

УДК 614.841

Параметры возмущений атмосферы при крупных лесных пожарах

И.Р. Хасанов

ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 14390 Балашиха

irhas@rambler.ru

Проведен анализ крупных лесных пожаров, рассмотрены особенности их развития и воздействия на окружающую среду. Приведены теплофизические характеристики и оценки мощностей тепловыделения крупных лесных пожаров. Рассмотрено влияние лесных пожаров на загрязнение атмосферы продуктами горения. Даны оценки качественного и количественного состава продуктов горения для различных типов лесных пожаров. Рассмотрены задачи исследования в области оценки влияния лесных и торфяных пожаров на окружающую среду.

Ключевые слова: лесные (торфяные) пожары, продукты горения, загрязнение атмосферы, параметры лесных пожаров.

Введение

Ежегодно в Российской Федерации стране регистрируется от 15 до 30 тысяч пожаров, охватывающих площадь от нескольких сотен до несколько миллионов гектаров [1]. Размеры наносимого ими ущерба, тенденция роста, периодичность вызываемых крупными пожарами (2-3 раза в

десятилетие) экстремальных ситуаций позволяют рассматривать природные пожары, как чрезвычайные ситуации.

Крупные лесные пожары вносят значительные возмущения в аэродинамику и состояние окружающей среды. Такие пожары сопровождаются развитием мощной конвективной колонки и распространением в атмосфере, как газообразных продуктов, так и различных аэрозольных примесей. Образующиеся обширные зоны задымления и загазованности оказывают вред здоровью людей и окружающей среде. Загрязнение атмосферы большим количеством продуктов горения при крупных пожарах может приводить к значительным экологическим и климатическим последствиям [2].

В условиях засушливой погоды развитие массовых очагов лесных пожаров приводит к чрезвычайным ситуациям со значительными материальными убытками. Характерным примером возникновения чрезвычайной ситуации при лесных пожарах является развитие пожаров в сентябре-октябре 1976 г. в Хабаровском крае. К 16 октября в крае бушевало 97 лесных пожаров на площади 28,4 тыс. га. Сгорело полностью или пострадало от пожаров 30 населенных пунктов. [3].

Стихийный лесной пожар, возникший в результате сильной засухи в 1967 г. в США, имел площадь $2 \cdot 10^8 \text{ м}^2$ и высокую скорость распространения [4]. При сильном ветре (около 20 м/с) за 9 часов огонь прошел узким

фронтом 14,5 км, уничтожив 200 км² леса. Скорость распространения изменялась на разных участках от 1,8 до 2,2 м/с. Глубина фронта составляла 15-80 м. Наблюдалась мощная конвективная колонка продуктов горения, высота которой достигла 10 км.

В августе-сентябре 1972 г. в европейской части России возникло более 700 крупных лесных и торфяных пожаров, на территории 7 областей с суммарной площадью 550 тыс. га [2]. Средняя высота подъема дыма при лесных пожарах 1972 г. составляла 2-3 км, а иногда достигала и 5 км. Шлейф дымового облака шириной 150-400 км протянулся на 560 км. Плотность дыма была такова, что с высоты 500 м не всегда была видна поверхность Земли [5].

Летом 2010 г. из-за аномальной жары и отсутствия осадков в европейской части Российской Федерации возникла сложная пожарная обстановка. К началу августа 2010 г. общее количество пожаров, произошедших на территории России, превысило 25 тысяч. Общая площадь, пройденная пожарами, составила более 860 тыс. га. Метеорологическая обстановка летом 2010 г. во многом была сложнее, чем в 1972 г.

Основные характеристики лесных и торфяных пожаров

В зависимости от сгорающих материалов различают три основных вида лесных пожаров: низовые, верховые и почвенные (торфяные, подземные) [6].

На долю низовых пожаров приходится в среднем 97–98% общего числа

лесных пожаров и 87–90% пройденной огнем лесной площади. Верховые составляют 1,5–2,0% общего числа лесных пожаров и 10–12% лесной площади, пройденной пожарами. Почвенные (подземные) пожары возникают обычно после длительной засухи. В России на их долю приходится около 1,7–2% общего числа возгораний и около 0,3% площади, уничтоженной огнем.

Верховые пожары сопровождаются выделением большого количества теплоты. С одного погонного метра кромки пожара выделяется более 220 кВт тепловой энергии. Нагретый воздух и продукты горения вызывают восходящие потоки и образование так называемой конвективной колонки диаметром в несколько сотен метров. Поступательное движение колонки совпадает с направлением продвижения фронта пожара. Пламя в середине колонки может подниматься на высоту до 120 м [7].

Более общая классификация типов пожара рассмотрена в [9], в которой выделены конфлаграционные, массовые, огнештормовые и огненновихревые пожары.

Конфлаграционные пожары характеризуются наличием распространяющегося фронта горения. Основным механизмом их продвижения является турбулентный тепломассообмен фронта с горючим материалом за счет вынужденной конвекции в поле ветра.

Массовый пожар объединяет множество одновременно горящих взаимодействующих друг с другом очагов. На площади пожара горит весь

доступный горению материал. Скорости распространения такого пожара, как правило, невелики.

Огненный шторм - более опасный вид массового пожара. Возникает при больших загрузках площади горючим материалом (обычно в городских условиях). Характеризуется мощной конвективной колонкой и ураганными (20-40 м/с) горизонтальными скоростями подсасываемого в очаг воздуха. Реализуется при малых скоростях ветра и благоприятных для развития огненного шторма атмосферных условиях - отсутствие мощных слоев инверсии, слабо неустойчивая стратификация атмосферы.

Вихревой огненный шторм (пожарный вихрь) – наиболее разрушительный тип массовых возгораний. Связан с возникновением мощного вращательного (около вертикальной оси конвективной колонки) движения продуктов. Обладает наибольшей скоростью энерговыделения, чрезвычайно сильными локальными скоростями перемещения газа в очаге, большой высотой факела пламени, мощной конвективной колонкой.

Массовые пожары в целом занимают лишь несколько процентов от общего числа стихийных возгораний, но приносят наибольший материальный ущерб. В нашей стране массовые лесные пожары составляют 1-2%, но на их долю приходится до 70% уничтоженной огнем площади и до 90% ущерба [3].

Огненновихревой тип пожара в стихийных условиях возникает сравнительно редко (несколько процентов от общего числа массовых пожаров, но разрушающий эффект от них, как показали пожары 2010 года в России, колоссален.

К основным параметрам, характеризующим горение при лесном пожаре, относятся: горючая нагрузка (масса горючих материалов на единицу площади ($\text{кг}/\text{м}^2$) или объема ($\text{кг}/\text{м}^3$); скорость выгорания нагрузки ($\text{кг}/\text{м}^2/\text{с}$); линейная скорость распространения фронта горения ($\text{м}/\text{с}$); температура пламени (пожара); интенсивность падающего теплового потока ($\text{Вт}/\text{м}^2$); скорость восходящих потоков в конвективной колонки ($\text{м}/\text{с}$); состав и концентрация продуктов горения.

Среднее количество горючих материалов в малопродуктивных лесах - $1 \text{ кг}/\text{м}^3$, в наиболее продуктивных лесах - $25-30 \text{ кг}/\text{м}^3$. Примерно 15-20% этого материала приходится на легко воспламеняемую, полностью сгорающую часть - мох, опад, подстилка. В сосняках запасы хвой составляют $0,6 \text{ кг}/\text{м}^3$, в кедровых лесах - опад $0,2-1,1 \text{ кг}/\text{м}^3$, в лиственных - $0,3 \text{ кг}/\text{м}^3$. Средняя величина сгораемой нагрузки в лесах при крупных лесных пожарах - $5-10 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Средняя температура горения лесных горючих материалов $500-900^\circ\text{C}$. Температура горения (тления) торфа - 500°C (при влажности 10-30 %) и 300°C (при влажности 65%).

Высота факела пламени определяется видом и интенсивностью пожара, скоростью ветра, шириной кромки и имеет следующие средние значения: для низового пожара - 0,05-3 м; для верховых пожаров - 3-15 м (над уровнем древостоя). Глубина прогорания торфа зависит от мощности слоя торфа, его влажности и может составлять - 0,25-3 м.

С точки зрения прогнозирования развития пожаров, а также способов борьбы и ресурсов пожаротушения, важное значение имеет классификация пожаров по степени их выживаемости. Способность пожара к самоподдерживающемуся режиму существования и развития зависит от нескольких факторов: от плотности нагрузки ($\text{кг}/\text{м}^2$), ее пространственной структуры и типа горючих материалов; от предшествующей возгоранию погоды и текущих метеоусловий; от топографических особенностей местности.

Статистический анализ данных по стихийным лесным пожарам показал [9], что вероятность существования того или иного типа пожара соответствует следующим данным: самогасящийся - 0,38; нераспространяющийся - 0,2; способный к саморазвитию (активный) - 0,34; критический - 0,08. Под критическим типом подразумевается массовый пожар с неконтролируемым характером развития, практически не поддающийся активным способам борьбы с ним.

Теплофизические параметры лесных и торфяных пожаров

Крупные лесные пожары являются мощным фактором тепловых возмущений в атмосфере [10]. Энерговыведение такого пожара оценивается по формуле:

$$W = (S \cdot m \cdot H) / t, \text{ МВт} \quad (1)$$

где: t – время горения, с; S -общая площадь пожара, м^2 ; m - горючая нагрузка, $\text{кг}/\text{м}^2$; H – теплота сгорания 1 кг горючего, $\text{МДж}/\text{кг}$.

Средняя мощность тепловыделения с единицы кромки фронта конфлаграционного типа пожара:

$$J = (S^{0,5} \cdot m \cdot H) / (\pi^{0,5} \cdot t), \text{ МВт}/\text{м} \quad (2)$$

Средняя величина мощности тепловыделения с единицы площади массового пожара:

$$q = (m \cdot H) / t, \text{ МВт}/\text{м}^2 \quad (3)$$

Для крупных лесных пожаров средняя горючая нагрузка $m = 5-10 \text{ кг}/\text{м}^2$, теплота сгорания лесных горючих $H = 20 \text{ МДж}/\text{кг}$

В **табл. 1** даны оценки мощностей энерговыведения некоторых крупных пожаров.

На основе анализа наблюдавшихся в естественных условиях лесных, а также экспериментальных пожаров, установлено, что при конфлаграционном распространении пожаров мощность тепловыделения с единицы длины кромки фронта составляет от 10 до 80 $\text{МВт}/\text{м}$, где последняя цифра реализуется крайне редко в экстремальных ситуациях. Ширина

конфлаграционного фронта такого пожара L может достигать 100 м. Средняя мощность тепловыделения при массовых площадных пожарах $q = 10^4$ Вт/м², а в массовых пожарах типа огненного шторма – $q = 2,5 \cdot 10^5$ Вт/м² [11].

Таким образом, средние значения параметров крупных лесных пожаров следующие: $q = 10^4$ Вт/м², $J = 5 \cdot 10^6$ Вт/м, $L = 80$ м.

Для линейного пожара конфлаграционного типа с мощностью тепловыделения на кромке $J = 5 \cdot 10^6$ Вт/м и шириной фронта $L = 80$ м вертикальный Z_m и горизонтальный D_m размер зоны возмущений, а также максимальные величины, реализующихся в конвективной колонке вертикальных V_m и горизонтальных скоростей U_m , составляют: $Z_m = 1,6$ км; $D_m = 0,5$ км; $U_m = 10$ м/с; $V_m = 1,5$ м/с. Горизонтальная скорость суммируется со скоростью ветра с наветренной и вычитается - с подветренной сторон фронта.

Проведенные в ФГБУ ВНИИПО МЧС России натурные экспериментальные лесные пожары показали, что за счет теплоизлучения происходит диссипация тепла в атмосферу, при этом температура воздуха в районе пожара может повышаться от 5 до 30 градусов. Таким образом, создаются условия для того, чтобы пожар способствовал увеличению времени существования антициклона над засушливой территорией и, тем самым, крупные лесные пожары начинают, как бы сами себя поддерживать.

Продукты горения лесных и торфяных пожаров

В пожароопасный период ежегодно на земле возникает до 400 тысяч лесных пожаров, выбрасывающих в атмосферу миллионы тонн продуктов сгорания и значительное количество загрязняющих веществ. В последние годы глобальное потепление и парниковый эффект является важной проблемой, от решения которой зависит устойчивое развитие цивилизации. Наибольший вклад в создании парникового эффекта вносит диоксид углерода. Доля CO_2 и других парниковых газов в создании парникового эффекта составляет более 50% [12].

Основным источником увеличения концентрации диоксида углерода является сжигание ископаемого топлива, а также крупные городские и лесные пожары. Состав продуктов горения зависит от вида горючего материала, а также от условий развития пожара (вентиляции и температуры).

Имеющиеся данные о количестве и составе продуктов горения получены, как правило, в лабораторных условиях и не учитывают условия развития пожара. В связи с этим, был проведен комплекс экспериментальных и теоретических исследований, целями которых была оценка количественного и качественного состава продуктов горения крупных пожаров в атмосфере.

В **табл. 2** представлены результаты экспериментального исследования количественного состава продуктов горения для некоторых видов пожарной нагрузки. Как видно из табл. 2, количество диоксида углерода в продуктах

горения составляет от 25% для синтетических материалов и до 72,4% для древесины.

Выход продуктов горения в атмосферу при лесных и торфяных пожарах существенно изменяет ее газовый состав, что не может не сказаться на здоровье человека. Так, при пожарах в 1972 г. концентрация оксида углерода превышала в городах Московской области предельно допустимую в 5-10 раз и составила в г. Мытищи - 170 мг/м³, в Шатуре - 60 мг/м³, в Ногинске - 50 мг/м³ [13].

Используя данные о пожарах 1972 г. и 2010 г., можно сделать оценки по общему выносу в атмосферу СО и СО₂, дымового аэрозоля. Эти оценки колеблются в пределах 1,5-2,0 10⁷ т по каждой компоненте. Выход дымового аэрозоля при сгорании лесных горючих материалов оценивается от 2 до 5% от массы. Наиболее часто встречаемые высоты подъема дыма от крупных лесных пожаров 2-3 км. При вихревых массовых пожарах, которые возникают локально (время горения 1,5-2 часа) конвективная струя достигает высоты 5-6 км.

Следует отметить, что если диоксид углерода препятствует оттоку тепла, т.е. способствует повышению температуры атмосферы, то дымовой аэрозоль экранирует солнечную радиацию и, таким образом, способствует выхолаживанию атмосферы.

Величина выбросов продуктов горения в атмосферу зависит запаса и типа лесного горючего материала и его влагосодержания, метеоусловий, рельефа местности и ряда других условий. Значения коэффициентов эмиссии для различных типов лесных пожаров представлены в табл. 3 [14].

Выводы

Лесные пожары приносят не только большой экономический ущерб. Они являются также важным фактором локальной, региональной и даже глобальной экодинамики.

Крупные лесные пожары сопровождаются интенсивными тепловыми возмущениями в атмосфере и образованием обширных зон задымления и загазованности продуктами горения, которые существенно влияют на здоровье людей.

Загрязнение атмосферы большим количеством продуктов горения при крупных пожарах может приводить к значительным экологическим и климатическим последствиям. К числу экологических глобальных последствий относится тенденция изменения климата и потепления на Земле (парниковый эффект), связанная с увеличением в атмосфере концентраций диоксида углерода.

Если диоксид углерода вносит наибольший вклад в создании парникового эффекта и способствует повышению температуры атмосферы,

то дымовой аэрозоль экранирует солнечную радиацию и, таким образом, может приводить к снижению температуры.

Связанные с лесными пожарами выбросы аэрозоля в атмосферу могут оказывать существенное влияние на микрофизические и оптические характеристики облачного покрова. Выбросы в атмосферу во время лесных пожаров разнообразных малых газовых и аэрозольных компонентов могут оказывать существенное влияние на протекающие в атмосфере химические и другие процессы.

Оценка влияния лесных и торфяных пожаров на окружающую среду связана также с развитием следующих направлений исследования: изучение природы лесных пожаров с учетом региональных особенностей; изучение пирологических свойств горючих материалов для изыскания средств и способов управления процессом горения и тушения пожаров; разработка дистанционных методов обнаружения и зондирования пожаров; разработка вопросов тактики и организации тушения крупных пожаров; комплексные исследования последствий пожаров с точки зрения экологии, разработка методов более точного учета ущерба от пожаров.

Литература

1. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. - Новосибирск: Наука, 1992.
2. Будыко М.И., Голицын Г.С., Израэль Ю.А. Глобальные климатические катастрофы. - М.: Гидрометеиздат, 1985.
3. Валендик Э.Н., Матвеев П.М., Софронов М.А. Крупные лесные пожары. - М.: Наука, 1979.
4. Anderson H. Sundance Fire: an Analysis of Fire Phenomena. – USA: USDA Forest Serv. Res. Paper INT-56, 1968.
5. Григорьев А.А., Липатов В.Б. Дымовые загрязнения атмосферы по наблюдениям из космоса. - Л.: Гидрометеиздат, 1978.
6. Курбатский Н.П. Классификация лесных пожаров // Вопросы лесоведения. - Красноярск: ИЛиД СО АН СССР, 1970. - С. 384-407.
7. Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф (основные определения и понятия теории катастроф и общие закономерности их возникновения и развития): Учеб. пособие. – Томск: ТГУ, 2002.
8. The Effects on the Atmosphere of a Major Nuclear Exchange. - Washington, D.C.: Nat. Acad. Sci. Press, 1985.
9. Копылов Н.П., Хасанов И.Р. Лесоторфяные пожары и их влияние на окружающую среду // Пожарная безопасность. – 2013. - № 2. - С. 95-103.
10. Копылов Н.П., Рыжов А.М., Хасанов И.Р. Крупные пожары и их моделирование // Моделирование пожаров и взрывов. Под ред. Н.Н. Брушлинского и А.Я. Корольченко. – М.: Пожнаука, 2000. – С. 170-187.

11. Gostintsev Yu.A., Kopylov N.P., Khasanov I.R. Aerodynamics and Combustion Products Transfer by Large Area Fires // Combustion, Detonation, Shock Waves: Proceeding of the Zel'dovich Memorial, Int. Conf. on Combustion, Moscow, 1994. - V. 2. - P. 252-254.

12. Владимиров В.А., Измалков В.И. Катастрофы и экология. – М.: МЧС, 2000.

13. Копылов Н.П., Хасанов И.Р. Прогнозирование параметров загрязнения атмосферы при крупных пожарах // Стратегические риски чрезвычайных ситуаций: оценка и прогноз. Матер. 8-й Всероссийской научно-практической конференции по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. – М.: МЧС России, 2003. – С. 302-308.

14. Гришин А.М, Долгов А.А., Цимбалюк А.Ф. Методика определения и расчета выбросов загрязняющих веществ от лесных пожаров. – Томск: ТГУ, 1997.

Таблица 1

Энергетические характеристики крупных лесных пожаров

Название пожара	Площадь, м ²	Мощность пожара, W, МВт	Тепло- выделение с кромки пожара, J, МВт/м	Тепло- выделение с площади пожара, q, КВт/м ²
Шуйско-Сурокский пожар, 1972 г. [3]	$2 \cdot 10^8$	$2,3 \cdot 10^5$	9	1
Кепинский пожар, 1970 г., Архангельская обл. [3]	$5,68 \cdot 10^7$	$8 \cdot 10^3$	0,6	0,15
Горьковская обл. и Марийская АССР, 1972 г. [2]	$4 \cdot 10^8$ - $12 \cdot 10^9$	$(5-14) \cdot 10^5$	15-23	1
Пожар в Скалистых горах, 1910 г. (США) [3]	$1,2 \cdot 10^{10}$	$2,3 \cdot 10^5$	1,3	-
Пожар Sierra National Forest, 1961 г. (США) [8]	$2 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^5$	15	6

Пожар Sundance Fire, 1961 г. (США) [4]	$2 \cdot 10^9$	$5,3 \cdot 10^5$	80	0,25
---	----------------	------------------	----	------

Таблица 2

Состав и концентрация основных продуктов горения различных материалов

Компо- нент	Концентрации (весовые), %							
	Ре- зина	Шер- сть	Поро- лон	Кожа	ДСП	Бумага	Шелк	Древе- сина
Водород	0,26	0,22	0,54	0,24	-	0,65	0,38	0,4
СО	15,0	23,5	15,5	24,5	21,5	24,5	14,5	20,5
СО ₂	41,6	70,0	25,2	58,2	68,6	67,3	42,6	72,4
Метан	2,2	1,8	2,5	1,35	1,8	3,2	3,1	2,4
Этилен	2,0	2,1	4,0	2,0	0,8	2,0	1,98	1,2
Этан	0,42	0,42	0,8	0,4	0,18	0,4	0,4	0,3
Пропи- лен	3,32	2,4	2,24	2,18	1,96	2,38	2,1	1,68

Таблица 3.

Значения коэффициентов эмиссии для различных типов лесных пожаров

Наименование загрязнителя	Значение коэффициента эмиссии (кг/кг) для различных лесных пожаров		
	низовой	пожар на торфянике	повальный верховой
Оксид углерода CO	0,135	0,135	0,135
Диоксид углерода CO ₂	0,094	0,094	0,094
Оксиды азота NO _x	0,000405	0,000405	0,000405
Сажа С	0,0062	0,011	0,0014
Дым (ультрадисперсные частицы SiO ₂)	0,0345	0,055	0,014
Метан CH ₄	0,075	0,075	0,075
Непредельные углеводороды	0,011	0,011	0,011
Озон	0,001	0,001	0,001

Список принятых обозначений

W – мощность пожара, Вт;

S - общая площадь пожара, м²;

t – время горения пожара, с;

m - горючая нагрузка, кг/м²;

H – теплота сгорания 1 кг горючего, МДж/кг;

J - мощность тепловыделения с единицы кромки фронта пожара, Вт/м;

q - мощность тепловыделения с единицы площади пожара, Вт/м²;

L - ширина фронта пожара, 100 м;

Z_m - вертикальный размер зоны возмущений в атмосфере при пожаре, м;

D_m - горизонтальный размер зоны возмущений в атмосфере при пожаре, м;

V_m – максимальная вертикальная скорость потоков в конвективной колонке пожара, м/с;

U_m - максимальная горизонтальная скорость потоков в конвективной колонке пожара, м/с;

π - число Пи.