м и избегать потерь воды в потоке горячего воздуха. Для увеличения эффективности помещать в тонкостенные пакетики можно различные огнетушащие жидкости: пену, антипирен и другие химические составы. Система даёт возможность воздействовать на пожар при помощи авиации круглосуточно. Компания Elbit Systems разработала станок, способный упаковывать воду в пакетики со скоростью до 10 м^3 в час. Масса каждого пакетика, сделанного из безопасного биоразлагаемого полимера, составляет 140 г. Испытания системы проведены на двух пожарных самолётах АТ-802F, которые сбросили в общей сложности $1,6 \text{ м}^3$ воды с высоты 150 м. Эта система может быть установлена на любой пожарной самолёт или вертолёт.

Еще одна система для борьбы с пожарами разного происхождения — Guardian, разработана и запатентована командой Caylum (Fresno, США) [26]. Эта система доставки контейнеров не требует какой-либо модификации самолёта и может размещаться на любом самолёте с задней загрузкой. Самолёт выпускает контейнеры позади себя в перекрывающемся режиме и тем самым создаёт мгновенный и точный ливень. Система Guardian способна осуществлять прямые атаки и прокладывать длинную сплошную линию замедления горения. В системе Guardian используются 8-слойные гофрированные контейнеры, изготовленные непрерывной намоткой, вмещающие 1000 м^3 жидкости. В августе 2019 года штабом ВМС США (Usaf Hq AMC) получены оценки [26] эксплуатационных характеристик контейнерной системы воздушного пожаротушения Guardian, подтверждающие её оперативность, эффективность и пригодность по всем мерам тестирования и критериям.

Исходя из анализа работ по теме исследований, можно сделать вывод о том, что тушение лесного пожара является сложным динамическим процессом. Его изучение и моделирование требуют учёта такого фактора как конвекция, умения осуществлять поиск зоны уязвимости пожара и разрабатывать наиболее благоприятные сценарии тушения с принятием во внимание разрушения термически активной оболочки, процесса испарения и охлаждения окружающей газовой среды в результате попадания в неё дисперсной воды. При ликвидации лесного пожара необходимо учитывать влияние таких внешних факторов как присутствие в лесу ветра, а при его наличии — проявление процессов конвекции, провоцируемых ветром. Авторы современных исследований в основном концентрируются на отдельных аспектах проблемы тушения и мало уделяют внимания динамике взаимодействия доставляемого тушащего состава с внешним и собственным ветром пожара. Отсутствие данных по влиянию сильных конвективных течений на процесс горения и его подавление не дают оснований для использования полученных результатов при тушении верховых пожаров. Целью данной работы является исследование этих процессов на основе упрощённой физико-математической модели с учётом дисперсной воды, появляющейся в результате её подачи в зону уязвимости пожара в виде капсул в термически активной оболочке.

2. Физико-математическая модель тушения лесного пожара капсулами с водой в термоактивной оболочке

В основе математической формулировки задачи лежит общая математическая модель пожара [27]. При этом лес представляется как пористая реагирующая многофазная среда. Задача решается в однотемпературной двумерной постановке. Объёмная доля конденсированной фазы считается пренебрежимо малой. Для моделирования лучистого теплопереноса используется диффузионное приближение с учётом серости среды (то есть при постоянном коэффициенте отражения). Газовая фаза

состоит из кислорода, летучих продуктов пиролиза и инертных компонентов. В данной статье, в отличие от работы [28], динамика дисперсной воды рассматривается как движение дополнительной фазы.

Положим, что тушение пожара осуществляется при помощи малоинерционных заполненных водой капсул с термоактивной оболочкой. Оболочка способна быстро отводить тепловую энергию с внешней поверхности в содержащуюся воду, то есть предполагается, что температура оболочки зависит от текущей температуры окружающей среды (без учёта сил инерции). В зависимости от температурных воздействий и полученных повреждений термоактивная оболочка с течением времени может разрушиться. При полном разрушении происходит одномоментное высвобождение и распыление содержащейся в ней воды, которая принимает форму дисперсной фазы. Для моделирования динамики постепенного разрушения капсулы предполагается, что оно начинается при температуре выше некоторого (критического) значения и происходит с интенсивностью, пропорциональной расстоянию и превышению температуры среды критической величины, что соответствует отсутствию лучистого нагрева капсулы и постоянной скорости её падения в многофазную среду. Для определения меры накопленных повреждений, которые приводят к полному разрушению оболочки, введём интегральный параметр термоустойчивости оболочки: $I_{\text{wat}} = \text{const}$.

На первом этапе моделирования тушения лесного пожара выполним расчёт горения лесного массива до выхода его на квазистационарный режим, что соответствует интервалу времени примерно в 10 с. Второй этап моделирования содержит расчёт сброса капсул и дальнейшей динамики пожара с учётом высвободившейся из капсул воды, принявшей дисперсную форму. Для упрощения моделирования падение капсул за пределы фронта пожара не принимается во внимание.

Для нахождения высоты высвобождения воды из капсул введём интегральную величину I_{capsule} , определяющую процесс повреждения оболочки капсулы при её прохождении через зону прогретого газа над очагом пожара. Высота, на которой капсула выбросит воду, зависит от того, как быстро её оболочка накопит повреждения. Интегральную величину повреждений оболочки предлагается рассчитывать согласно соотношению:

$$I_{\text{capsule}} = \int_l H(T - T_{cr})(T - T_{cr}) dl, \quad (1)$$

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

Разрыв капсулы происходит в точке, где I_{capsule} достигает значения интегрального параметра термоустойчивости капсулы I_{wat} . При мгновенном высвобождении из капсулы вода принимает вид облака дисперсных частиц малого размера с заданной плотностью [14, 17]. В случае сброса более 1 капсулы на квадратный метр фронта горения выполняется моделирование их последовательного сброса. В результате разрыва капсул происходит разбавление горячей среды дисперсной водой. Точка разрыва каждой капсулы вычисляется на основании поля температур, сформировавшегося при сбросе предыдущих капсул. По окончании вычисления параметров сброса всех капсул выполняется моделирование лесного пожара с учётом испарения дисперсной воды.

Гравитация оказывает существенное влияние на динамику движения частиц, но ввиду малого размера их скорость относительно скорости перемещения газовой среды ничтожна. В результате этого сила тяжести воздействует на газодисперсную среду в целом, и оседания частиц не происходит.

Для моделирования процесса динамики взаимодействия капсул в термически активной оболочке и пожара используются уравнения химической газовой динамики. Физико-математическая модель распространения лесного пожара состоит из уравнения движения и основных законов сохранения массы, импульса и энергии, включающих описание динамики взаимодействия с капсулами [27, 28]. Записанные в матричной форме уравнения имеют вид:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial (F_x)}{\partial x} + \frac{\partial (F_z)}{\partial z} + \frac{\partial (D_x)}{\partial x} + \frac{\partial (D_z)}{\partial z} = S_p, \quad (2)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \rho_5 \\ \rho_5 U \\ \rho_5 W \\ E_{\text{gas}} + E_{\text{cond}} \\ \rho_5 C_\alpha \end{bmatrix}, \quad F_x = \begin{bmatrix} \rho_5 U \\ \rho_5 U^2 + P \\ \rho_5 U W \\ E_{\text{gas}} U \\ \rho_5 C_\alpha U \end{bmatrix}, \quad F_z = \begin{bmatrix} \rho_5 W \\ \rho_5 U W \\ \rho_5 W^2 + P \\ E_{\text{gas}} W \\ \rho_5 C_\alpha W \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$D_x = \begin{bmatrix} 0 \\ \mu_t \frac{\partial U}{\partial x} \\ \mu_t \frac{\partial W}{\partial x} \\ \lambda_t \frac{\partial T}{\partial x} \\ \rho_5 D_t \frac{\partial C_\alpha}{\partial x} \end{bmatrix}, \quad D_z = \begin{bmatrix} 0 \\ \mu_t \frac{\partial U}{\partial z} \\ \mu_t \frac{\partial W}{\partial z} \\ \lambda_t \frac{\partial T}{\partial z} \\ \rho_5 D_t \frac{\partial C_\alpha}{\partial z} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$S_p = \begin{bmatrix} Q + \Delta Q_{capsule} \\ -\rho_5 S c_d U \sqrt{U^2 + W^2} \\ -\rho_5 S c_d W \sqrt{U^2 + W^2} - \rho_5 g \\ k_s (c U_R - 4 k_p \sigma T^4) + \sum_{i=1}^6 q_i R_i + \Delta E_{capsule} \\ R_{5\alpha} + \Delta C_{capsule,\alpha} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

В уравнениях (2)–(5) приняты обозначения: Φ — сохраняющиеся величины (масса газовой фазы и массы её компонентов, количество движения по координатам x , z , их энергии); $\frac{\partial(F_x)}{\partial x}$ и $\frac{\partial(F_z)}{\partial z}$ — скорости конвективного переноса по координатам x и z соответственно; $\frac{\partial}{\partial x}(D_x)$ и $\frac{\partial}{\partial z}(D_z)$ — скорости диффузионного переноса по координатам x и z ; S_p — источниковый член; U и W — горизонтальная и вертикальная составляющие скорости газодисперсной фазы, м/с; ρ_5 — истинная плотность газодисперсной фазы, кг/м³; E_{gas} — энергия газовой фазы, Дж/м³; E_{cond} — энергия конденсированной фазы, Дж/м³; C_α — массовые концентрации компонентов газодисперсной фазы ($\alpha = 1$ — кислород, $\alpha = 2$ — продукты пиролиза, $\alpha = 3$ — углекислый газ, $\alpha = 4$ — азот (инертный), $\alpha = 5$ — водяной пар, $\alpha = 6$ — вода (дисперсная фаза)); P — давление среды, Па; $\mu_t = 2 \cdot 10^{-5}$ — коэффициент динамической вязкости, Па·с; λ_t — коэффициент турбулентной теплопроводности, Вт/(м·К); D_t — коэффициент турбулентной диффузии, м²/с; Q — массовая скорость образования газодисперсной фазы, кг/(с·м³); $\Delta Q_{capsule}$ — источник массы газодисперсной фазы в результате разрыва капсул, кг/(с·м³); $\Delta E_{capsule}$ — источник энергии газодисперсной фазы в результате разрыва капсул, Дж/с; $S = 1$ — удельная поверхность фитомассы полого леса, м¹; $c_d = 10^{-5}$ — коэффициент аэродинамического сопротивления; g — ускорение свободного падения, м/с²; $c = 3 \cdot 10^8$ — скорость света, м/с; $k_s = 0,6$ — спектральный коэффициент поглощения; U_R — плотность потока излучения, Дж/м⁴; $k_p = 1 \text{ м}^{-1}$ — удельная оптическая поверхность излучающей среды; $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8}$ — постоянная Стефана-Больцмана, кг·с³·К⁻⁴; T — температура среды, К; $R_{5\alpha}$ — скорость образования α -компонента газодисперсной фазы (положительная скорость — выделение вещества, отрицательная — расход), $\alpha = \overline{1,6}$, кг/(м³·с); $\Delta C_{capsule,\alpha}$ — источник компонент газодисперсной фазы в результате разрыва капсул, $\alpha = \overline{1,6}$, кг/(м³·с); R_i — массовые скорости химико-физических процессов, $\alpha = \overline{1,6}$, кг/(м³·с); q_i — тепловые эффекты химико-физических процессов, Дж/кг ($i = 1$ — 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); $Q = (1 - \alpha_c) R_1 + R_2 + \frac{M_c}{M_1} R_3$ — массовая скорость образования газодисперсной фазы, кг/(с·м³); $\alpha_c = 0,1$ — коксовое число растительных горючих материалов в общей массе летучих продуктов пиролиза; M_α — молярные массы индивидуальных компонентов, $\alpha = \overline{1,6}$, кг/моль; M_c — молярная масса углерода, кг/моль.

Важную роль при распространении пожара играет лучистый поток. Для его моделирования возьмём уравнение Гельмгольца:

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

где k_{Σ} — коэффициент ослабления лучистого теплового потока, c^2 , $T_e = 300$ К — температура невозмущенной среды (далее все параметры этой среды будут иметь нижний индекс e).

Для учёта изменения энергии газодисперсной — E_{gas} , и конденсированной — E_{cond} , фаз используем соотношения:

$$E_{gas} = \rho_5 \sum_{\alpha=1}^6 C_{\alpha} (Tc_{p5,\alpha}), \quad E_{cond} = T \sum_{j=1}^3 \rho_j \phi_j c_{pj}, \quad (7)$$

где c_{pj}, ρ_j, ϕ_j — удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К), истинная плотность, кг/м³, и объёмная доля компонента ($j = 1$ — сухое органическое вещество, $j = 2$ — связанная вода, $j = 3$ — конденсированные продукты пиролиза); $c_{p5,\alpha}$ — удельная теплоёмкость α -газодисперсного компонента газовой фазы при постоянном давлении, $\alpha = \overline{1,6}$, Дж/(кг·К).

Массовую скорость реакций пиролиза сухого органического вещества горючих лесных материалов, испарения влаги, горения конденсированных продуктов пиролиза, горения летучих продуктов пиролиза, соответственно, найдём по формулам:

$$R_1 = k_1 \rho_1 \phi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), \quad R_2 = k_2 \rho_2 \phi_2 T^{-0.5} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right), \quad R_3 = k_3 S_{\sigma} \rho_3 \phi_3 C_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT}\right), \quad (8)$$

$$R_5 = \begin{cases} k_5 M_2 T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right) x_1^{0.25} x_2, & x_1 \geq 0,05, \\ k_5 M_2 T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right) x_1 x_2, & x_1 < 0,05, \end{cases} \quad x_{\alpha} = \frac{MC_{\alpha}}{M_{\alpha}}. \quad (9)$$

Здесь: $E_1 = 9400R$ К — энергия активации сухого органического вещества растительных горючих материалов; $E_2 = 6000R$ К — энергия активации испарения влаги, Дж; $E_3 = 10000R$ К — энергия активации горения конденсированных продуктов пиролиза; $E_5 = 11500R$ К — энергия активации горения летучих продуктов пиролиза; k_1 — предэкспоненциальный множитель для скорости реакции пиролиза сухого органического вещества растительных горючих материалов, 1/с; k_2 — предэкспоненциальный множитель для скорости процесса испарения влаги, К^{0.5}·с⁻¹; k_3 — предэкспоненциальный множитель для скорости химической реакции горения конденсированных продуктов пиролиза, кг·с⁻¹/м²; k_5 — предэкспоненциальный множитель для скорости химической реакции горения летучих продуктов пиролиза, К^{2.25}·моль·с⁻¹/м³; R — универсальная газовая постоянная, 8,31 Дж/(моль·К); S_{σ} — удельная поверхность элемента горючих материалов, 1/м; M — молярная масса смеси в целом, кг/моль.

В данной работе сделано предположение о мгновенном преобразовании в газ воды, находящейся в дисперсном состоянии, со скоростью испарения R_6 [27] при температуре выше 373 К, но, в отличие от [27], здесь учитывается испарение дисперсного тушащего состава, распыляемого при разрыве капсул.

Итак, прежде чем перейдём к моделированию динамики процесса тушения пожара капсулами с водой, высвобождаемой при разрыве капсульных оболочек, вычислим массовые скорости изменения количества компонентов процесса:

– кислорода в результате горения коксовой мелочи (коксика) и летучих продуктов пиролиза

$$R_{s1} = -R_3 - \frac{R_5 M_1}{2M_2}; \quad (10)$$

– летучих продуктов пиролиза в результате пиролиза и горения этих продуктов

$$R_{52} = (1 - \alpha_c) v_{\Gamma} R_1 - R_5, \quad (11)$$

где $v_{\Gamma} = 0,8$ — массовая доля горючего газа в общей массе летучих продуктов пиролиза;
– углекислого газа в результате пиролиза, горения коксика и летучих продуктов пиролиза

$$R_{53} = (1 - \alpha_c)(1 - v_{\Gamma}) R_1 + \left(1 + \frac{M_c}{M_1}\right) R_3 + \left(1 + \frac{M_1}{2M_2}\right) R_5; \quad (12)$$

– водяного пара в результате испарения влаги и дисперсной воды

$$R_{55} = R_2 + R_6; \quad (13)$$

– дисперсной воды в результате её испарения

$$R_{56} = -R_6. \quad (14)$$

З а м е ч а н и е 1. При моделировании динамики процесса тушения капсулами с термоактивной оболочкой предполагаем отсутствие выделения и поглощения инертных компонентов:

$$R_{54} = 0. \quad (15)$$

Представим далее уравнения, описывающие изменение вследствие химико-физических процессов объёмных долей компонентов конденсированной фазы:

– сухого органического вещества в результате процесса пиролиза при горении

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_1; \quad (16)$$

– связанной с лесными горючими материалами воды, выделяющейся в результате процессов испарения

$$\rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_2; \quad (17)$$

– конденсированных продуктов пиролиза в результате процессов сушки и их горения

$$\rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_1 - \frac{M_c}{M_1} R_3. \quad (18)$$

Прделаем еще несколько подготовительных действий. Состояние газодисперсной смеси с учётом изменения её эффективной молярной массы опишем уравнением Клайперона–Менделева для многокомпонентной смеси:

$$P = \frac{\rho_5 RT}{M}, \quad \frac{1}{M} = \sum_{\alpha=1}^6 \frac{C_{\alpha}}{M_{\alpha}}. \quad (19)$$

Примем во внимание условия равенства единице суммы концентраций газовых компонентов и объёмных долей составляющих конденсированной фазы:

$$\sum_{\alpha=1}^6 C_{\alpha} = 1, \quad \sum_{i=1}^3 \varphi_i = 1. \quad (20)$$

Зададим распределение дисперсной воды в результате разрыва капсул в лесном массиве как $\rho_{capsule}(x, z)$ кг/м³ и запишем следующие уравнения:

$$\Delta Q_{capsule} = \rho_{capsule} \delta(t - t_{capsule}), \quad (21)$$

$$\Delta C_{capsule,6} = \rho_{capsule} \delta(t - t_{capsule}), \quad \Delta C_{capsule,\alpha} = 0, \quad \alpha = \overline{1,5}, \quad (22)$$

$$\Delta E_{capsule} = \rho_{capsule} C_{p56} T_e \delta(t - t_{capsule}). \quad (23)$$

$$\int_a^b \delta(t - t_{capsule}) dt = \begin{cases} 1, & a < t_{capsule} < b, \\ 0, & a > t_{capsule} \text{ или } t_{capsule} > b. \end{cases} \quad (24)$$

Уравнение (21) описывает увеличение количества воды газодисперсной фазы. В уравнении (22) учитывается, что вся вносимая масса — это дисперсная вода. Уравнение (23) определяет количество поступающей в систему энергии, которое равно внутренней энергии дисперсной воды при температуре окружающей среды. Дельта-функция δ в (24) указывает на мгновенность процессов высвобождения воды в момент разрыва капсул $t_{capsule}$, с.

Для замыкания системы уравнений (2)–(24) необходимо корректно задать начальные и граничные условия. На поверхности земли выставим условия непротекания и прилипания для газодисперсной фазы. В данной постановке задачи предполагаем, что твёрдая поверхность G 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 определим исходя из априори известной скорости ветра на высоте, взятой за расчётную, с добавлением слагаемого для гашения волн, проходящих через границу. Температуру и концентрацию газообразных и дисперсных веществ на свободных границах считаем равными значениям в невозмущенной среде. Излучение на свободных краях расчётной области полагаем тем же самым, что и излучение среды, что не приводит к существенной погрешности при условии, что фронт находится на достаточном для затухания излучения расстоянии от границы расчётной области. Твёрдая граница G полностью отражает лучистую энергию, что позволяет реализовать на ней это граничное условие практически без численной погрешности [28]. Поставленные выше граничные условия представляются следующими соотношениями:

$$z = h_{\max}: \quad T = T_e, \quad U = U_e, \quad W = \frac{P - P_e}{P} \sqrt{\frac{RT}{M}}, \quad C_\alpha = C_{\alpha e}, \quad U_R = 0, \quad (25)$$

$$x = 0: \quad T = T_e, \quad U = U_e - \frac{P - P_e}{P} \sqrt{\frac{RT}{M}}, \quad W = 0, \quad C_\alpha = C_{\alpha e}, \quad U_R = 0, \quad (26)$$

$$x = x_{\max}: \quad T = T_e, \quad U = \frac{z}{h_{\max}} U_e + \frac{P - P_e}{P} \sqrt{\frac{RT}{M}}, \quad W = 0, \quad C_\alpha = C_{\alpha e} \quad (\alpha = \overline{1,8}), \quad U_R = 0, \quad (27)$$

$$G: \quad D_t = 0, \quad \mu_t = 0, \quad \lambda_t = 0, \quad U = 0, \quad W = 0, \quad \frac{\partial U_R}{\partial \mathbf{n}} = 0. \quad (28)$$

Таким образом, задача тушения лесного пожара капсулами с водой в термоактивной оболочке сводится к решению замкнутой системы уравнений (2)–(28).

Расчёты осуществлены при значениях предэкспоненциальных множителей: $k_1 = 36300 \text{ с}^{-1}$; $k_2 = 600000 \text{ К}^{0,5} \cdot \text{с}^{-1}$; $k_3 = 1000 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1} / \text{м}^2$; $k_5 = 3 \cdot 10^{13} \text{ К}^{2,25} \cdot \text{моль} \cdot \text{с}^{-1} / \text{м}^3$, и следующих параметрах: давлении в невозмущенной среде $P_e = 10^5 \text{ Па}$; горизонтальной составляющей скорости невозмущенной среды $U_e = 12 \text{ м/с}$; вертикальной составляющей скорости невозмущенной среды $W_e = 0 \text{ м/с}$ при высоте и длине расчётной области h_{\max} м и x_{\max} м; влагосодержании лесных горючих материалов $w_e = 0,0675$; массовой доле золы $\zeta = 0,301$; плотности элемента лесных горючих материалов в абсолютно сухом состоянии $\rho_c = 2 \text{ кг/м}^3$. Здесь \mathbf{n} — вектор нормали к границе G .

При моделировании динамики воздействия сбрасываемых капсул в термоактивной оболочке рассматривался пожар в бесконечно длинном лесном массиве высотой 10 м. В пологе леса начальная объёмная доля сухого органического вещества определялась соотношением $\phi_{1e} = \rho_c / \rho_1$; начальная объёмная доля воды равнялась $\phi_{2e} = (\rho_c / \rho_2)(1 - \zeta)w$; начальная объёмная доля конденсированных продуктов пиролиза составляла $\phi_{3e} = 0,000002$; за пределами лесного массива эти величины считались нулевыми.

Для моделирования физико-химических процессов использовались некоторые тепловые факторы q_i : пиролиз сухого органического вещества ($i = 1$); испарение влаги из лесной растительности ($i = 2$); горение конденсированных продуктов пиролиза ($i = 3$); испарение воды с поверхности растительности ($i = 4$);

горение летучих продуктов пиролиза ($i = 5$); испарение мелкодисперсной воды ($i = 6$). Представим их значения:

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_{10} \\ -3 \cdot 10^6 \\ 1,2 \cdot 10^7 \\ -2,26 \cdot 10^6 \\ 1 \cdot 10^7 \\ -2,26 \cdot 10^6 \end{bmatrix} \text{ Дж/кг}, \quad q_{10} = \begin{cases} 1250000 \text{ Дж/кг} & T > 593\text{К} \\ -370000 \text{ Дж/кг} & T \leq 593\text{К} \end{cases},$$

где q_{10} — тепловой эффект реакции сухого органического вещества.

Молярные массы, теплоёмкости активных газовых компонент среды и начальные концентрации газодисперсных компонентов имеют следующие значения:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0,03200 \\ 0,02801 \\ 0,04400 \\ 0,02815 \\ 0,01802 \\ \varepsilon^{-1} \end{bmatrix} \text{ кг/моль}; \quad \mathbf{c}_{sp} = \begin{bmatrix} 1000 \\ 1150 \\ 1200 \\ 1150 \\ 2000 \\ 4200 \end{bmatrix} \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}; \quad \mathbf{C}_e = \begin{bmatrix} 0,23142(1 - C_{5e}) \\ 0 \\ 0,00055(1 - C_{5e}) \\ 0,76803(1 - C_{5e}) \\ C_{5e} \\ 0 \end{bmatrix},$$

где $\alpha = 1$ — это кислород, $\alpha = 2$ — продукты пиролиза, $\alpha = 3$ — углекислый газ, $\alpha = 4$ — азот (инертный), $\alpha = 5$ — водяной пар, $\alpha = 6$ — вода (дисперсная фаза). Здесь ε — малое число. Молярная масса углерода составляет: $M_c = 0,012$ кг/моль, что соответствует предположению о пренебрежимо малом объёме дисперсной воды; абсолютная влажность воздуха (массовая доля водяного пара) равна $C_{5e} = 0,01$.

Для плотности и теплоёмкости конденсированных компонент приняты значения:

$$\rho = \begin{bmatrix} 360 \\ 1000 \\ 200 \end{bmatrix} \text{ кг/м}^3, \quad \mathbf{c}_p = \begin{bmatrix} 2000 \\ 4200 \\ 900 \end{bmatrix} \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$$

где $j = 1$ — сухое органическое вещество, $j = 2$ — связанная вода, $j = 3$ — конденсированные продукты пиролиза.

При численном моделировании процесса тушения крупного лесного пожара использовалась прямоугольная сетка с шагом 1,0 м по координатам x и z и с шагом 0,0005 с по времени. Расчётная область простиралась на 200 м по горизонтали и на 75 м по вертикали.

Источник горения задавался в форме прямоугольника, в котором в течение определённого времени, а именно 5 с поддерживалась температура не ниже 1200 К; давление в начальный момент времени совпадало с атмосферным; очаг горения представлялся в виде прямоугольной области размерами $45 \leq x \leq 48$ м и $0 \leq y \leq 6$ м

Описанная выше модель открывает возможность учесть динамику движения дисперсной воды и её превращения в пар. Хотя в модели и принято предположение о малости размеров частиц, она позволяет более детально анализировать динамику взаимодействия подаваемой воды и крупного лесного пожара и вести поиск оптимальных условий её доставки. Применение предложенной модели не ограничивается случаем использования капсул с водой.

Для решения уравнений (2)-(5) применялся метод крупных частиц [29]. Уравнение Гельмгольца (6) решалось при помощи спектрального разложения и трехдиагональной прогонки [30]. Производные по времени дискретизировались при помощи метода Эйлера с учётом корректировки [31, 32] скоростей физико-химических процессов. Данный подход позволил уменьшить скорости там, где при использовании явных численных схем могли бы возникнуть отрицательные значения концентраций, обеспечил устойчивость численной схемы, выполнение законов сохранения при моделировании физико-химических процессов и приемлемую точность. На основе предложенной модели и перечисленных методов разработан авторский программный комплекс и осуществлены расчёты.

3. Результаты моделирования и их анализ

Проанализировано влияние интегрального параметра термоустойчивости оболочки капсулы на процесс горения. В рамках данной задачи были проведены модельные расчёты тушения пожара при различных значениях как количества капсул, так и объёма содержащейся в них воды.

На рисунках представлена динамика гашения пожара, разгоревшегося до стационарного состояния. Векторное поле скорости показывает движение газовой фазы. Температура в градусах Кельвина соответствует цветовой шкале. Тонкая штрихпунктирная линия является линией постоянной концентрации дисперсной воды на уровне 1 кг/м^3 , жирная сплошная линия отвечает концентрации $0,1 \text{ кг/м}^3$, жирная штриховая линия — $0,01 \text{ кг/м}^3$. Сплошная тонкая линия соответствует 5%-ному значению начальной доли сухого органического вещества φ_{1e} .

На рисунке 1 показана динамика тушения при наличии одной капсулы на метр длины фронта пожара, количестве воды $5,36 \text{ кг/м}^2$ и интегральном параметре термоустойчивости $5000 \text{ К}\cdot\text{м}$. Как видно из рисунка, взрыв капсул происходит по всей высоте фронта пожара.

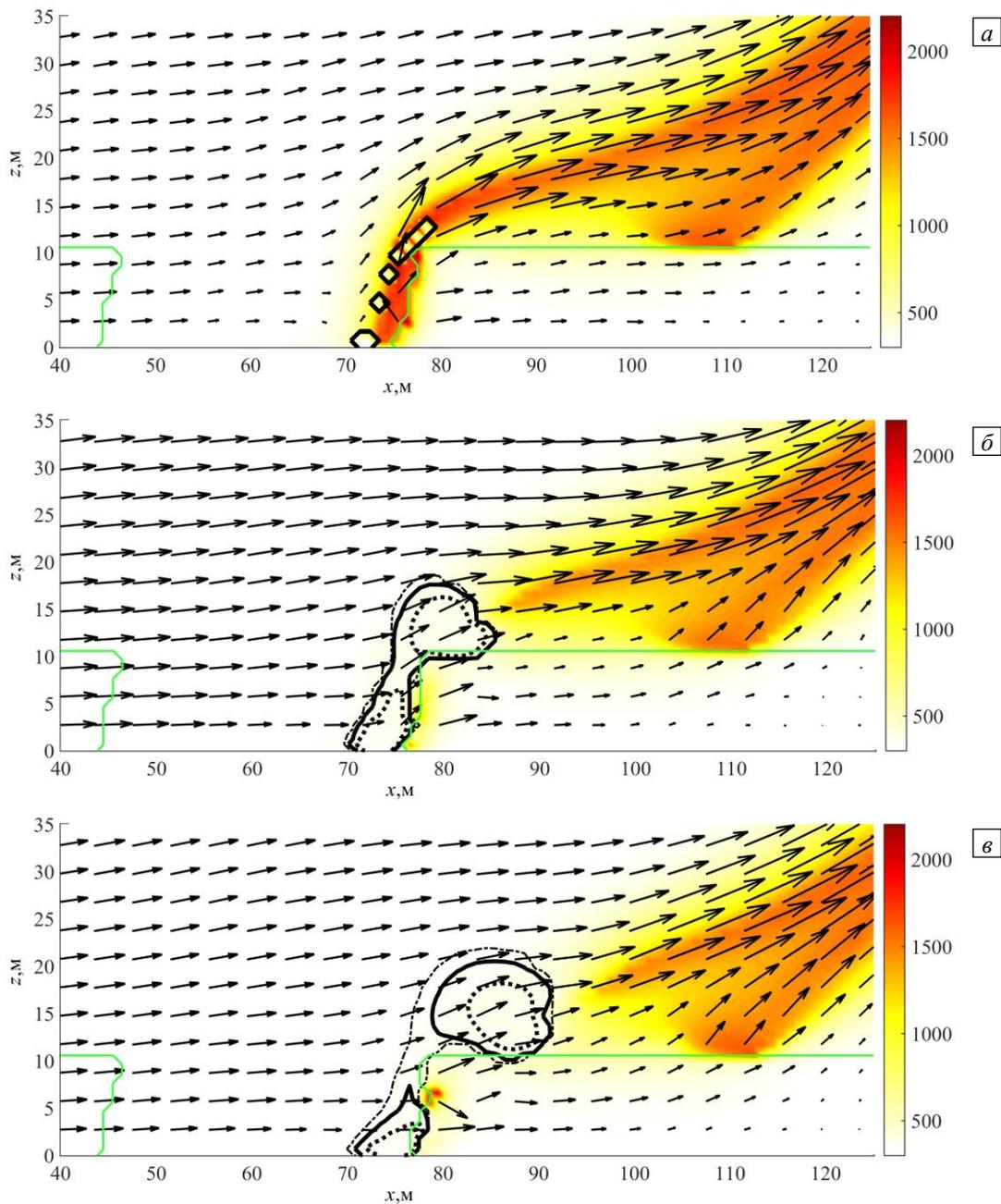


Рис. 1. Динамика тушения лесного пожара капсулами при $n_{\text{wat}}=1$, $m_{\text{wat}}=5,36 \text{ кг/м}^2$, $I_{\text{wat}}=5000 \text{ К}\cdot\text{м}$ по истечении времени t , с: 10 (а); 10,5 (б); 11,25 (в); 13,5 (г); 15 (д)

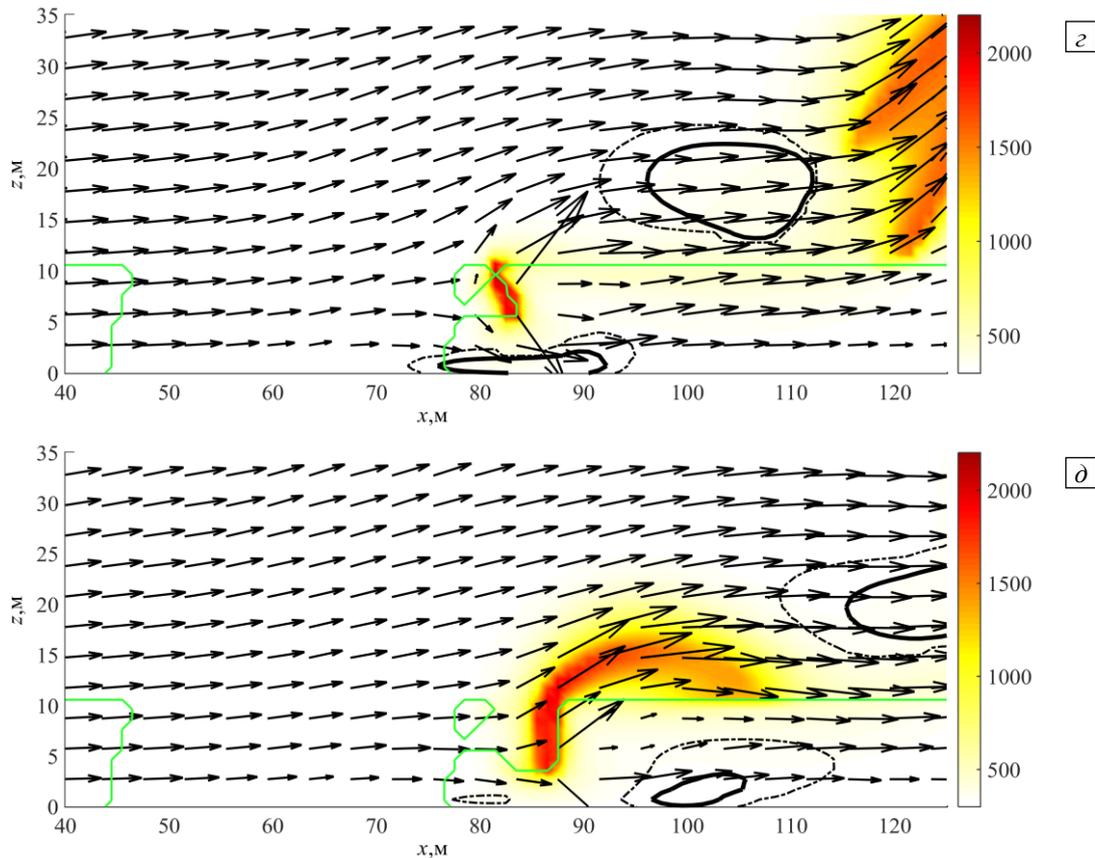


Рис. 1. Продолжение

Образовавшееся облако дисперсной воды понижает температуру горящей растительности и прекращает реакцию горения. Часть капсул, падающих позади фронта, попадают в область низких температур и не успевают разорваться до земли. Испаряясь у поверхности земли, они сносятся конвективным потоком вглубь леса. Массив капель разделяется, его верхняя часть уносится конвективным потоком. Средние слои леса остаются недостаточно охлажденными, и горение возобновляется. При данном соотношении параметров капсулы разрываются в нагретой среде. Тем не менее, внутри полога леса разрыв капсул имеет место на высоте, которой отвечает изотерма 1500 К, а преодолевают эту условную линию только капсулы, разрушающиеся в конвективной колонке. Этот факт негативно отражается на эффективности тушения пожара.

На рисунке 2 показана динамика тушения при 8 капсулах на квадратный метр фронта пожара, количестве воды 3,10 кг/м² и интегральном параметре термоустойчивости 5000 К·м. Капсулы взрываются по всему фронту пожара, образуя облако дисперсной воды, которое сразу делится на несколько небольших частей. Температура в пологе леса остаётся достаточно высокой, и происходит испарение дисперсной воды. Энергия пиролиза и температура в среднем слое растительности способствуют возобновлению горения и быстрому распространению лесного пожара.

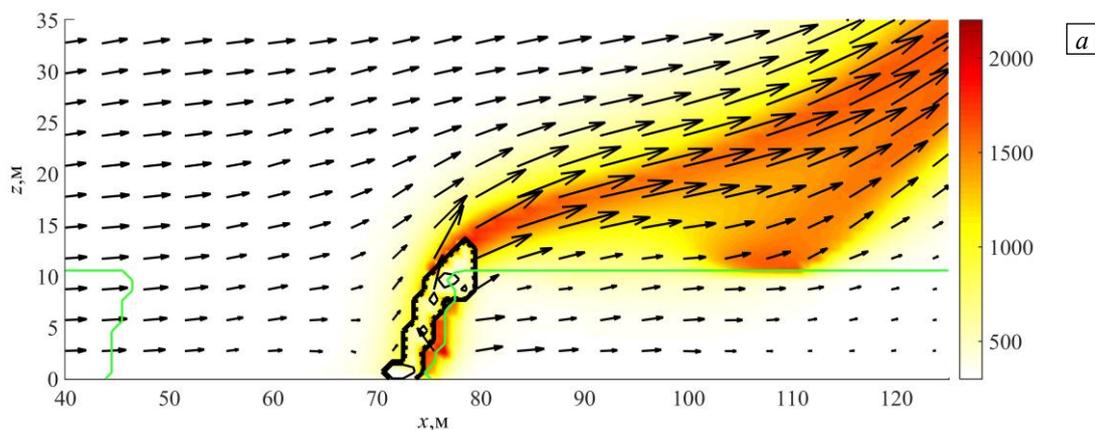


Рис. 2. Динамика тушения лесного пожара капсулами при $n_{wat} = 8$, $m_{wat} = 3,1$ кг/м², $I_{wat} = 5000$ К·м по истечении времени, с: 10 (а); 10,1 (б); 12,5 (в); 15 (г)

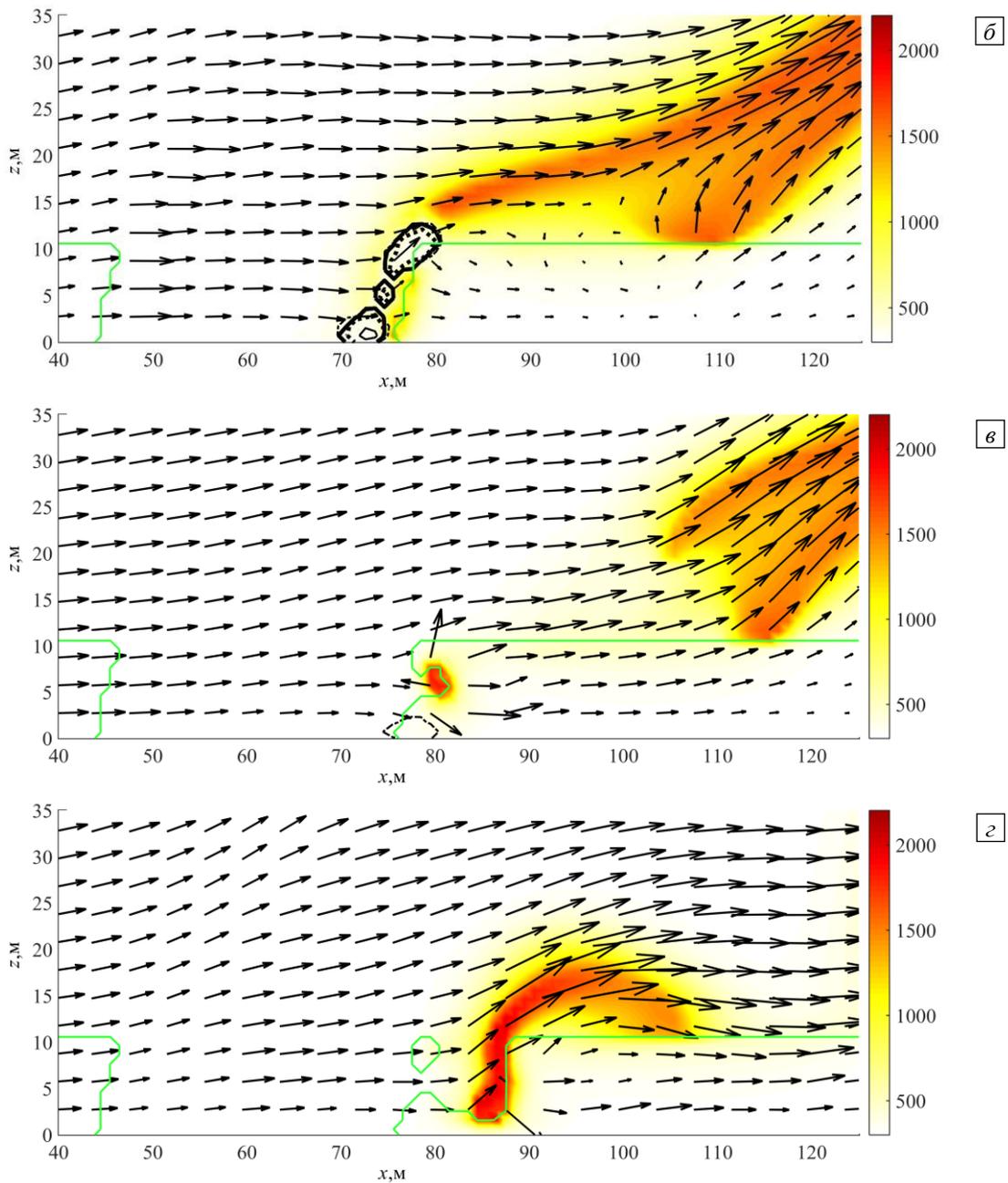


Рис. 2. Продолжение

При увеличении количества воды до $m_{wat} = 3,12 \text{ кг/м}^2$ возобновления горения не наблюдается, пожар затухает, что и показано на рисунке 3.

Рисунки 4 и 5 демонстрируют динамику тушения при $m_{wat} = 1,86 \text{ кг/м}^2$. Капсулы разрываются по всему фронту пожара с концентрацией в среднем и нижнем ярусах лесного массива. Малое количество воды и высокая термоустойчивость капсул не позволяют разорваться их достаточному количеству в верхних слоях и охладить растительность верха лесного полога. Здесь по истечении 10,1 с после выброса дисперсная вода испаряется; лишь небольшое количество воды остаётся в нижней части слоя растительности. В области, где имело место испарение дисперсной воды, температура среды падает ниже 500 К. Это препятствует нагреву лесной растительности и способствует рассеиванию тепловой энергии. Горячая среда уносится из верхнего слоя растительности вместе с конвективной колонкой. При данном сценарии доля дисперсной воды, не израсходованной на охлаждение среды, минимальна. Кроме того, вода не тратится на охлаждение газовой смеси продуктов горения, которая уносится конвективным потоком.

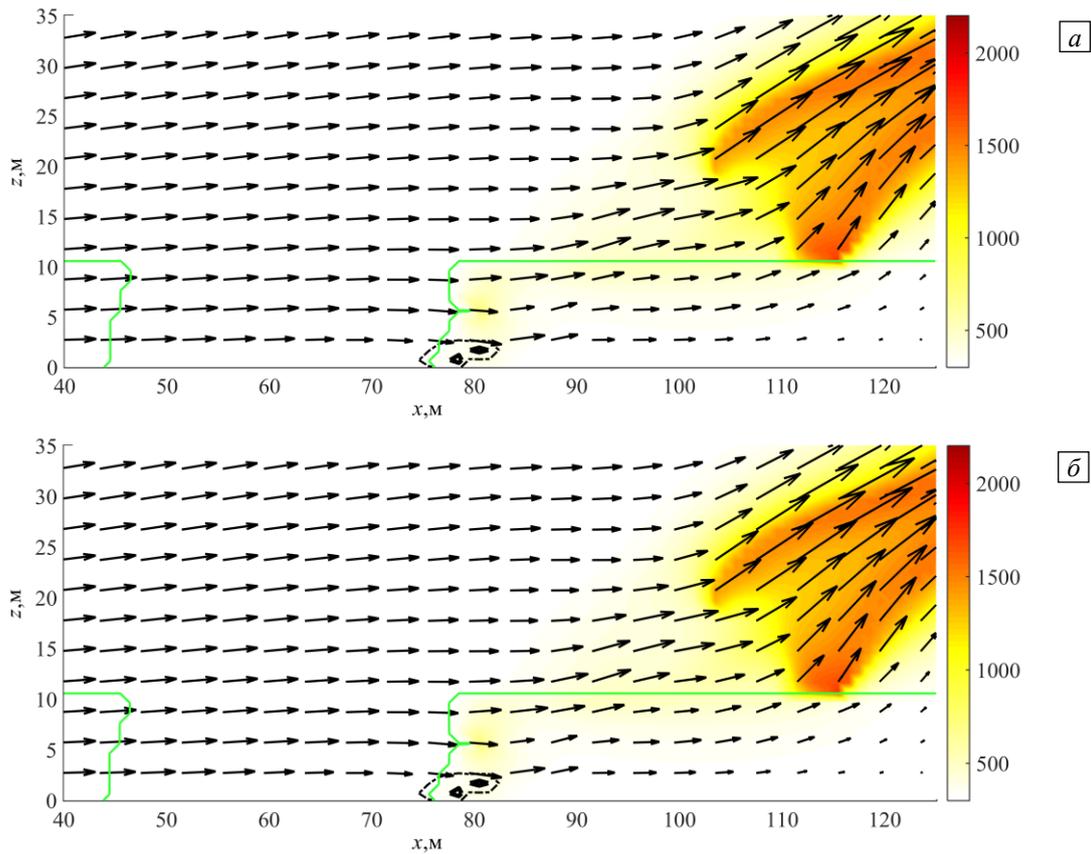


Рис. 3. Динамика тушения лесного пожара капсулами при $n_{wat} = 8$, $m_{wat} = 3,12$ кг/м², $I_{wat} = 5000$ К·м по истечении времени, с: 11,5 (а) и 12,375 (б)

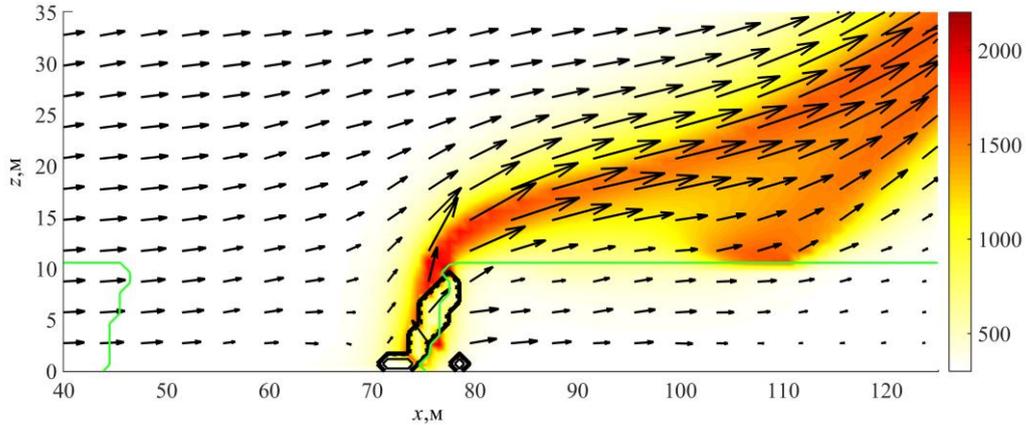


Рис. 4. Динамика тушения лесного пожара капсулами при $n_{wat} = 4$, $m_{wat} = 1,86$ кг/м², $I_{wat} = 10000$ К·м через 10 с

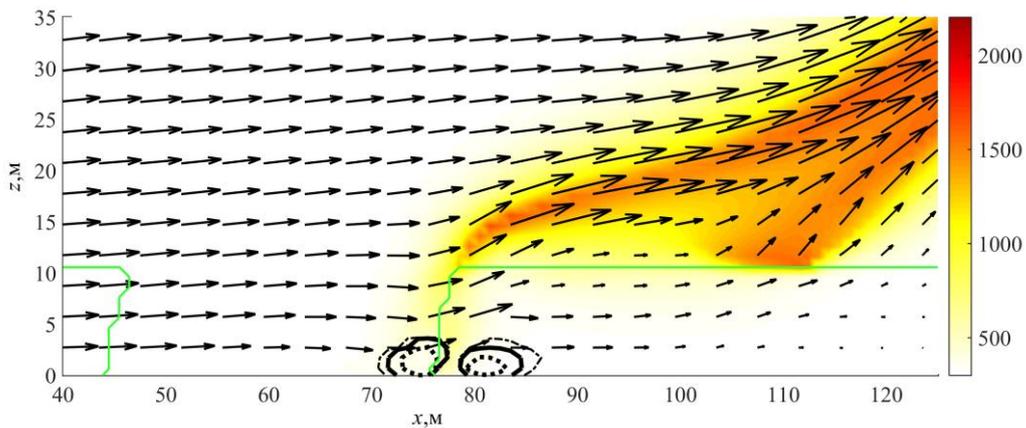


Рис. 5. Динамика тушения лесного пожара капсулами при $n_{wat} = 4$, $m_{wat} = 1,86$ кг/м², К·м через 10,5 с

Обобщённые результаты исследований эффективности пожаротушения приведены в таблице. Показанные значения соответствуют критическим величинам расхода воды при использовании заданного числа капсул и их интегральном параметре термоустойчивости. Под критической понимается подача такого количества воды, которое позволяет прекратить распространение пожара, а при меньшем объёме пожар возобновляется.

Таблица. Критическое значение расхода воды, кг/м²

Интегральный параметр термоустойчивости капсулы $I_{wat}, K \cdot m$	1	2000	5000	10000	25000
Число капсул на метр длины фронта пожара					
1	>40	13,67	5,37	2,55	>40
4	>40	7,29	3,63	1,85	>40
8	>40	4,67	3,11	2,53	>40
16	32,87	4,55	3,17	3,59	>40
64	17,99	5,19	3,55	>40	>40

Критический расход воды показывает, что эффективность тушения при одной капсуле на метр длины фронта пожара зависит от интегрального параметра термоустойчивости. Увеличение его значения смещает вниз область разрыва оболочек за счёт удлинения пути, который они могут преодолеть в нагретой среде. Увеличение числа последовательно сбрасываемых капсул приводит к высвобождению части дисперсной воды каждый раз ниже предыдущего. При уменьшении значения параметра термоустойчивости требуемое количество воды снижается, так как становится возможной доставка воды в нижнюю часть слоя лесной растительности. При более высокой термоустойчивости увеличение количества капсул может приводить как к положительным, так и к отрицательным эффектам. Так, при значении интегрального параметра 10000 К·м использование 4 капсул обеспечивает эффективное тушение. Последовательный сброс 64 капсул не приводит к гашению пожара, так как вода не попадает в достаточном количестве в верхнюю часть слоя растительности, и горение там не прекращается, пожар продолжает распространяться. Низкая термоустойчивость капсул не позволяет им пролетать до зоны уязвимости пожара, и вода, выбрасываемая в верхнем ярусе, испаряется и уносится конвективным потоком. Горение в нижнем ярусе продолжается. При слишком высоком интегральном параметре термоустойчивости эффективность тушения низкая. Капсулы, пролетая верхний и средний ярусы, разрываются или в нижнем ярусе, или от столкновения с землей. Количество испаряющейся в нижнем ярусе воды недостаточно для ликвидации горения. Большое значение критического расхода воды показывает неэффективность тушения при малом значении интегрального параметра термоустойчивости. Показана неэффективность использования капсул с высоким интегральным параметром термоустойчивости независимо от количества капсул на метр длины фронта.

Согласно [33, 34] расход воды составляет 5 дм³/м² кромки пожара. Расчёты в [35] свидетельствуют, что на прекращение пламенного горения 1 кг топлива с теплотой сгорания 40-50 МДж требуется 2 кг воды. Отмечается, что на практике расход выше в 5-10 раз. Если считать, что основной эффект от воды — охлаждение, то расход будет пропорционален теплотворной способности топлива.

В данной работе брались в расчёт плотность растительности 20 кг/м² и теплотворная способность 11 МДж. Таким образом, согласно методике расчёта из [35], расход составил 10 кг/м², а с учётом ширины кромки — 30 кг/м. Размер области покрытия капсул получился равным 8 м. Таким образом, в наилучшем случае общий расход будет 14,8 кг/м, что существенно меньше, чем при использовании традиционных методов тушения. Эффективность применения капсул с термоактивной оболочкой зависит от того, какая доля воды переходит в форму мелких частиц, что в свою очередь определяется физико-механическими свойствами самих капсул.

4. Выводы

В работе проведен анализ влияния интегрального параметра термоустойчивости оболочки капсулы на процесс тушения. Показано, что при низком значении интегрального параметра термоустойчивости наблюдается образование из освободившейся воды облака дисперсных частиц, которые быстро испаряются над пламенем пожара и не успевают достичь зоны его уязвимости. При большом количестве сбрасываемых капсул дисперсная вода всё же достигает нижней части слоя растительности. Но для успешного подавления горения требуется большой объём воды. Слишком высокий интегральный параметр термоустойчивости оболочки приводит к разрыву капсулы на поверхности земли, что оказывается неэффективным при воздействии на верховые пожары.

Использование капсул, способных преодолеть некоторое расстояние в нагретой среде, позволяет существенно уменьшить расход воды в результате охлаждения среды в области изотермических процессов. Ограничением данного подхода является необходимость в создании 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 // Environ. Manag. 2011. Vol. 48. P. 558-567. <https://doi.org/10.1007/s00267-011-9681-9>
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 Syst. Sci. Data. 2017. Vol. 9. P. 697-720. <https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017>
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 Науч.-практ. конф. «Проблемы горения и тушения пожаров на рубеже веков». Москва, 3-4 ноября 1999 г. М.: Всерос. науч.-исслед. ин-т противопожар. обороны МВД России, 1999. Ч. 1. С. 300-301.
5. Абдурагимов И.М., Куприн Г.Н., Куприн Д.С. Быстротвердеющие пены – новая эра в борьбе с лесными пожарами // Пожары и ЧС. 2016. № 2. С. 7-13. <https://doi.org/10.25257/FE.2016.2.7-13>
6. Копылов Н.П., Карпов В.Н., Кузнецов А.Е., Д.В. Федоткин, Хасанов И.Р., Сушкина Е.Ю. Особенности тушения лесных пожаров с применением авиации // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2019. № 59. С. 79-86. <https://doi.org/10.17223/19988621/59/8>
7. Satoh K., Maeda I., Kiwahara K., Yang K.T. A numerical study of water dump in aerial fire fighting // Fire Safety Science. 2005. Vol. 8. P. 777-787. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.8-777>
8. Алеханов Ю.В., Близнецов М.В., Власов Ю.А., Дудин В.И., Левушов А.Е., Логинов А.И., Ломтев С.А., Мешков Е.Е. Взаимодействие диспергированной воды с пламенем // ПЖТФ. 2003. Т. 29, № 6. С.1-6. (English version <https://doi.org/10.1134/1.1565638>)
9. Мешков Е.Е., Орешков В.О., Янбаев Г.М. Образование облака капель при разрушении водяного ядра в процессе свободного падения // ПЖТФ. 2011. Т. 37, № 15. С. 79-86. (English version <https://doi.org/10.1134/S1063785011080116>)
10. SEM-SAFE® by Danfoss High-Pressure Water Mist Fire Fighting System <https://semsafe.danfoss.com/technologies/watermist/> (дата обращения: 04.04.2020).
11. Raoult F., Lacour S., Carissimo B., Trinquet F., Delahaye A., Fourmaison L. CFD water spray model development and physical parameter study on the evaporative cooling // Appl. Therm. Eng. 2019. Vol. 149. P. 960-974. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.063>
12. Śmigielski G., Lewandowski D., Dygdała R.S., Stefański K., Urbaniak W. Water capsule flight – a theoretical analysis and experimental verification // Metrology and Measurement Systems. 2009. Vol. 16. P. 313-322. https://www.researchgate.net/publication/236853073_Water_capsule_flight_-_A_theoretical_analysis_experimental_setup_and_experimental_verification (дата обращения: 04.11.2020)
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 // Proc. of the XIX IMEKO World Congress on Fundamental and Applied Metrology. Lisbon, Portugal, September 6-11, 2009. P. 2208-2213.
14. Li Z., Wang Q. Experimental study of explosive water mist extinguishing fire // Procedia Engineering. 2011. Vol. 11. P. 258-267. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.655>
15. Dale E.K. Simulation and modelling of water spray in the 3D explosion simulation program FLACS. The University of Bergen, 2004. 149 p. <http://bora.uib.no/bitstream/handle/1956/1326/Masteroppgave-dale.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения: 04.04.2020).
16. <https://www.emicontrols.com/en/fire-fighting/application-areas/forest-fires> (дата обращения: 04.04.2020).
17. Aydin B., Selvi E., Tao J., Starek M.J. Use of fire-extinguishing balls for a conceptual system of drone-assisted wildfire fighting // Drones. 2019. Vol. 3. 17. <https://doi.org/10.3390/drones3010017>
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 // ДАН. 2017. Т. 475, № 2. С. 145-149. <https://doi.org/10.7868/s0869565217200063>
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 // Труды седьмой Российской национальной конференции по теплообмену. РНКТ-7, Москва, 22-26 октября 2018 г. М.: Издат. дом МЭИ, 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 // ИФЖ. 2019. Т. 92, № 3. С. 711-717. (English version <https://doi.org/10.1007/s10891-019-01978-8>)
21. Волков Р.С., Копылов Н.П., Кузнецов Г.В., Хасанов И.Р. Экспериментальное исследование процессов подавления верхового и низового лесных пожаров // ИФЖ. 2019. Т. 92, № 6. С. 2497-2510. (English version <https://doi.org/10.1007/s10891-019-02064-9>)
22. Nijdam J.J., Guo B., Fletcher D.F., Langrish T.A.G. Lagrangian and Eulerian models for simulating turbulent dispersion and coalescence of droplets within a spray // Appl. Math. Model. 2006. Vol. 30. P. 1196-1211. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2006.02.001>
23. Beau P.A. Modelisation de l'atomisation d'un jet liquid. Application aux sprays diesel / PhD Dissertation, Rouen: University of Rouen. 2006. 205 p.
24. Babinsky E., Sojka P.E. Modeling drop size distributions // Progr. Energ. Combust. Sci. 2002. Vol. 28. P. 303-329.

- [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(02\)00004-7](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(02)00004-7)
25. <https://hightech.fm/2020/01/22/elbit-systems> (дата обращения: 04.08.2020).
 26. <https://caulym.com/> (дата обращения: 04.08.2020).
 27. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 407 с.
 28. Катаева Л.Ю., Масленников Д.А., Лоцилова Н.А. Определение закономерностей подавления волны горения свободной водой в однородном пористом слое органических горючих материалов // Изв. РАН. МЖГ. 2016. № 3. С. 99-109. <https://doi.org/10.7868/S0568528116030075>
 29. Бабкин А.В., Колтаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. Численные методы в задачах физики быстропротекающих процессов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 520 с.
 30. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М.: Наука, 1989. 432 с.
 31. Масленников Д.А., Белоцерковская И.Е., Лоцилов С.А., Катаева Л.Ю. Особенности математического моделирования распространения суммарного теплового потока при лесных пожарах. Н.Новгород: Стимул-СТ, 2012. 110 с.
 32. Катаева Л.Ю., Масленников Д.А., Белоцерковская И.Е. Численное моделирование динамики пожара с учетом рельефа местности и внешнего поля скоростей // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21, № 12. С. 49-58.
 33. Абдурагимов И.М., Говоров В.Ю., Макаров В.Е. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980. 256 с.
 34. Гундар С.В., Денисов А.Н. Риск потерь воды при тушении лесных пожаров // Материалы XX научно-техн. конф. «Системы безопасности – 2011». Москва, 27 октября 2011 г. М.: Академия ГПС МЧС России, 2011. С. 166-169.
 35. Гундар С.В., Денисов А.Н., Трифонов Н.Я. Приемлемый лесопожарный риск // Пожаровзрывобезопасность. 2009. Т. 18, № 3. С. 57-66.

References

1. Vile'n T., Fernandes P.M. Forest fires in mediterranean countries: CO₂ emissions and mitigation possibilities through prescribed burning. *Environ. Manag.*, 2011, vol. 48, pp. 558-567. <https://doi.org/10.1007/s00267-011-9681-9>
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 Syst. Sci. Data*, 2017, vol. 9, pp. 697-720. <https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017>
3. Kovalev A.N., Zhuravleva L.A. Perspective directions of suppressing forest and steppe fires. *Nauchnaya zhizn' – Scientific Life*, 2012, no. 4, pp. 153-157.
4. Khasanov I.R., Moskvilin E.A. XV Scientific-practical conf. «Problems of burning and extinguishing fires at the turn of the century», Moscow, November 3-4, 1999. Moscow, All-Russian Scientific Research Institute of Fire Protection of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 1999. Part 1, pp. 300-301.
5. Abduragimov I.M., Kuprin G.N., Kuprin D.S. Fast-hardening foams – a new era in fighting forest fires *Pozhary i ChS*, 2016, no. 2, pp. 7-13. <https://doi.org/10.25257/FE.2016.2.7-13>
6. Kopylov N.P., Karpov V.N., Kuznetsov A.E., D.V. Fedotkin, Khasanov I.R., Sushkina E.Yu. Peculiarities of the forest firefighting with the use of aircrafts. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, 2019, no. 59, pp. 79-86. <https://doi.org/10.17223/19988621/59/8>
7. Satoh K., Maeda I., Kuwahara K., Yang K.T. A numerical study of water dump in aerial fire fighting. *Fire Safety Science*, 2005, vol. 8, pp. 777-787. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.8-777>
8. Alekhanov Yu.V., Bliznetsov M.V., Vlasov Yu.A., Dudin V.I., Levushov A.E., Logvinov A.I., Lomtev S.A., Meshkov E.E. Interaction of dispersed water with flame. *Tech. Phys. Lett.*, 2003, vol. 29, pp. 218-220. <https://doi.org/10.1134/1.1565638>
9. Meshkov E.E., Oreshkov V.O., Yanbaev G.M. Droplet cloud formation upon disintegration of free-falling water ball. *Tech. Phys. Lett.*, 2011, vol. 37, pp. 728-730. <https://doi.org/10.1134/S1063785011080116>
10. SEM-SAFE® by Danfoss High-Pressure Water Mist Fire Fighting System <https://semsafe.danfoss.com/technologies/watermist/> (accessed 04 April 2020).
11. Raoult F., Lacour S., Carissimo B., Trinquet F., Delahaye A., Fournaison L. CFD water spray model development and physical parameter study on the evaporative cooling. *Appl. Therm. Eng.*, 2019, vol. 149, pp. 960-974. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.063>
12. Śmigielski G., Lewandowski D., Dygdała R.S., Stefański K., Urbaniak W. Water capsule flight – a theoretical analysis and experimental verification. *Metrology and Measurement Systems*, 2009, vol. 16, pp. 313-322. https://www.researchgate.net/publication/236853073_Water_capsule_flight_-_A_theoretical_analysis_experimental_setup_and_experimental_verification (accessed 04 November 2020).
13. Śmigielski G., Dygdała R., Kunz M., Lewandowski D., Stefański K. *Proc. of the XIX IMEKO World Congress on Fundamental and Applied Metrology. Lisbon, Portugal, September 6-11, 2009. Pp. 2208-2213.*
14. Li Z., Wang Q. Experimental study of explosive water mist extinguishing fire. *Procedia Engineering*, 2011, vol. 11, pp. 258-267. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.655>
15. Dale E.K. *Simulation and modelling of water spray in the 3D explosion simulation program FLACS*. The University of Bergen, 2004. 149 p. <http://bora.uib.no/bitstream/handle/1956/1326/Masteroppgave-dale.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (accessed: 04 april 2020).
16. <https://www.emiconcontrols.com/en/fire-fighting/application-areas/forest-fires> (accessed: 04april2020).
17. Aydin B., Selvi E., Tao J., Starek M.J. Use of fire-extinguishing balls for a conceptual system of drone-assisted wildfire fighting. *Drones*, 2019, vol. 3, 17. <https://doi.org/10.3390/drones3010017>
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. *Dokl. Phys.*, 2017, vol. 62, pp. 333-336.

- <https://doi.org/10.1134/S1028335817070060>
19. Zhdanova A.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., SHlegel' N.E. *Proc. of the Seventh Russian Conference on Heat Transfer. Moscow, 22-26 October 2018. Moscow, Izdat. dom MEI, 2018. Pp. 236-239.*
 20. Zhdanova A.O., Kuznetsov G.V., Nyashina G.S., Voitkov I.S. Interaction of a liquid aerosol with the combustion front of a forest combustible material under the conditions of countercurrent air flow. *J. Eng. Phys. Thermophy.*, 2019, vol. 92, pp. 687-693. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-01978-8>
 21. Volkov R.S., Kopylov N.P., Kuznetsov G.V., Khasanov I.R. Experimental investigation of the suppression of crown and ground forest fires. *J. Eng. Phys. Thermophy.*, 2019, vol. 92, pp. 1453-1465. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-02064-9>
 22. Nijdam J.J., Guo B., Fletcher D.F., Langrish T.A.G. Lagrangian and Eulerian models for simulating turbulent dispersion and coalescence of droplets within a spray. *Appl. Math. Model.*, 2006, vol. 30, pp. 1196-1211. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2006.02.001>
 23. Beau P.A. *Modelisation de l'atomisation d'un jet liquid. Application aux sprays diesel.* PhD Dissertation, Rouen: University of Rouen. 2006. 205 p.
 24. Babinsky E., Sojka P.E. Modeling drop size distributions. *Progr. Energ. Combust. Sci.*, 2002, vol. 28, pp. 303-329. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(02\)00004-7](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(02)00004-7)
 25. <https://hightech.fm/2020/01/22/elbit-systems> (accessed: 04 august 2020).
 26. <https://caylym.com/> (accessed: 04 august 2020).
 27. Grishin A.M. *Matematicheskoye modelirovaniye lesnykh pozharov i novyye sposoby bor'by s nimi* [Mathematical modeling of forest fires and new ways to combat them]. Novosibirsk, Nauka, 1992. 407 p.
 28. 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 Dyn.*, 2016, vol. 51, pp. 389-399. <https://doi.org/10.1134/S001546281603011X>
 29. Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., Selivanov V.V. *Chislennyye metody v zadachakh fiziki bystroprotekayushchikh protsessov* [Numerical methods in problems of physics of fast processes]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2006. 520 p.
 30. SamarSKIY A.A., GulIN A.V. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moscow, Nauka, 1989. 432 p.
 31. Maslennikov D.A., Belotserkovskaya I.E., Loshchilov S.A., Katayeva L.Yu. *Osobennosti matematicheskogo modelirovaniya rasprostraneniya summarnogo teplovogo potoka pri lesnykh pozharakh* [Features of mathematical modeling of the spread of the total heat flow during forest fires]. N.Novgorod, Stimul-ST, 2012. 110 p.
 32. Katayeva L.Yu., Maslennikov D.A., Belotserkovskaya I.E. Chislennoye modelirovaniye dinamiki pozhara s uchetom rel'yefa mestnosti i vneshnego polya skorostey [Numerical modeling of fire dynamics taking into account the terrain and external velocity field]. *Pozharovzryvbezopasnost' – Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 12, pp. 49-58.
 33. Abduragimov I.M., Govorov V.YU., Makarov V.E. *Fiziko-khimicheskiye osnovy razvitiya i tusheniya pozharov* [Physicochemical bases of development and extinguishing of fires]. Moscow, VIPTSh MVD SSSR, 1980. 256 p.
 34. Gundar S.V., Denisov A.N. *XX scientific and technical conf. "Security Systems – 2011". Moscow, October 27, 2011. Moscow, Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2011. Pp. 166-169.*
 35. Gundar S.V., Denisov A.N., Trifonov N.Ya. Priyemlemyy lesopozharnyy risk [Acceptable forest fire risk]. *Pozharovzryvbezopasnost' – Fire and Explosion Safety*, 2009, vol. 18, no. 3, pp. 57-66.

Поступила в редакцию 16.07.2020; после доработки 24.09.2020; принята к опубликованию 24.09.2020

Сведения об авторах

Катаева Лилия Юрьевна, дфмн, проф., Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС), 443066, г. Самара, ул. Свободы, 2 В; e-mail: kataeva2010@mail.ru

Ильичева Мария Николаевна, ст. препод., Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева (НГТУ им. Р.Е. Алексева), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24; e-mail: roman99@mail.ru

Лоцилов Александр Андреевич, асп., НГТУ им. Р.Е. Алексева; e-mail: aloschil@gmail.com