

Таблица 4 – Оценка рисков

Цена на дизель, тыс. руб./м <sup>3</sup>	Затраты на дизель, тыс. руб./мес
7	1777,5
8	1953,56
20	4066,4

**Заключение.** Данное исследование показывает, что солнечные панели на нефтяных танкерах превосходят все традиционные виды топлива, как в экологическом, так и в экономическом плане, следовательно, требуют обязательно внедрения в данный процесс.

#### Список литературы

1. Р.А. Алиев Трубопроводный транспорт нефти и газа: Учебник для ВУЗов / Алиев Р.А., Белоусов Д.В. – Москва: «Недра», 1988.
2. Т. Байерс. 20 конструкций с солнечными элементами / Т. Байерс – Москва: Мир, 1988. – 197 с. с иллюстрациями
3. Стэн Гибилиско. Альтернативная энергетика без тайн / Гибилиско Стэн. – Москва: Эксмо-Пресс, 2010. – 368 с. с иллюстрациями.
4. Н.Н. Герасименко. Кремний – материал нанoeлектроники / Герасименко Н.Н, Пархоменко Ю.Н. – Москва: Техносфера, 2007. - 351 с. с иллюстрациями.

УДК 614.841.42.02:630\*43:519.876

### ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ РАЗМЕРОВ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ РАЗРЫВОВ ПРИ НИЗОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРАХ

*Старцева Дарья Андреевна*

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск*

*E-mail: das44@tpu.ru*

### NUMERICAL SOLUTION OF THE PROBLEM ON THE DETERMINATION OF THE SIZES OF FIREPROOF FIRE IN THE SURFACE FIRES

*Startceva Darya Andreeva*

*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk*

**Аннотация:** Эта статья посвящена разработке математической модели для изучения распространения лесных низовых пожаров. В работе приводятся результаты расчетов противопожарных разрывов с учетом скорости ветра и влагосодержания лесных горючих материалов. В состав модели входят все важные физико-химические процессы горения: сушка горючего материала, пиролиз, сжигание полуккокса, турбулентное сгорание газообразных продуктов. Использование программного обеспечения PHOENICS позволяет тестировать разработанную модель.

**Abstract:** The paper contemplates to the development of a mathematical model for studying the spread of forest surface fires. The paper presents the results of calculations of fire breaks taking into account wind speed and moisture content of forest combustible materials. The model includes all the important physicochemical combustion processes: drying of combustible material, pyrolysis, burning of char, turbulent combustion of gaseous products. Using software PHOENICS allows you to test the developed model.

**Ключевые слова:** лесной пожар, математическая модель, многофазная среда, низовой пожар, скорость ветра, разрыв, влагосодержание.

**Keywords:** forest fire, mathematical model, multiphase environment, surface fire, wind speed, gap, moisture content.

Математическая модель ЧС – система уравнения и соотношений, отражающиеся в математической форме, способные воспроизводить или имитировать наиболее важные факторы и особенности реальных опасных явлений, чтобы анализировать их возникновение, развитие и последствия [1]. Вид и количество уравнений напрямую зависит от типа рассматриваемой ЧС. Так, например, модели пожаров основываются на ключевых законах аэродинамики и гидродинамики, определяющих параметры турбулентности, идущих химических процессов, переноса частиц, распространения границ. Разумеется, в рамках модели невозможно учесть все факторы, поэтому прибегают к упрощениям. Например, учитывают направление ветра только вдоль одной из координатных осей, пренебрегают жидкой фазой в воздухе, лес представляется недеформируемой продуваемой средой.

Для получения достоверных расчетов важно, чтобы полученные результаты распространения фронта горения при моделировании программы совпадали с экспериментальными результатами, представленные в работе [2] Модель была подтверждена с использованием экспериментальных данных по изучению распространения пожара в ложе иголок сосны. Прогнозируемая скорость распространения огня согласуется с экспериментальными значениями и получается при различных скоростях ветра от 1 до 3 м / с (см. рисунок 1).

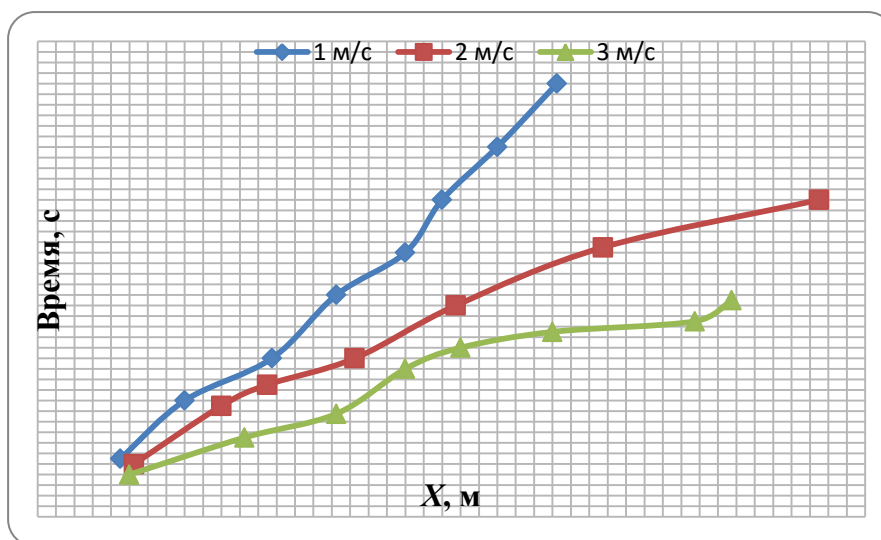


Рисунок 1 – График распространения пиролиза при моделировании для скоростей ветра 1 м/с, 2 м/с, 3 м/с

На рисунке 2 показаны распределения температуры твердой фазы ( $T_s$ ) и массовых долей кислорода ( $C_1$ ) и угарного газа ( $C_2$ ) при скорости ветра 1 м/с при  $t = 40$  с. Нагрев топливного слоя от распространяющегося пламени вызывает испарение воды, пиролиз и сжигание полукокса (при температуре около 700 К). Окись углерода, которая выделяется при пиролизе, участвует в газообразном сгорании, и его массовая доля приближается к нулю. Массовая доля кислорода в зоне пиролиза уменьшается из-за образования угарного газа в этой зоне, а затем она падает до нуля в зоне горения из-за потребления кислорода.

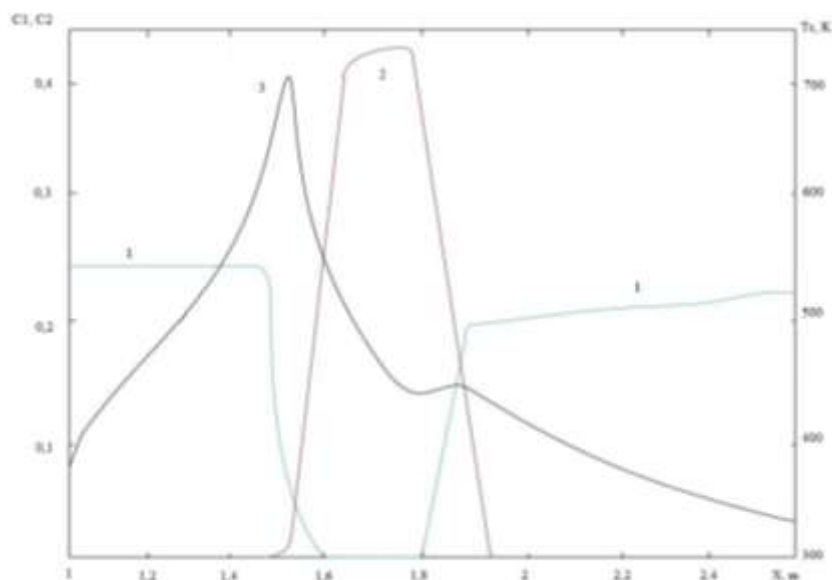


Рисунок 2 – Температура твердой фазы (3) и массовые доли кислорода (1) и оксида углерода (2) при скорости ветра 1 м/с  $t = 40$  с

Результаты показывают, что скорость распространения пожара резко возрастает со скоростью ветра. Скорость распространения уменьшается при содержании влаги в лесном массиве. Как видно из графика результаты с экспериментом близки, что свидетельствует о достоверности модели.

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

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

1. Ветер направлен вдоль оси X;
2. Лес представляет собой многофазную пространственно-неоднородную среду;
3. Предполагается, что лесной покров 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 разрыв и хвойный массив находятся рядом и имеют конечные размеры, но это не является обязательным. В процессе расчетов были рассмотрены различные случаи взаимного расположения или отсутствия одного из этих объектов.

Следуя подходу многофазного моделирования, лес рассматривается как химически активная многофазная среда, содержащая газовую фазу с объемной долей ( $\varphi_g$ ) и конденсированную фазу с объемной долей ( $\varphi_s$ ) [3].

Математическая задача сводится к системе уравнения (1):

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

Здесь  $t$  время;  $x_i$  – пространственная координата ( $i = 1, 2, 3$ );  $\rho$  – плотность газовой смеси;  $u_i$  – компонента скорости в направлении  $x_i$ ,  $\Gamma$  – коэффициент диффузионного обмена,  $S_{\Phi}$  – источниковый член,  $\Phi$  – объемная доля газовой фазы, принимается равной в уравнении (1) как  $\Phi = 1 - \varphi_c$ , где  $\varphi_c$  – объемная доля конденсированной фазы, значение которой очень мало ( $\varphi_c < 0,016$ ). 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;  $c_{\alpha}$  – является массовой доля  $\alpha$  - вид газовой смеси; индекс ( $\alpha = 1, 2, 3$ , где 1 соответствует кислороду, 2 – угарному газу, 3 – всем другим компонентам газовой смеси);  $M$  – молекулярным масса;  $\alpha$  – компонента газовой фазы.

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 с помощью метода контрольных объёмов [4].

В ходе исследования были определены размеры противопожарных разрывов с учетом скорости ветра и влагосодержания ЛГМ, полученные данные представлены в таблице 1.

Расчеты проводились со следующими параметрами: запас ЛГМ в хвойном массиве 11,75 кг/м<sup>3</sup>, значение влагосодержания ЛГМ изменялось в диапазоне от 0,5 до 1.

Видно, что зависимость размеров площади противопожарного заслона имеет вид убывающей функции (см. рисунок 3). С увеличением влагосодержания хвойного массива величина размера разрыва резко уменьшается и стремительно приближается к нулю. Из этого следует, 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 влагосодержания тоже способствует уменьшению глубины огня в лесные горючие материалы.

Таблица 1 – Результаты расчетов размера противопожарного разрыва в зависимости от влагосодержания лиственных пород 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

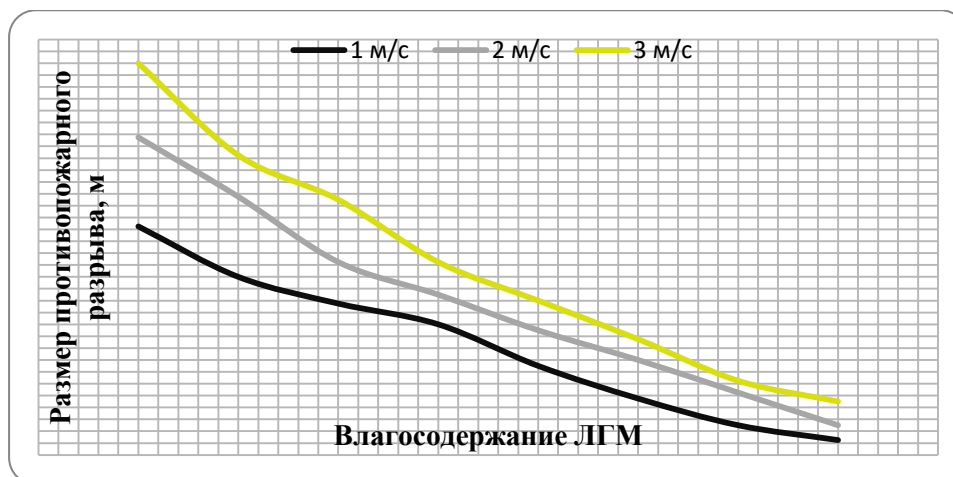


Рисунок 3 – Зависимость размеров противопожарного разрыва от влагосодержания ЛГМ

Благодаря программному обеспечению PHOENICS [5], разработана многофазная модель, инициирующая распространение лесного пожара и определяющая размеры противопожарного разрыва, а также учитывающая все важные физико-химические процессы: сушка, пиролиз, сжигание полукокса, турбулентное сгорание газообразных продуктов пиролиза, обмен массой, импульсом и энергией между газообразной и твердой фазой, а также турбулентный и конвективный поток газа.

#### 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. –166с.
2. Porterie В., Morvan D, Larini M, Loraud JC (2000) Firespread through fuel beds: modeling .of wind-aided fires and induced hydrodynamics. Physics of Fluids12, 1762-1782. (Дата обращения 12.02.2019).
3. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. -Н.: Наука, 1992. - 408 с.
4. Патанкар С.В. Численные методы динамики жидкости и теплообмена. - М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
5. Encyclopaedia Index CHAM [Электронный ресурс] // URL: [http://www.cham.co.uk/phoenics/d\\_polis/d\\_docs/tr001/tr001.htm](http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_docs/tr001/tr001.htm) (дата обращения 12.03.19)