

ОЦЕНКА ДАЛЬНОСТИ РАЗЛЕТА ГОРЯЩИХ ЧАСТИЦ ПРИ ЛЕСНЫХ  
ПОЖАРАХ НА ТЕРРИТОРИИ ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО  
АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРЫ

Антонов С.Ю.

При пожарах на объектах и в лесах механизм распространения горения за счет разброса горящих частиц, искр и головней является одним из определяющих. Для проведения профилактических мероприятий лесных пожаров и успешной борьбы с ними необходимо оценить на какое расстояние могут переноситься горящие частицы, способные вызвать новые очаги горения. Дальность переноса горящих частиц зависит от вида пожара (высоты конвективной колонки), скорости ветра, размера и длительности горения переносимых частиц.

Для двумерного случая движение частиц в конвективной колонке и в атмосфере (после выпадения из колонки) описывается следующими уравнениями:

$$m \frac{dv_x}{dt} = m \left( \frac{dU_x}{dt} - \frac{dW_x}{dt} \right) = 1/2 \rho C_D A W W_x; \quad (1)$$

$$m \frac{dv_y}{dt} = m \left( \frac{dU_y}{dt} - \frac{dW_y}{dt} \right) = 1/2 \rho C_D A W W_y - mg, \quad (2)$$

где  $m$  – масса частицы;

$U_x, U_y$  – проекции скоростей потока в конвективной колонке и ветра на оси  $X$  и  $Y$ ;

$W, W_x, W_y$  – скорость потока относительно частицы и ее составляющие;  $v_x, v_y$  – составляющие абсолютной скорости частицы;

$\rho$  – плотность среды, в которой движется частица;

$C_D$  – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы;

$A$  – сечение Миделя частицы;

$g$  – ускорение свободного падения.

При записи системы уравнений были приняты следующие допущения:

1. Сила сопротивления, действующая на частицу, прямо пропорциональна площади ее максимального поперечного сечения (Миделева сечения) и квадрату скорости потока относительно частицы ;

2. Масса частицы сосредоточена в центре масс;

3. Сила сопротивления совпадает с направлением скорости потока относительно частицы и приложена к центру масс.

В общем случае за время полета за счет горения у частицы являются переменными масса  $m$  и сечение Миделя  $A$ . Сила сопротивления и диаметр частицы при горении меняются таким образом, что коэффициент аэродинамического сопротивления остается приблизительно постоянным.

При пожарах образуются в основном частицы, имеющие сферическую или цилиндрическую форму. Для таких частиц коэффициент аэродинамического сопротивления  $C_D$  соответственно равен 0,2 и 0,5.

Изменение массы горячей частицы в условиях принудительной конвекции определялось из эксперимента.

Координаты траектории полета частицы можно определить по следующим формулам:

$$X = \int_0^t (U_x - W_x) dt; \quad (3)$$

$$Y = \int_0^t (U_y - W_y) dt. \quad (4)$$

Для решения системы уравнений (1 – 4) необходимо задать начальные условия. Таковыми являются высота, с которой начинается движение частицы и вектор ее начальной скорости. Уравнения (1) – (4) решались численно методом Рунге-Кутты.

Для оценки влияния на дальность полета частицы различных параметров, входящих в уравнения, были выполнены численные расчеты. Коэффициент  $q = k \cdot C_D \cdot A / 2m$ , характеризующий отношение площади поверхности частицы к объему, изменялся в пределах от 0,01 до 0,1, что соответствует цилиндрическим частицам с длиной образующей  $L$  до 2 см или сферическим частицам с радиусом  $r$  до 0,5 см. Результаты расчетов при различных начальных условиях представлены на рис.1.

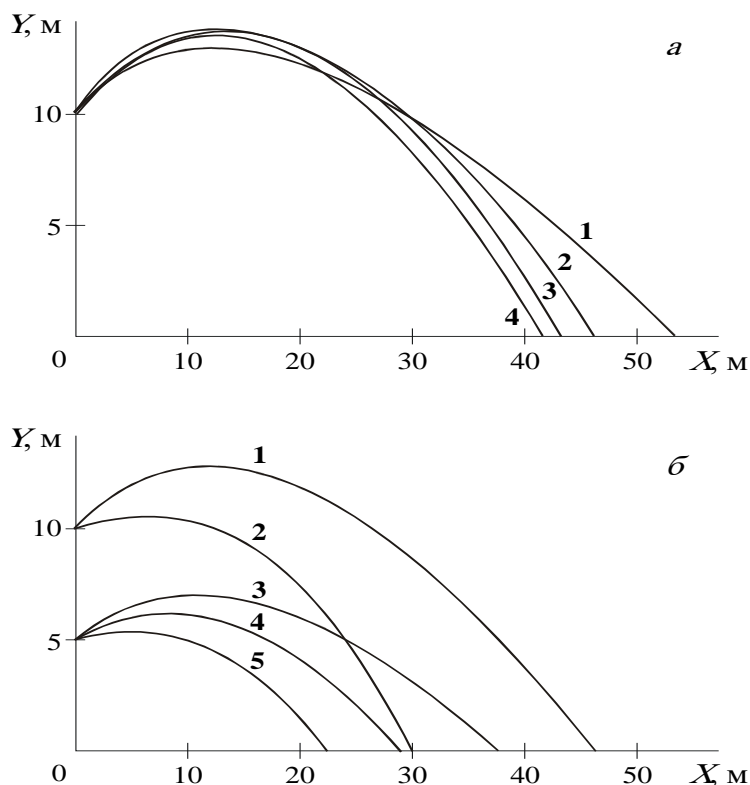


Рис. 1. Зависимость дальности разлета частиц от начальных условий:

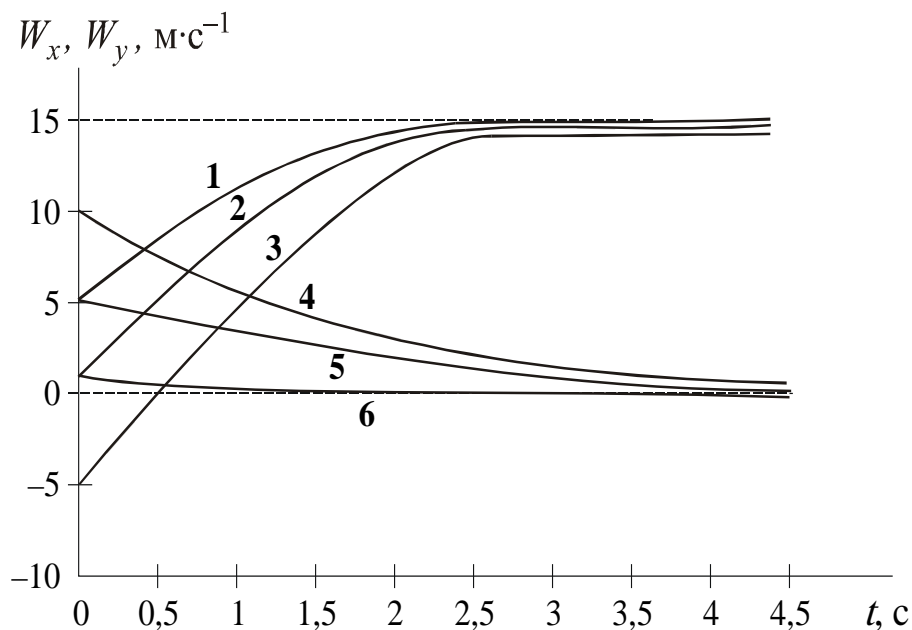
- а) от коэффициента  $q$ : 1 – при  $k = 0,1$ ; 2 – при  $q = 0,05$ ; 3 – при  $k = 0,04$ ; 4 – при  $q = 0,01$ ; б) от начальных условий при  $a = 0,04$ :  
 1 – при  $W_x = 5, W_y = 5, y = 10$ ; 2 – при  $W_x = 0,1, W_y = 0,1, y = 10$ ;  
 3 – при  $W_x = 5, W_y = 5, y = 5$ ;

4 – при  $W_x = 0,1$ ,  $W_y = 5$ ,  $y = 5$ ; 5 – при  $W_x = 0,1$ ,  $W_y = 0,1$ ,  $y = 5$

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

1. Коэффициент  $q$ , изменяясь в пределах от 0,01 до 0,05, оказывает слабое влияние на дальность полета частиц (рис. 1). При  $q > 0,05$  дальность полета существенно возрастает. Это объясняется возрастанием влияния силы сопротивления на движение частицы в газовом потоке.

2. Для малого времени полета частиц (менее 10 секунд) наблюдается большая зависимость дальности заброса от начальных условий (начальной скорости и высоты). При увеличении времени полета дальность заброса частицы практически не зависит от начальной скорости. Это происходит потому что при постоянных  $q$  относительная скорость частиц  $W_x$  и  $W_y$  через 3–5 секунд мало отличается от своих асимптотических значений  $W_x = 0$  и  $W_y = \sqrt{9/\alpha}$  (рис. 2.).



Время полета, с.

Рис. 2. Зависимость относительной скорости движения частиц  $W_x$ ,  $W_y$  от времени полета при  $q = 0,05$ : 1, 2, 3 –  $W_y = f(t)$ ; 4, 5, 6 –  $W_x = f(t)$

3. Изменение массы частицы существенно влияет на дальность заброса при времени полета  $t$  – более 1 мин. При  $t = 5–10$  с учет фактора переменности массы несущественен (погрешность составляет около 2 %).

Результаты расчетов, выполненных по описанной математической модели, сравнивались с данными натурных экспериментов, проведенных при сжигании домов IV и V степеней огнестойкости размером  $15 \times 15 \times 5$  (м) и штабелей древесины  $6 \times 6 \times 3$  (м). В экспериментах высота верхней кромки факела составляла 10 – 15 м, скорость восходящего потока 7 – 10 м·с<sup>-1</sup>, скорость ветра 4 – 6 м·с<sup>-1</sup>.

В табл. 2.10 даны средние расстояния переноса горящих частиц при различных значениях скорости ветра для верховых и сильных низовых пожаров, при которых происходит формирование конвективных колонок.

Представленные в табл. 1 данные получены в результате анализа реальных пожаров и проведенных экспериментальных и теоретических исследований. Таким образом, если объект находится от кромки пожароопасного массива на расстоянии меньше, чем 200-300 м, то необходимо провести оценку возможной пожарной обстановки и соответствующие противопожарные мероприятия по защите объекта.

Таблица 1

Средние величины дальности заброса горящих частиц (м), приводящих к возгоранию, в зависимости от силы пожара

Скорость ветра, м/с	Низовой сильный, верховой слабый пожар	Верховой средний пожар	Верховой сильный пожар
3-5	25-35	50-60	80-100
7-10	50-70	100-120	150-200
10-15	100-120	200-250	300-400

Для таких начальных условий рассчитанные дальности заброса частиц составили 40-100 м, что хорошо согласуется с данными, приведенными в табл. 1. Это позволяет разработанную схему расчета дальности заброса горящих частиц рекомендовать для практического использования. Результаты расчетов дальности заброса горящих частиц в зависимости от скорости ветра и площади пожара представлены на рис 3.

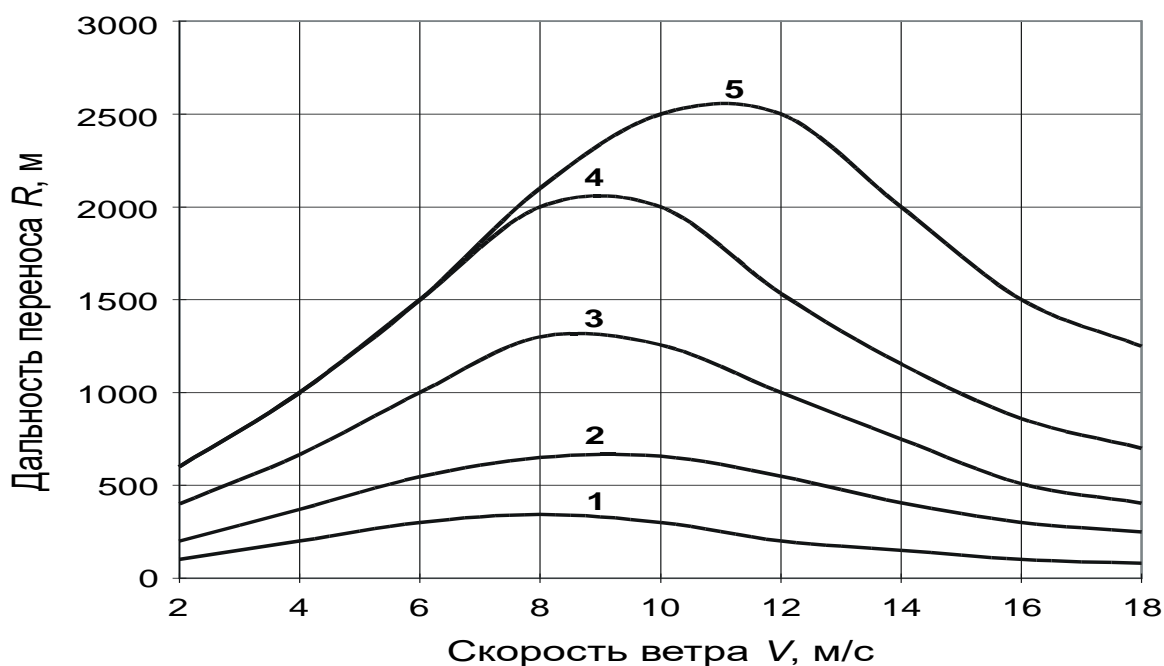


Рис. 3. Максимальная дальность переноса высокотемпературных частиц в зависимости от скорости ветра и площади пожара:

1 - площадь пожара 0,3 га; 2 - 0,8 га; 3 - 1,5 га; 4 - 2,5 га; 5 - 4,5 га

### Литература.

1. Сухинин А.И. Система космического мониторинга лесных пожаров в Западной сибире. // Сибирский экологический журнал. 2016. Т.3. № 1. С.85-91.
2. Егоров В.А., Ильин В.О., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Флитман Е.В. Возможности построения автоматизированных систем обработки спутниковых данных на основе программного комплекса XV\_SAT, //Сборник научных статей, Москва, Полиграф сервис, 2004 – С. 431-436.
3. Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А. Картографирование повреждений пожарами бореальных экосистем по данным спутниковых наблюдений // Сборник тезисов докладов. 31- я Конференция по глобальному мониторингу для устойчивого развития и безопасности ISRSE., Санкт-Петербург, 2017, CD-ROM.
4. Коровин Г.Н., Андреев Н.А. Авиационная охрана лесов. // М.: Агропромиздат. 2010, 220 с.
5. Абушенко Н.А., Е.В. Флитман. Система сбора, обработки и доставки спутниковых данных для решения оперативных задач службы пожароохраны лесов России. Научные технологии. 2015. т. 1. N 2. 4-18 с.
6. Справочник потребителя спутниковой информации / Под ред. Асмуса В.В., Милехина О.Е.. СПб.: Гидрометеиздат, 2012. 168 с.