

УДК 614.841.42.02:630*43:519.876

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ НИЗОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ ПРИ НАЛИЧИИ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ РАЗРЫВОВ

Старцева Д.А., студент гр. 1ЕМ91, II курс
 Научный руководитель: Перминов В.А., д.ф.-м.н., профессор
 Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
 г. Томск

В настоящее время прогнозирование процессов возникновения и последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС) остается трудной задачей. Это связано с тем, что чрезвычайным ситуациям характерны такие свойства как внезапность возникновения, быстрота развития, цепной неопределенный характер развития, часто неполнота и неточность исходных данных. Поэтому часто единственной возможностью для предсказания развития ЧС является математическая модель [1]. К наиболее опасным ЧС относятся лесные пожары, которые, как правило, начинаются с возникновения низовых пожаров и далее переходят в верховые, которые наносят огромный ущерб и могут привести к гибели людей и пожарам в населенных пунктах. В связи с этим является актуальным проведение профилактических противопожарных мероприятий, таких как создание противопожарных разрывов в лесных массивах. Перспективным направлением для проведения научных исследований по данному направлению является метод математического моделирования [2,3].

Для получения достоверных результатов расчетов важно, чтобы полученные результаты распространения фронта горения при моделировании совпадали с экспериментальными данными. Достоверность результатов, полученных с использованием математической модели, была подтверждена сравнением с экспериментальными данными о распространении низового лесного пожара в слое иголок сосны [2]. Прогнозируемая скорость распространения огня согласуется с экспериментальными значениями при различных скоростях ветра от 1 до 3 м/с (Рисунок 1).

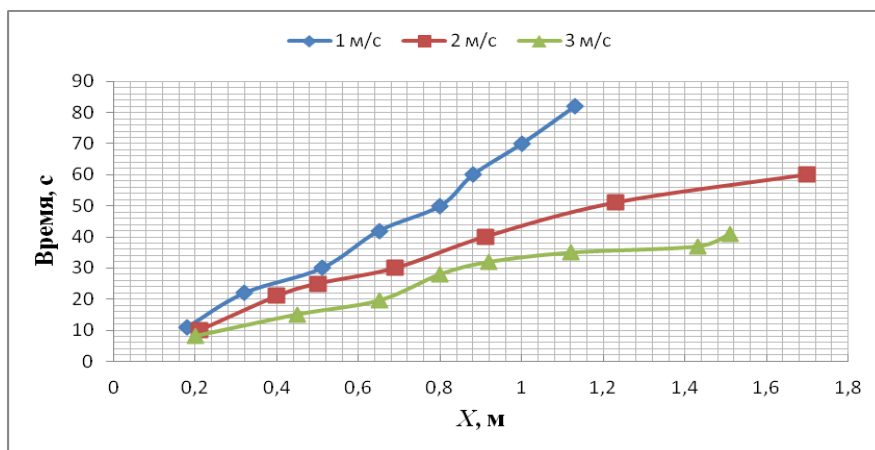


Рисунок 1 – График распространения фронта пиролиза при моделировании для скоростей ветра 1 м/с, 2 м/с, 3 м/с; Δ , \square – данные экспериментальных исследований.

Результаты показывают, что скорость распространения пожара возрастает со скоростью ветра. Скорость распространения уменьшается при увеличении влагосодержания в лесном массиве. Как видно из графика, результаты численных расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными, что свидетельствует о достоверности модели.

В ходе исследования были определены размеры противопожарных разрывов при наличии скорости ветра и влагосодержания лесных горючих материалов (ЛГМ).

Основные допущения, принятые при выводе системы уравнений начальных и граничных условий.

1. Ветер направлен вдоль горизонтальной оси x_1 ;

2. Растительный покров представляет собой многофазную пространственно-неоднородную среду;
3. Предполагается, что слой ЛГМ является недеформируемой пористой средой, которая влияет только на величину силы сопротивления в уравнении сохранения импульса в газовой фазе;
4. В зоне пожара лес представляет собой пористо-дисперсную, многофазную, двухтемпературную односкоростную среду, т.к. различаются температура газовой и конденсированной фазы;
5. Учитываются энергетические и физико-химические процессы при лесном пожаре;
6. Поток имеет развитую турбулентную природу, а ламинарным переносом пренебрегают;
7. Плотность газовой фазы не зависит от давления, т.к. скорость течения мала по сравнению со скоростью звука;
8. Перенос энергии осуществляется путем турбулентной конвекции и излучения.

В данном случае противопожарный разрыв рассматривается в нижнем ярусе леса и имеет конечные размеры в направлении распространения фронта низового лесного пожара и достаточно большую протяженность в перпендикулярном направлении. В процессе расчетов были рассмотрены различные размеры противопожарных разрывов.

Следуя подходу многофазного моделирования, лес рассматривается как химически реагирующая многофазная среда, содержащая газовую фазу с объемной долей (φ_g) и конденсированную фазу с объемной долей (φ_s) [3]. Математическая задача сводится к системе уравнений [3,4], каждое из которых может быть записано в виде (1):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \Phi - \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_i}) = S_\Phi \quad (1)$$

Здесь t время; x_i – пространственная координата ($i = 1, 2, 3$); ρ – плотность газодисперсной смеси; u_i – компонента скорости в направлении оси x_i , Γ_Φ – коэффициент переноса, S_Φ – источниковый член, φ_g – объемная доля газовой фазы, принимается равной в уравнении (1) как $\varphi_g = 1 - \varphi_s$, где φ_s – объемная доля конденсированной фазы, значение которой очень мало ($\varphi_s < 0,016$). Плотность газа рассчитывается из уравнения состояния идеального газа для смеси газов: $p = \rho RT \sum_{\alpha=1}^3 \frac{c_\alpha}{M_\alpha}$, где p – давление газа; T – абсолютная температура газа; R – универсальная газовая постоянная; c_α – является массовой концентрацией α - компонента газовой смеси; индекс $\alpha = 1,2,3$, где 1 соответствует кислороду, 2 – летучие горючие продукты пиролиза (СО, метан, водород и др.), 3 – инертные компоненты газовой фазы; M – молекулярная масса; α – компонента газовой фазы; Φ – обобщенная переменная (температура, массовая концентрация α – компонента газовой фазы, i – компонента скорости, плотность энергии излучения).

Для численного решения поставленной задачи расчётную область разбиваем на некоторое число не пересекающихся контрольных объёмов. Затем исходную систему уравнений интегрируем по каждому контрольному объёму. Полученная система алгебраических уравнений, возникающая в процессе дискретизации, решалась итерационно с помощью метода SIP [5].

В ходе исследования были определены зависимости размеров противопожарных разрывов в нижнем ярусе леса [3] от скорости ветра и влагосодержания ЛГМ. Полученные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов размера противопожарного разрыва в зависимости от влагосодержания и скорости ветра

Влагосодержание лесного массива								
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Скорость ветра 1 м/с								
Размер противопожарного разрыва, м	0,77	0,6	0,51	0,44	0,3	0,19	0,11	0,08
Скорость ветра 2 м/с								
Размер противопожарного разрыва, м	1,07	0,87	0,65	0,54	0,42	0,32	0,26	0,1
Скорость ветра 3 м/с								
Размер противопожарного разрыва, м	1,32	1,01	0,86	0,65	0,52	0,39	0,25	0,18

Расчеты проводились со следующими параметрами для нижнего яруса леса: запас ЛГМ в хвойном массиве $11,75 \text{ кг/м}^3$, значение влагосодержания ЛГМ изменялось в диапазоне от 0,5 до 1. Использовались термокинетические постоянные и остальные параметры для соснового леса [3].

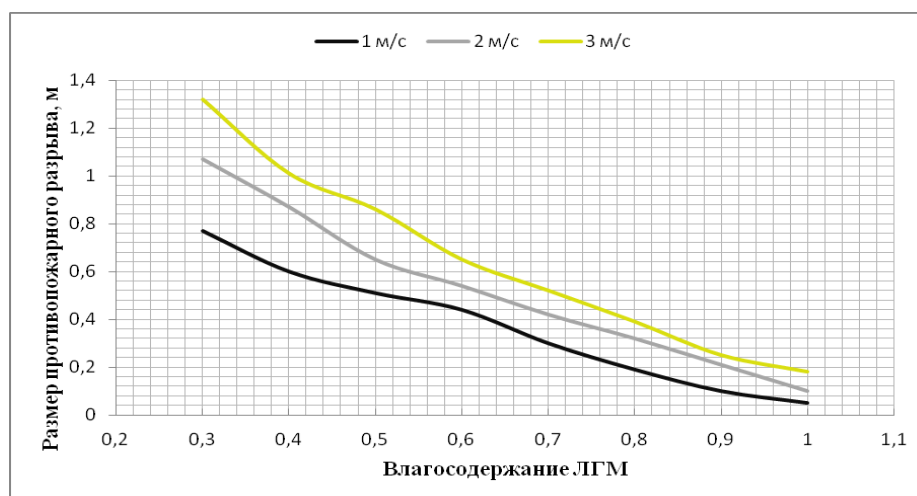


Рисунок 3 – Зависимость размеров противопожарного разрыва от влагосодержания ЛГМ при различных скоростях ветра.

Из графика следует, что зависимость размеров противопожарных разрывов имеет вид убывающей функции. С увеличением влагосодержания ЛГМ величина размера разрыва уменьшается, и стремится к нулю, так как при определенных значениях влагосодержания горение прекращается. Очевидно, что для распространения пожара через слой влажной растительности требуется больше энергии для испарения избытка воды, а также уменьшение массовой доли кислорода, возникающее в результате разбавления водяным паром перед фронтом огня, способствует тушению пламени. Увеличение скорости ветра приводит к увеличению скорости распространения фронта пожара [6].

Список литературы:

1. Шаптала В.Г. Основы моделирования чрезвычайных ситуаций: учебное пособие / В.Г. Шаптала, В.Ю. Радоуцкий, В.В. Шаптала; под общ. ред. В.Г. Шапталы. – Белгород: изд-во БГТУ, 2010. –166 с.
2. Porterie B., Morvan D, Larini M, Loraud J.C. (2000) Firespread through fuel beds: modeling of wind-aided fires and induced hydrodynamics. *Physics of Fluids*, 12, P.1762-1782.
3. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. – Новосибирск: Наука, 1992. - 408 с.
4. Agranat V. Mathematical modeling of wildland fire initiation and spread /V.Agranat, V.A.Perminov // *Environmental modelling and software*. – 2020. – Vol. 125.
5. Патанкар С.В. Численные методы динамики жидкости и теплообмена. - М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
6. Старцева Д.А. Численное решение задачи об определении размеров противопожарных разрывов при низовых лесных пожарах. // *Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее. Сборник научных трудов VIII Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее»*. – Томск: Изд. НИ ТПУ, 2019. С. 285-289.