

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ НИЗОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА В ПОЛУНАТУРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Антонов С.Ю.

SYSTEM ANALYSIS OF HEAT AND MASS TRANSFER AND THE SIMULATION MODEL OF GRASSROOTS FOREST FIRE IN SEMI-NATURAL EXPERIMENT

Antonov S.U.

Аннотация. В результате проведенного эксперимента были получены три отдельные математические модели, описывающие процесс развития и распространения низового лесного пожара, соответственно в зависимости от скорости ветра, влажности воздуха и его температуры.

Abstract. As a result of the experiment three separate mathematical models describing the development and dissemination of grassroots wildfire, respectively, depending on the wind speed were obtained, humidity and temperature.

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

Key words: systems analysis, simulation model, grassroots forest fires.

Трудно найти человека, который не любил бы в жаркий летний день провести свободное время в лесу. В любое время года прекрасен он. Сколько хороших слов сказано о русском лесу нашими писателями и поэтами! Посмотрите куда стремятся люди на выходной – в лес. Но не все бережно относятся к нему. Как правило виновниками лесных пожаров является человек, его небрежность в обращении с огнем, незнание элементарных противопожарных правил, неумение пользоваться огнем в лесу.

Лесной пожар редко бывает повальным, когда огнем объаты стволы и кроны деревьев и пламя бушует, выбрасывая многометровые языки. Чаще всего случаются «низовые» пожары, при которых горит валежник, сухая трава и т.п. Высота пламени редко бывает более 0,5 м., а скорость продвижения кромки огня 1-2 м. в минуту. Но сколько вреда приносит такой пожар. Уничтожается вся лесная молодежь, сгорают хвойный подрост и молодняки. Огонь повреждает поверхностно расположенные корни деревьев и кустарника, и спустя некоторое время начинается отмирание части деревьев. В древостоях, ослабленных пожаром, создаются благоприятные условия для массового размножения вредных лесных насекомых, которые в последствии нападают и на соседние не поврежденные огнем участки леса. Много еще можно сказать о вреде, приносимом лесными пожарами народному хозяйству.

Для эффективной борьбы с низовыми лесными пожарами необходим прогноз пожарной опасности. Для прогнозирования любого явления, состояния, процесса (в том числе динамики низового лесного пожара) необходимо выполнение следующих условий: наличие понятийного аппарата и наличие методов, способов и систем прогнозирования. Важно четко выделить объект прогнозирования и построить максимально адекватную прогностическую модель (совокупности прогнозных моделей), имеющую прикладное значение.

Для разработки достоверных прогнозов динамики развития и распространения низового лесного пожара, верификации моделей необходима система мониторинга, поставляющая исходные данные для проведения необходимых расчетов и позволяющая верифицировать методы, модели и методики прогнозирования. Рассматривая методические основы прогнозирования целесообразно выделить

следующие их составляющие: методы прогнозирования; систему прогнозирования. Целью анализа объекта прогнозирования является разработка прогностической модели объекта. Для этого необходимо иметь метод или совокупность методов прогнозирования. Из всех существующих направлений моделирования или моделей более рациональным будет использование оперативного моделирования - моделирование распространения и развития низовых лесных пожаров по неоднородной территории лесной площади.

Рассмотрим участок лесного массива площадью 2400 м². Для того что бы построить физическую модель развития и распространения низового лесного пожара, необходимо проанализировать структуру данного участка леса и выделить основные составляющие величины, которые необходимо перенести на натуру с учетом их критерия подобия.

Основная величина, которая непосредственно влияет на развитие и распространения низового лесного пожара, это горючая нагрузка данного участка леса. Горючая нагрузка лесного массива складывается из количества древесины на единицу площади данного участка.

При расчётах будем использовать утверждение, что рассматриваемый участок (натура) покрыт равномерно насаждениями. Растительность лесного массива представляет собой смешанную породу деревьев с преобладанием хвойных пород плотностью размещения 2,5 шт./ар. [5], что составляет 0,025 шт./м². Т.о. количество стволов деревьев на рассматриваемом участке составит 60 шт. Для того что бы определить горючую нагрузку древесины на единицу площади рассматриваемого участка, необходимо определить средний объем растущего дерева, который будет зависеть от среднестатистических геометрических параметров ствола дерева. Исходя из данных, полученных в результате наблюдений и измерений параметров стволов деревьев, можно сказать, что среднестатистический диаметр ствола дерева на высоте 1,3 м. (уровень груди) составляет 25 см. рис. 1.



Рис. 1 Среднестатистический диаметр дерева

На основании этого, согласно способу Н. Денцина, определяем средний объем растущего дерева [2]:

$$V = 0,001 \cdot D_{1,3}^2 \quad (1)$$

где V – объем растущего дерева (м³);

$D_{1,3}$ – диаметр ствола дерева на высоте 1,3 м. (уровень груди) (см.). Среднестатистический объем ствола растущего дерева участка лесного массива равен:

$$V = 0,001 \cdot D_{1,3}^2 = 0,001 \cdot 25^2 = 0,625 \text{ (м}^3\text{)} \quad (2)$$

Для определения массы дерева необходимо знать плотность соответствующего вида древесины. Исходя из условия, что в районах Западной Сибири нашей страны самыми распространенными видами насаждений являются хвойные породы деревьев, для расчета массы дерева примем плотность сосны, равную 650 кг/м^3 при влажности 50%. Т.о. среднестатистическая масса одного растущего дерева составит $406,25 \text{ кг.}$, масса древесины на рассматриваемом участке 24375 кг. (60 деревьев), а горячая нагрузка древесины $10,15625 \text{ кг/м}^2$.

Для создания макета участка лесного массива потребуется контейнер размерами $0,6 \times 0,4 \text{ м.}$, земля, листва, ветки деревьев. Массу веществ, принимающих участие в процессе горения, следует принимать в соответствии с их коэффициентом подобия k , который равен отношению геометрических параметров рассматриваемого участка к параметрам макета и определяется на основании анализа размерностей и следствий из общей теории подобия.

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

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

Важным моментом является тот факт, что такие величины как площадь и объем имеют коэффициенты подобия соответственно k^2 и k^3 :

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

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

Таким образом, 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 древесины массой m' . Для определения данной величины необходимо вычислить коэффициент подобия, с которым количество древесины массой m будет переходить в подобную ей величину физической модели m' .

Объем вещества определяется по формуле:

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

где V – объем древесины (м^3);
 ρ – плотность древесины (кг/м^3);
 m – масса древесины (кг).

Как уже ранее говорилось, на основании теории подобия, объем древесины можно выразить через объем соответствующего вещества макета с учетом коэффициента подобия:

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

где V – объем древесины (м^3);
 k^3 – коэффициент подобия;

V' – объем древесины (m^3).

В формуле (7) вместо объема древесины 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 древесной природы и плотность древесины, 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 древесины физической модели (кг);

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

В результате анализа горючей нагрузки участка лесного массива, проведенного в данной работе, масса древесины составила 24375 кг. Таким образом, масса количества древесины необходимого для создания физической модели будет определяться по формуле (12), и будет равняться:

$$m' = 24375 \cdot 10^{-6} = 0,024 \text{ кг.} \quad (12)$$

В рамках исследований, проводимых в данной работе, создание макета с использованием расчетных величин связано с неким числом трудностей. Эксперимент по получению статистических данных развития и распространения низового лесного пожара проводится в естественных условиях, что требует от макета мобильности и удобства в его использовании. В связи с чем, применение расчетных величин масс веществ, участвующих в процессе горения не рационально.

Основной величиной характеризующей скорость развития и распространения низового лесного пожара физической модели, является горючая нагрузка древостоя и подстила, следовательно, при изменении количественной характеристики данного параметра следует уделить особое внимание критериям подобия, которые будут оказывать непосредственное влияние на выходящую величину имитационной модели в натуре.

В то время как горючая нагрузка лесного подстила будет оказывать влияние на скоростные характеристики низового лесного пожара, горючая нагрузка древесины будет задавать структуру распространения пожара. Таким образом, на распространение лесного пожара будет в большей степени оказывать влияние структура размещения моделей деревьев, которая будет задавать направления развития низового лесного пожара, нежели масса древесины. На основании этого, в данном эксперименте позволим себе сделать допущение относительно количественной характеристики горючей нагрузки древесины модели по отношению к натуре и применить для создания макета около 0,5 кг. древесины.

Скорость развития и распространения низового лесного 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 древесины физической модели (кг/м²);
 Γ – горючая нагрузка древесины в реальных условиях (кг/м²);
 k – коэффициент подобия ($k=10^2$).

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

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

Использование расчетного количества древесины для создания макета вызывает неудобства для проведения эксперимента, в связи с чем, для создания физической модели развития и распространения низового лесного пожара, массу используемой древесины примем равную 2 кг. Таким образом горючая нагрузка древесины физической модели составит 8,3 кг/м², а коэффициент подобия для скорости развития и распространения низового лесного пожара на основании формулы (15), составит:

$$k_v = \frac{\Gamma}{\Gamma'} = \frac{10,15625}{8,3} = 1,23 \quad (16)$$

Место проведения эксперимента – полигон ФГКУ «1 Отряд ФПС МЧС России по ХМАО-Югре». Для проведения эксперимента потребуется макет участка лесного массива психрометр, термометр, компас и измерительные приборы для измерения расстояния, пройденного фронтом пламени (линейка, циркуль измеритель).

Устанавливаем контейнер так, что бы его стороны были направлены в направления сторон света, соответственно север, юг, запад и восток и укладываем в него землю в таком количестве, что бы хватило места для количества торфа принимаемого в эксперименте рис. 2.



Рис. 2 Слой почвы, имитирующий слой грунта природы

Далее покрываем слой почвы слоем листвы и перегноя, имитирующий слой лесной подстилки и вставляем макеты деревьев (древесные палочки), измеряем значения факторов входящих величин, скорость ветра принимаем исходя из метеопказаний, температуру воздуха по термометру, а его влажность по психрометру и производим поджог в центре макета.



Рис. 3 Слой, имитирующий слой лесной подстилки

Далее производим контроль за динамикой развития и распространения физической модели низового лесного пожара рис. 4, а так же фиксируем результаты измерения пути пройденного фронтом пламени S за период времени t .

План проведения эксперимента

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



Рис. 4 Динамика развития низового лесного пожара

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

Таблица 1

Результаты эксперимента по развитию и распространению низового лесного пожара

	Дата и время проведения эксперимента	Условия эксперимента				Результаты
		Скорость ветра V^B , м/с.	Влажность воздуха f , %.	Направление Ветра (метеорологическое)	Температура воздуха t , °С.	
1	09:00 10.07.15	4	37	ЮВ	+27	0,010
2	14:00 10.07.15	4	35	Ю	+29	0,013
3	09:30 11.07.15	6	35	ЮЗ	+30	0,022
4	13:30 11.07.15	6	31	ЮЗ	+31	0,025
5	09:00 12.07.15	3	50	С	+25	0,006
6	14:30 12.07.15	3	39	СЗ	+27	0,010
7	09:30 13.07.15	3	48	СВ	+27	0,007
8	15:00 13.07.15	2	37	В	+28	0,006
9	19:00 13.07.15	1	69	-	+22	0,004
10	09:30 14.07.15	3	48	В	+27	0,008
11	13:00 14.07.15	5	42	СВ	+28	0,011
12	09:30 15.07.15	4	45	В	+27	0,010
13	14:00 15.07.15	5	35	В	+29	0,012
14	10:00 16.07.15	5	61	В	+25	0,011
15	15:00 16.07.15	6	48	ЮВ	+28	0,012
16	09:30 17.07.15	5	39	ЮВ	+27	0,011
17	13:30 17.07.15	6	27	ЮВ	+31	0,015
18	17:00 17.07.15	3	45	В	+27	0,009
19	09:00 18.07.15	4	24	ЮЗ	+32	0,011
20	14:00 18.07.15	4	27	Ю	+31	0,011
21	18:00 18.07.15	4	41	ЮВ	+25	0,010
22	09:00 19.07.15	2	26	-	+32	0,007
23	14:30 19.07.15	1	26	-	+33	0,007
24	10:00 20.07.15	4	29	СВ	+32	0,012
25	16:00 20.07.15	8	42	ЮЗ	+27	0,033
26	09:30 21.07.15	4	51	СЗ	+27	0,009
27	14:30 21.07.15	4	58	З	+26	0,008
28	18:00 22.07.15	3	61	З	+23	0,007
29	09:00 22.07.15	5	42	СЗ	+27	0,011
30	13:30 22.07.15	6	40	З	+28	0,011

Согласно результатам экспериментов, представленных в таблице 1, с помощью программы Microsoft Excel построим графики зависимостей величины скорости развития

и распространения низового лесного пожара от величин, характеризующих условиями эксперимента

На рис. 5 представлен график скорости движения фронта пламени низового лесного пожара.

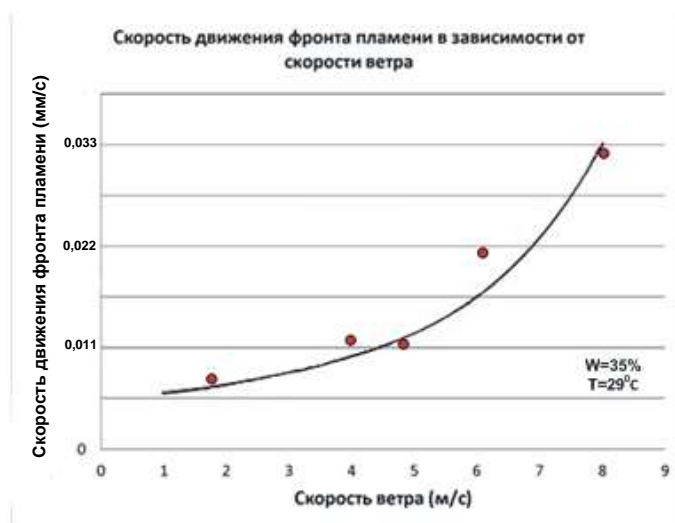


Рис. 5 График скорости движения фронта пламени в зависимости от скорости ветра

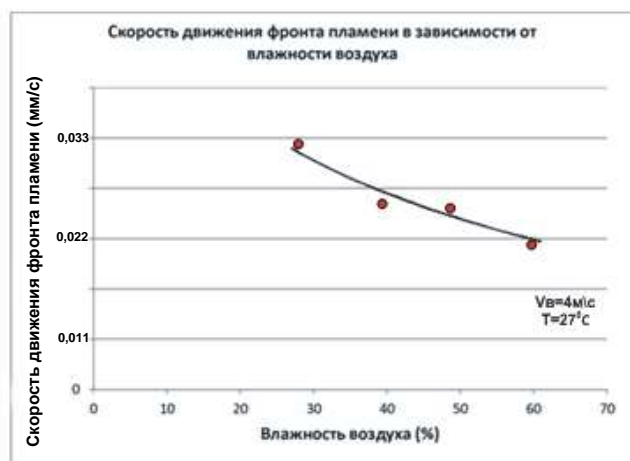


Рис. 6 График скорости движения фронта пламени в зависимости от влажности воздуха

На рис. 6 построен график скорости движения фронта пламени в зависимости от влажности воздуха. К данному графику была проведена линия тренда (тонкая линия) с точностью [6] и коэффициентом достоверности аппроксимации $R^2=0,9698$.

График скорости движения фронта пламени в зависимости от температуры воздуха, представленный на рис. 7, приближен к линии тренда (тонкая линия) с точностью [6], о чем свидетельствует коэффициент достоверности аппроксимации $R^2 = 0,8548$.

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 (17), (18) и (19), описывающие скорость развития и распространения низового лесного 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 низового лесного пожара измеряется в мм/ч.

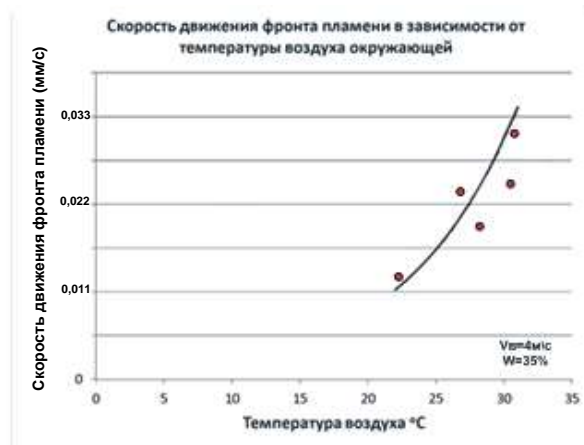


Рис. 7 График скорости движения фронта пламени в зависимости от температуры окружающего воздуха

Ранее, в данной работе был определен коэффициент подобия $k_v = 1,23$, для перехода от скорости развития и распространения низового лесного пожара физической модели к скорости низового лесного пожара в реальных условиях. Следовательно, с учетом данного коэффициента, функции, описывающие рассматриваемый процесс, примут следующий вид:

$$V_{\Pi} = 0,0133293(v_{в})^4 - 0,1241521(v_{в})^3 + 0,595432(v_{в})^2 - 0,1262463(v_{в}) + 5,851025 \quad (17)$$

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

$$V_{\Pi} = -6,43542 \ln(f) + 34,78352 \quad (18)$$

где f - влажность воздуха (%).

$$V_{\Pi} = 1,3469e^{0,1236t} \quad (19)$$

где t - температура воздуха (°C).

На основании результатов эксперимента были построены графики скорости развития и распространения низового лесного 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 (17), (18) и (19), описывающие процесс развития и распространения низового лесного 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. Антонов С.Ю., Исаков Г.Н. «Динамика лесных пожаров и их экологических последствий на территории ХМАО-Югры»// 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. Подрезов Ю.В. Анализ современных методов прогнозирования чрезвычайных ситуации//Материалы международного симпозиума «Человек и катастрофы: проблемы обучения новым технологиям и подготовки населения и специалистов к действиям в чрезвычайных ситуациях». - М: ВНИИ ГОЧС, 1999;
6. <http://www.rae.ru/monographs/54-2226>
7. <http://helpstat.ru/2012/01/analiticheskoe-vyravnivanie-sebestoimosti-zernovykh-kultur/>

