

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТОРФЯНОГО ПОЖАРА В ПОЛУНАТУРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Грицков С.Н.

HEAT AND MASS TRANSFER SYSTEM ANALYSIS AND SIMULATION MODEL OF A PEAT FIRE IN SEMI-NATURAL EXPERIMENT

Grickov S.N.

Аннотация. В данной работе были получены три отдельные математические модели, описывающие процесс развития и распространения торфяного пожара, соответственно в зависимости от скорости ветра, влажности воздуха и его температуры, а так же принятые с учетом коэффициента подобия, что позволяет с некой вероятностью утверждать, что данные зависимости описывают рассматриваемый процесс в реальных условиях.

Abstract. In this paper were obtained in three separate mathematical models describing the development and dissemination of grassroots wildfire, respectively, depending on the wind speed, humidity and temperature, as well as adopted taking into account the factor of similarity, which allows us to state with a certain probability that the data depending describe the process in a real-world conditions.

Ключевые слова: системный анализ, имитационная модель, торфяные лесные пожары.

Key words: systems analysis, simulation model, peat forest.

Торф является ценнейшим природным сырьем, которое в настоящий период используется крайне не эффективно. Ежегодно горят торфяники, нанося существенный вред здоровью населения, уничтожая природу и животный мир.

Применяемые технологии для тушения торфяных пожаров, в настоящий период, не обеспечивают ожидаемую эффективность при тушении торфяных пожаров. Поэтому борьба с торфяными пожарами имеет чрезвычайно важное социальное, экологическое и экономическое значение.

Торф, сухая подстилка и входящий в неё полуразложившийся валеж способны загореться даже от искры. Для них характерен беспламенный тип горения, вот почему пожары могут возникать от молний, несмотря на то, что в это время идет дождь. Распространение же горения в слое торфа, возможно даже при довольно высокой его влажности, зачастую очаги горения сохраняются длительное время в скрытом состоянии в виде тления.

Бороться с торфяными пожарами невозможно без качественного прогноза пожарной опасности, динамики его развития и распространения. Для достоверности прогнозов динамики развития торфяных пожаров необходимы исходные данные для проведения расчетов. Кроме того очень важно правильно выбрать методы и системы прогнозирования.

Для построения прогностической модели торфяного пожара целесообразно выбрать оперативное моделирование - моделирование распространения и развития торфяных пожаров по неоднородной территории лесной площади.

Для качественного проведения полунатурного эксперимента необходимо проанализировать выбранный участок лесоторфяной местности, выделить основные составляющие величины, которые необходимо перенести на натуру с учетом их критерия подобия. Рассмотрим участок лесоторфяной местности площадью 60 x 40 м. На развитие торфяного пожара непосредственно влияет горючая нагрузка данного участка лесоторфяной местности. Горючая нагрузка лесоторфяной местности складывается из количества торфа и древесины на единицу площади данного участка.

Для проведения расчетов принимаем, что рассматриваемый участок (натура) покрыт равномерно торфом, причем его средняя глубина залежи (толщина пласта) составляет 2,5 м. [6], а его плотность 940 кг/м³ [7]. Таким образом, объем торфяной залежи на рассматриваемом участке лесоторфяной местности составит в среднем 6000 м³, а его масса 5640000 кг., т.е. горючая нагрузка торфа составит 2350 кг/м².

Место проведения эксперимента – полигон ФГКУ «1 Отряд ФПС МЧС России по ХМАО-Югре». Для создания макета участка лесного массива потребуется контейнер размерами 0,6 x 0,4 м., земля, торф, листва. Массу веществ, принимающих участие в процессе горения, принимаем в соответствии с их коэффициентом подобия k , который равен отношению геометрических параметров рассматриваемого участка к параметрам макета и определим на основании анализа размерностей и следствий из общей теории подобия.

Обозначим участок торфяного пожара переменной F , а его физическую модель переменной F' . На основании теоремы подобия, физическая модель F' получается из участка торфяного массива F путем преобразования с коэффициентом подобия k :

$$F = k \cdot F' \quad (3)$$

Отметим тот факт, что величины площадь и объем имеют коэффициенты подобия соответственно k^2 и k^3 :

$$S(F) = k^2 \cdot S(F') \quad (4)$$

$$V(F) = k^3 \cdot V(F') \quad (5)$$

Следовательно, основной величиной физической модели и природы будет являться такая размерность как длина, измеряемая в метрах, характеризуемая коэффициентом подобия k и определяемая отношением длин природы к длинам макета:

$$k = \frac{60}{0,6} = \frac{40}{0,4} = 10^2 \quad (6)$$

Для создания макета потребуется количество торфа массой m' . Для определения данной величины необходимо вычислить коэффициент подобия, с которым количество торфа массой m будет переходить в подобную ей величину физической модели m' .

Объем торфа определяется по формуле:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (7)$$

где V – объем торфа (м³);
 ρ – плотность торфа (кг/м³);
 m – масса торфа (кг).

На основании теории подобия, объем торфа можно выразить через объем соответствующего вещества макета с учетом коэффициента подобия:

$$V = k^3 \cdot V' \quad (8)$$

где V – объем торфа (м³);
 k^3 – коэффициент подобия;
 V' – объем торфа (м³).

В формуле (7) вместо объема торфа подставляем значение объема выраженного в формуле (8), и получаем:

$$k^3 \cdot V' = \frac{m}{\rho} \quad (9)$$

В результате математических преобразований получаем:

$$V' = \frac{m \cdot k^{-3}}{\rho} \quad (10)$$

Используя допущение, что плотность торфяной природы и плотность торфа, используемых в физической модели одинаковые, определим:

$$V' = \frac{m'}{\rho} \quad (11)$$

Таким образом, на основании выражения (10) и формулы (11) получаем равенство:

$$m' = m \cdot k^{-3} \quad (12)$$

где m' – масса торфа физической модели (кг);

k^{-3} – коэффициент подобия, для переноса массы торфяной природы на макет ($k=10^2$).

В результате анализа горючей нагрузки участка торфяного участка, проведенного в данной работе, масса пласта торфяной залежи составила 5640000 кг. Таким образом, масса количества торфа необходимого для создания физической модели будет определяться по формуле (12), и будет равняться:

$$m' = 5640000 \cdot 10^{-6} = 5,64 \text{ кг.}$$

Так как эксперимент по получению данных развития и распространения торфяного пожара проводится в естественных условиях, создание макета с использованием расчетной величины массы торфа участвующего в горении не рационально. Горючая нагрузка торфа является основной величиной характеризующей скорость развития и распространения торфяного пожара физической модели. При изменении количественной характеристики данного параметра следует уделить особое внимание критериям подобия, которые будут оказывать непосредственное влияние на выходящую величину имитационной модели в натуре.

Скорость развития и распространения торфяного пожара, как и любая другая скорость, характеризуется изменением, какого либо параметра в единицу времени, в нашем случае это (м/с). Т.к. время является величиной, которая имеет постоянное значение в обеих системах, то:

$$v' = \left[\frac{m \cdot k}{c} \right] = v \left[\frac{m}{c} \right] \rightarrow v' \cdot k = v \quad (13)$$

где v' – скорость распространения фронта пожара физической модели (м/с);

v – скорость распространения фронта пожара в реальных условиях (м/с);

k – коэффициент подобия ($k=10^2$).

Аналогичный анализ размерностей проведем и со значением горючей нагрузки древесины, которая измеряется в (кг/м²):

$$\Gamma' \left[\frac{\text{кг} \cdot k^3}{\text{м}^2 \cdot k^2} \right] = \Gamma \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \right] \rightarrow \Gamma' \cdot k = \Gamma \quad (14)$$

где Γ' – горючая нагрузка торфа физической модели (кг/м²);

Γ – горючая нагрузка торфа в реальных условиях (кг/м²);

k – коэффициент подобия ($k=10^2$).

В результате проведенного анализа размерностей скорости распространения фронта торфяного пожара и горючей нагрузки, соответственно природы и физической модели (13) и (14), получаем:

$$\frac{v}{v'} = \frac{\Gamma}{\Gamma'} = k \rightarrow v = v' \cdot \frac{\Gamma}{\Gamma'} \quad (15)$$

Для проведения эксперимента использование расчетного количества торфа вызывает неудобства, в связи с чем, для создания физической модели развития и распространения торфяного пожара, массу используемого торфа примем равную 2 кг. Таким образом горячая нагрузка торфа физической модели составит $8,3 \text{ кг/м}^2$, а коэффициент подобия для скорости развития и распространения торфяного пожара на основании формулы (15), составит:

$$k_v = \frac{\Gamma}{\Gamma'} = \frac{2350}{8,3} = 2,83 \cdot 10^2 \quad (16)$$

Для проведения эксперимента потребуется макет торфяного участка психрометр, термометр, компас и измерительные приборы для измерения расстояния, пройденного фронтом пламени (линейка, циркуль измеритель).

Берем количество торфа массой 2 кг. (масса торфа принятая для проведения эксперимента), добытого в реальных условиях и высушенного на открытом воздухе и укладываем его в контейнер поверх слоя грунта рис. 1.



Рис. 1. Слой торфа в макете натурального эксперимента

Далее покрываем слой торфа слоем листвы и перегноя, имитирующий слой лесной подстилки рис. 2.

На следующем этапе измеряем значения факторов входящих величин, скорость ветра принимаем исходя из метеопоказаний, температуру воздуха по термометру, а его влажность по психрометру и производим поджог в центре макета.



Рис. 2 Слой, имитирующий слой лесной подстилки

Далее следим за динамикой развития и распространения физической модели торфяного пожара рис. 3, а так же фиксируем результаты измерения пути пройденного фронтом пламени S за период времени t .

План проведения эксперимента

№ п/п	Действие	Оснастка и оборудование
1	Сбор информации о ландшафте и структуре леса	Фотоаппарат, дальномеры
2	Подготовка макета для проведения натурального эксперимента	Пластиковый контейнер, земля, листва, перегной, ветки деревьев, весы
3	Проведение эксперимента	Макет для проведения натурального эксперимента психрометр, термометр, компас.



Рис. 3 Динамика развития торфяного пожара

В ходе измерений результатов натурального эксперимента, проведенного в количестве тридцати опытов, была составлена таблица 1, в которой показана средняя скорость развития и распространения торфяного пожара в каждом из опытов и соответствующие ей погодные условия (скорость ветра, температура воздуха, влажность воздуха).

Таблица 1

Результаты эксперимента по развитию и распространению торфяного пожара

№ п/п	Дата и время проведения эксперимента	Условия эксперимента				Результаты	
		Скорость ветра V^B , м/с.	Влажность воздуха f , %.	Направление Ветра (метеорологическое)	Температура воздуха t , °С.	Путь пройденный огнем (мм) за время (ч) S/t	Средняя скорость развития фронта пламени V^n , мм/ч.
1	09:00 10.07.15	4	37	ЮВ	+27	110/3	36,6
2	14:00 10.07.15	4	35	Ю	+29	145/3	48,3
3	09:30 11.07.15	6	35	ЮЗ	+30	160/2	80
4	13:30 11.07.15	6	31	ЮЗ	+31	175/2	87,5
5	09:00 12.07.15	3	50	С	+25	65/3	21,6
6	14:30 12.07.15	3	39	СЗ	+27	110/3	36,6

Продолжение таблицы 1

7	09:30 13.07.15	3	48	CB	+27	85/3	28,3
8	15:00 13.07.15	2	37	B	+28	70/3	23,3
9	19:00 13.07.15	1	69	-	+22	48/3	16
10	09:30 14.07.15	3	48	B	+27	90/3	30
11	13:00 14.07.15	5	42	CB	+28	125/3	41,6
12	09:30 15.07.15	4	45	B	+27	115/3	38,3
13	14:00 15.07.15	5	35	B	+29	140/3	46,6
14	10:00 16.07.15	5	61	B	+25	125/3	41,6
15	15:00 16.07.15	6	48	ЮВ	+28	130/3	43,3
16	09:30 17.07.15	5	39	ЮВ	+27	125/3	41,6
17	13:30 17.07.15	6	27	ЮВ	+31	170/3	56,6
18	17:00 17.07.15	3	45	B	+27	100/3	33,3
19	09:00 18.07.15	4	24	ЮЗ	+32	120/3	40
20	14:00 18.07.15	4	27	Ю	+31	125/3	41,6
21	18:00 18.07.15	4	41	ЮВ	+25	115/3	38,3
22	09:00 19.07.15	2	26	-	+32	80/3	26,6
23	14:30 19.07.15	1	26	-	+33	85/3	28,3
24	10:00 20.07.15	4	29	CB	+32	135/3	45
25	16:00 20.07.15	8	42	ЮЗ	+27	180/1,5	120
26	09:30 21.07.15	4	51	СЗ	+27	105/3	35
27	14:30 21.07.15	4	58	З	+26	95/3	31,6
28	18:00 22.07.15	3	61	З	+23	85/3	28,3
29	09:00 22.07.15	5	42	СЗ	+27	120/3	40
30	13:30 22.07.15	6	40	З	+28	120/3	40

Метод наименьших квадратов обычно упоминается в двух контекстах. Во-первых, широко известно его применение в регрессионном анализе, как метода построения моделей на основе экспериментальных данных. При этом помимо собственно построения модели обычно осуществляется оценка погрешности, с которой были вычислены её параметры, иногда решаются и некоторые другие задачи. Во-вторых, Метод наименьших квадратов часто применяется просто как метод аппроксимации, без какой-либо привязки к статистике. В Excel он реализуется при помощи диаграммы и линии тренда.

Т.о. на основании результатов экспериментов, представленных в таблице 1, с помощью программы Microsoft Excel построим графики зависимостей величины скорости развития и распространения торфяного пожара от величин, характеризующих условиями эксперимента, и определим функции, приближенно описывающие рассматриваемый процесс с наиболее высоким из возможных коэффициентов достоверности аппроксимации.

На рис. 5 представлен график скорости движения фронта пламени торфяного пожара в зависимости от скорости ветра (жирная линия). Данный график с высоким коэффициентом достоверности аппроксимации $R^2=0,9968$ приближен к линии тренда (тонкая линия), которая определена полиномом 4-го порядка, а именно функцией:

$$y = 0,0471x^4 - 0,4387x^3 + 2,104x^2 - 0,4461x + 20,675 \quad (17)$$

Т.о., на основании коэффициента достоверности аппроксимации и шкалы Чеддока [3], можно утверждать, что функция линии тренда подобрана с *весьма высокой* точностью относительно исходных данных, в которой значением функции является значение

скорости развития и распространения торфяного пожара (мм/ч), а аргументом величина скорости ветра (м/с).

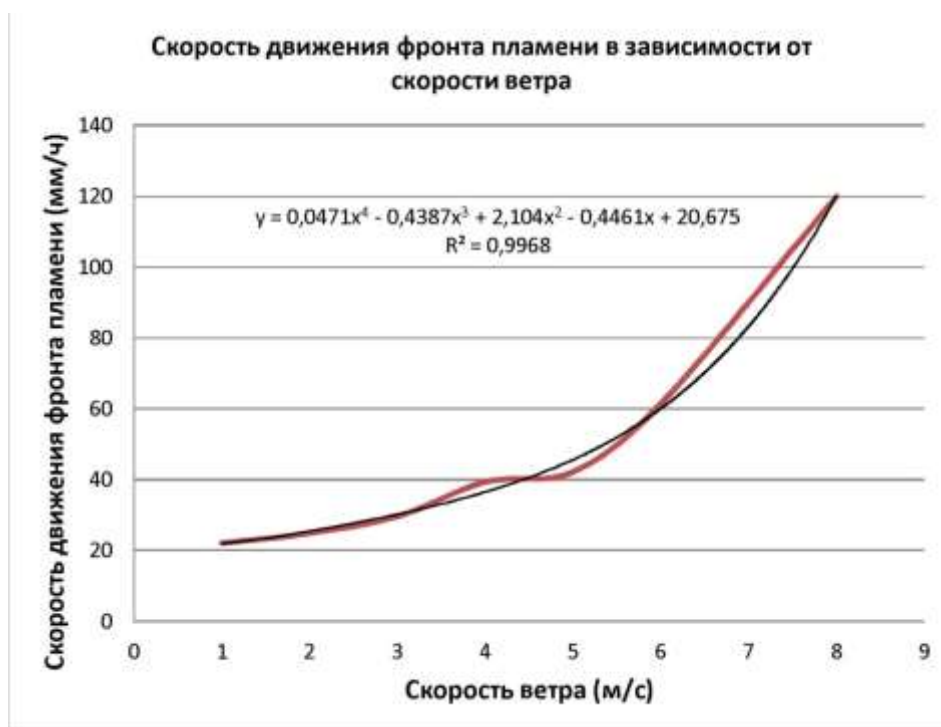


Рис. 4 График скорости движения фронта пламени в зависимости от скорости ветра

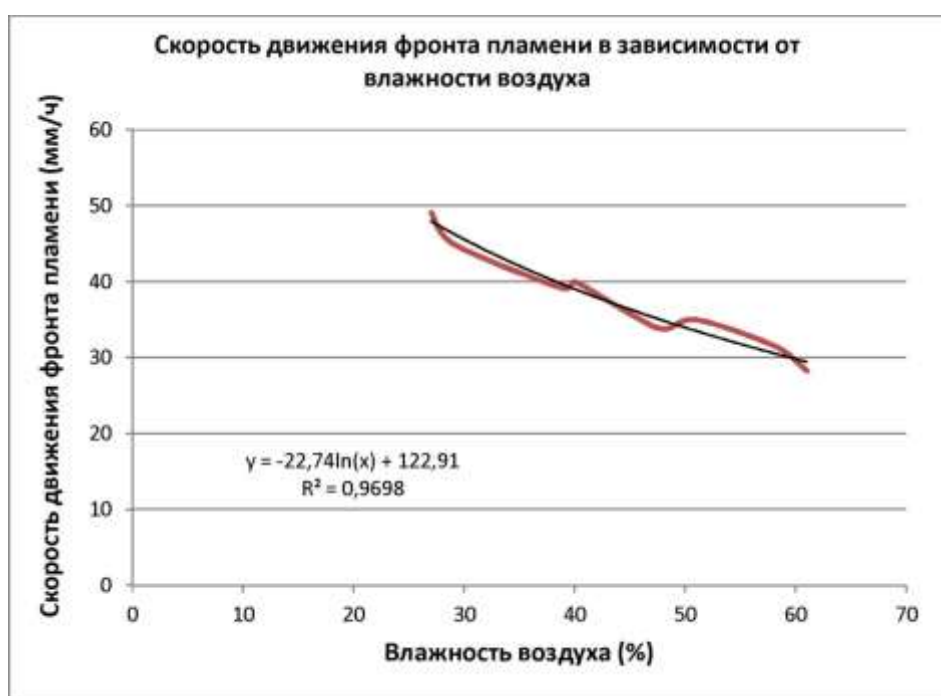


Рис. 5 График скорости движения фронта пламени в зависимости от влажности воздуха

На рис. 5 построен график скорости движения фронта пламени в зависимости от влажности воздуха (жирная линия). Предварительно проведенный анализ статистических данных развития и распространения торфяного пожара показал значительный разброс значений данной величины. Очевидно, что это является следствием того, что

преимущественное влияние на данный процесс оказывает скорость ветра, что так же следует из таблицы 6, в которой видно, что значениям влажности воздуха, в которых наблюдается всплеск значений скорости развития и распространения торфяного пожара соответствует высокая скорость ветра или ее отсутствие, кроме этого данное явление может происходить по ряду других причин не учтенных в эксперименте и требующих дополнительных исследований. В результате чего, значения не поддающиеся логическому смыслу были исключены, как ошибки эксперимента. К данному графику была проведена линия тренда (тонкая линия) с *весьма высокой точностью* [3] и коэффициентом достоверности аппроксимации $R^2=0,9698$, которую описывает логарифмическая функция вида:

$$y = -22 \ln n(x) + 122,91 \quad (18)$$

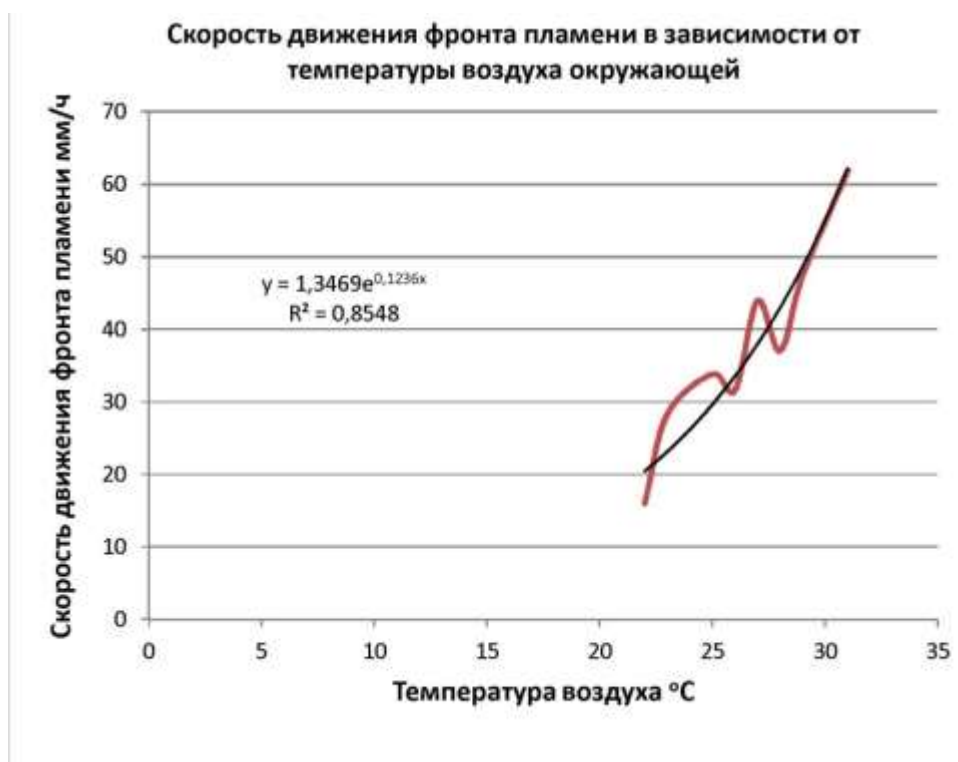


Рис. 6 График скорости движения фронта пламени в зависимости от температуры окружающего воздуха

График скорости движения фронта пламени в зависимости от температуры воздуха (жирная линия), представленный на рис. 6, приближен к линии тренда (тонкая линия) с *высокой точностью* [3], о чем свидетельствует коэффициент достоверности аппроксимации $R^2 = 0,8548$, и определена данная линия тренда экспоненциальной функцией вида:

$$y = 1,3469 \cdot e^{0,1236x} \quad (19)$$

Т.о. на основании экспериментальных данных, полученных в результате натурного эксперимента и метода наименьшего квадрата, реализованного с помощью программы Microsoft Excel, были выведены математические зависимости (20), (21) и (22), описывающие скорость развития и распространения торфяного пожара физической модели, соответственно, в зависимости от скорости ветра, влажности воздуха и его температуры. Во всех трех моделях выходящая величина функции, а именно скорость развития и распространения торфяного пожара измеряется в мм/ч.

Ранее, в данной работе был определен коэффициент подобия $k_v = 2.83 \cdot 10^2$, для перехода от скорости развития и распространения торфяного пожара физической модели к скорости торфяного пожара в реальных условиях. Следовательно, с учетом данного коэффициента, функции, описывающие рассматриваемый процесс, примут следующий вид:

$$V_{\Pi} = 0,0133293(v_{\text{в}})^4 - 0,1241521(v_{\text{в}})^3 + 0,595432(v_{\text{в}})^2 - 0,1262463(v_{\text{в}}) + 5,851025 \quad (20)$$

где V_{Π} - скорость развития и распространения торфяного пожара (м/ч);
 $v_{\text{в}}$ - скорость ветра (м/с).

$$V_{\Pi} = -6,43542 \ln(f) + 34,7835 \quad (21)$$

где f - влажность воздуха (%).

$$V_{\Pi} = 1,3469e^{0,1236t} \quad (22)$$

где t - температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$).

На основании результатов эксперимента были построены графики скорости развития и распространения торфяного пожара и на основании метода наименьших квадратов, реализованного с помощью Microsoft Excel, были определены функции наиболее точно из возможных описывающие данные процессы.

В результате в данной работе были получены три отдельные математические модели (20), (21) и (22), описывающие процесс развития и распространения торфяного пожара, соответственно в зависимости от скорости ветра, влажности воздуха и его температуры, а так же принятые с учетом коэффициента подобия, что позволяет с некой вероятностью утверждать, что данные зависимости описывают рассматриваемый процесс в реальных условиях.

Литература.

1. Грицков С.Н., Исаков Г.Н. «Влияние торфяных пожаров на экологическую обстановку в Уральском федеральном округе»// Научный симпозиум «Биотические компоненты экосистем» Пятого международного экологического конгресса «Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ELPIT 2015» Том 2, С. 2015;
2. Гришин А.М. «О математическом моделировании природных пожаров и катастроф» //Вестник Томского Государственного университета № 2(3), 2008 Математика и механика;
3. Ефименко В.М. Лесная таксация. Практическое пособие по выполнению лабораторных работ для студентов специальности 1-75.01.01 «Лесное хозяйство», М.: 2013;
4. Курбатский Н.П. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов //Вопросы лесной пирологии. Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1970. С. 3 – 5;
5. <http://www.kommersant.ru/doc/1652518>
6. <http://www.mining-enc.ru/t/torf>