

*А.Я. Шаршанов, к.ф.-м.н., доцент, доцент каф., НУГЗУ*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ПОЖАРООПАСНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РАЗЛЕТАЮЩИХСЯ ИСКР ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ**

(представлено д-ром техн. наук Ключкой Ю.П.)

На основе численного моделирования построена фазовая диаграмма, описывающая взаимозависимость температуры и размера падающей искры горючего материала. Обнаружен предельный «притягивающий» режим горения искр, отвечающий значительной области начальных значений температур и размеров искр. Определена граница этой потенциально пожароопасной области, являющаяся «отталкивающей» фазовой траекторией, при температурах ниже которой искры переходят в химически инертный режим падения.

**Ключевые слова:** искра, горючий материал, источник зажигания, фазовая диаграмма, притягивающие и отталкивающие траектории.

**Постановка проблемы.** Одной из причин возникновения и распространения пожара является разлет высокотемпературных искр, выступающих в качестве источника зажигания. В связи с этим обстоятельством прогнозирование перемещения и температурного режима искр является важной задачей обеспечения пожарной безопасности.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Данная проблема с достаточной для целей практики точностью давно решена в случае искр негорючих материалов. В случае горючих материалов ситуация сложнее, однако, существующий ГОСТ, совпадающий с [1], для определения их пожарной опасности предлагает методики, по существу соответствующие негорючим материалам. Такой подход ошибочен, так как энергетический баланс горящих и химически инертных искр коренным образом отличается. Попытки последовательного решения задачи о горении летящих искр (на основе уравнений движения и уравнений массового и энергетического балансов) были предприняты в работах [2, 3]. В работе [2] в рамках упрощений, основным из которых был изотермический режим тления летящей искры, удалось получить относительно простые аналитические соотношения, позволяющие оценить пожарную опасность горящих искр. В работе [3] исходная система уравнений не упрощалась, и в связи с ее сложностью исследовалась численно. Одной из достигнутых целей работы [3] было подтверждение существования изотермического режима горения падающей искры.

При анализе результатов работы [3] естественным образом возник вопрос о границе начальных значений температуры искр, ниже которых падающие искры гаснут, не разгоревшись, ввиду чего теряют

даже потенциальную пожарную опасность. Именно этой проблеме посвящена данная работа.

**Постановка задачи и ее решение.** В работе рассматривается разлет под действием ветра искр древесного угля, занесенных на высоту, например, восходящими конвективными потоками пожара. На поверхности искры проходят гетерогенные реакции окисления углерода, уход продуктов которых приводит к уменьшению массы искры.

Задача, как и в работах [2, 3], сводится к решению уравнений массового и энергетического балансов, но по сравнению с упомянутыми работами в данной сделано упрощение - уравнение движения заменено на условия совпадения горизонтальной компоненты скорости перемещения искры  $w_x$  со скоростью ветра и вертикальной компоненты скорости со скоростью стационарного падения частицы эффективного диаметра  $d$

$$w_z(d) = \frac{12 \cdot \nu_a}{C_f \cdot d} - \sqrt{\left(\frac{12 \cdot \nu_a}{C_f \cdot d}\right)^2 + \frac{4 \cdot g \cdot \rho \cdot d}{3 \cdot C_f \cdot \rho_a}}, \quad (1)$$

где  $\nu_a$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха,  $m^2 \cdot c^{-1}$ ;  $C_f$  – коэффициент формы (безразмерная величина  $\sim 1$ , в случае искр сферической формы  $C_f = 0.47$ );  $g = 9.8 m \cdot c^{-2}$  – ускорение свободного падения;  $\rho, \rho_a$  – плотности искры и воздуха, соответственно,  $kg \cdot m^{-3}$ . Данное упрощение возможно из-за малости характерного времени выхода частицы на стационарный режим падения по сравнению с временем сгорания частицы.

Уравнение, описывающее потерю массы искры вследствие горения, имеет вид

$$\frac{dm}{d\tau} = -\mu_C \cdot [R_{CO_2} + R_{CO}] \cdot F, \quad (2)$$

где  $\tau$  – время, с;  $m$  – масса искры, кг;  $m = \rho \cdot V$ , где  $V$  – объём искры (в случае искр сферической формы  $V = \frac{\pi}{6} \cdot d^3$ );  $\mu_C = 1,2 \cdot 10^{-2} kg \cdot mоль^{-1}$  – условная молярная масса углерода;  $F$  – сглаженная площадь поверхности горения,  $m^2$  (в случае искры сферической формы  $F = \pi \cdot d^2$ );  $R_{CO_2}$  и  $R_{CO}$  – соответственно, эффективные поверхностные плотности мольной скорости образования  $CO_2$  и  $CO$  при выгорании углерода,  $моль \cdot m^{-2} \cdot c^{-1}$ .

Эффективные скорости реакций учитывают диффузию кислорода воздуха к реакционной поверхности искры [4]

$$R_j = \frac{c_{O_2}}{\left(w_j^{tot}\right)^{-1} + \left(Nu_{O_2} \cdot D_{O_2} / d\right)^{-1}},$$

где индекс «j», могущий принимать два значения (CO<sub>2</sub> или CO), указывает на продукт соответствующей реакции;

$$c_{O_2} = 0,21 \cdot \frac{\rho_a}{\mu_a}$$

– концентрация кислорода в воздухе вдали от искры, моль·м<sup>-3</sup>;  $\mu_a = 2,9 \cdot 10^{-2}$  кг·моль<sup>-1</sup> – молярная масса воздуха;  $D_{O_2} = 1,8 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup> – коэффициент молекулярной диффузии кислорода в воздухе;  $Nu_{O_2}$  – диффузионное число Нуссельта (число Шервуда) диффузии кислорода в воздухе. Оно удовлетворяет критериальному уравнению

$$Nu_{O_2} = 2 + 0.16 \cdot Re^{2/3},$$

где символом Re обозначен критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{|w_z| \cdot L}{\nu_a}, \quad (3)$$

где  $L$  – характерный размер задачи, м (в случае искр сферической формы  $L=d$ ).

Общий реакционный коэффициент молярной скорости образования продукта «j» определяется соотношением

$$w_j^{tot} = w_j + D_{O_2.in} \cdot \kappa_j \cdot \left[1 - \exp\left(-\kappa_j \frac{d}{6}\right)\right], \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (4)$$

в котором первое слагаемое является реакционным коэффициентом молярной скорости образования продукта «j» на гладкой поверхности. Оно равно

$$w_j = \exp\left[2.30 \cdot \left(2 + 0.2 \cdot 10^{-4} \cdot E_j\right) - \frac{E_j}{R_0 \cdot T}\right], \text{ м} \cdot \text{с}^{-1},$$

где  $E_j$  – энергия активации соответствующей реакции, Дж·моль<sup>-1</sup> ( $E_{CO_2} = 0,84 \cdot 10^5$  Дж·моль<sup>-1</sup>,  $E_{CO} = 1,26 \cdot 10^5$  Дж·моль<sup>-1</sup>);  $T$  – абсолютная

температура реакционной зоны, К;  $R_0=8,314$  Дж·моль<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> – универсальная газовая постоянная.

Второе слагаемое в формуле (4) учитывает увеличение площади поверхности горения при ее изрыхлении и отличие условий диффузии кислорода в полостях от диффузии в свободном пространстве. Параметр  $\kappa_j$  имеет смысл обратной длины, м<sup>-1</sup>. Он равен

$$\kappa_j = \sqrt{\frac{w_j \cdot k_F}{D_{O_2.in}}},$$

где  $k_F$  – внутренняя реакционная площадь единицы объема горения, м<sup>-1</sup> (для древесного угля  $k_F=0,8 \cdot 10^5$  м<sup>-1</sup>).  $D_{O_2.in}$  – коэффициент диффузии кислорода в полостях внутри искры, м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>. Он связан с коэффициентом диффузии в свободном объеме  $D_{O_2}$  соотношением

$$D_{O_2.in} = k_{D.in} \cdot D_{O_2},$$

где  $k_{D.in}$  – коэффициент, учитывающий усложнение условий диффузии внутри искры (для древесного угля  $k_{D.in}=0,2$ ).

Уравнение энергетического баланса искры имеет вид

$$m \cdot c_p \cdot \frac{dT}{d\tau} = \left\{ \sum_j R_j \cdot [\Delta H_{\mu,j} - c_{p,\mu,j}^{b.pr} \cdot (T - T_a)] - \alpha \cdot (T - T_a) - q_{rad} \right\} \cdot F, \quad (5)$$

где  $T$  и  $T_a$  – абсолютные средняя температура искры и температура воздуха, соответственно, К;  $c_p$  – удельная массовая изобарная теплоемкость материала искры, Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> (для древесного угля  $c_p = 1,2 \cdot 10^3$  Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>);  $\Delta H_{\mu,j}$  – удельная теплота реакции окисления углерода, взятая при температуре  $T_a$ , в расчете на моль образовавшегося продукта, Дж·моль<sup>-1</sup> ( $\Delta H_{\mu,CO_2}=4,09 \cdot 10^3$  Дж·моль<sup>-1</sup>,  $\Delta H_{\mu,CO}=1,23 \cdot 10^3$  Дж·моль<sup>-1</sup>);  $c_{p,\mu,j}^{b.pr}$  – изобарная теплоемкость продуктов сгорания, приходящихся на моль, образующегося при сгорании «j»-го окисла

$$\begin{aligned} c_{p,\mu,CO_2}^{b.pr} &= c_{p,\mu,CO_2} + \beta \cdot c_{p,\mu,N_2} = 163,4 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}, \\ c_{p,\mu,CO}^{b.pr} &= c_{p,\mu,CO} + \beta/2 \cdot c_{p,\mu,N_2} = 89,0 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}, \end{aligned}$$

где  $c_{p,\mu,j}$  – изобарная теплоемкость «j»-го продукта окисления ( $c_{p,\mu,CO_2} = 47,9$  Дж·моль<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>,  $c_{p,\mu,CO} = 31,3$  Дж·моль<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>),

$c_{p,m.N_2} = 30,8 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  – изобарная теплоемкость азота;  $\beta = 3,76$  – количество молей азота приходящаяся на моль кислорода в воздухе.

Символом  $\alpha$  обозначен средний по поверхности искры коэффициент теплоотдачи. Соответствующее ему слагаемое отображает унос энергии от искры к воздуху обычным конвективным механизмом. Величину коэффициента  $\alpha$  с достаточной точностью можно определить по стандартной методике (см. в [1]). Сначала вычисляется критерий Рейнольдса (3). Затем определяется тепловое число Нуссельта

$$Nu = 0.62 \cdot Re^{0.5}.$$

Далее вычисляется коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda_a}{L}, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1},$$

где  $\lambda_a$  – коэффициент теплопроводности воздуха,  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  (в работе взято  $\lambda_a = 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ).

Последнее слагаемое в фигурной скобке формулы (5) отображает унос энергии тепловым излучением. Оно оценивается соотношением

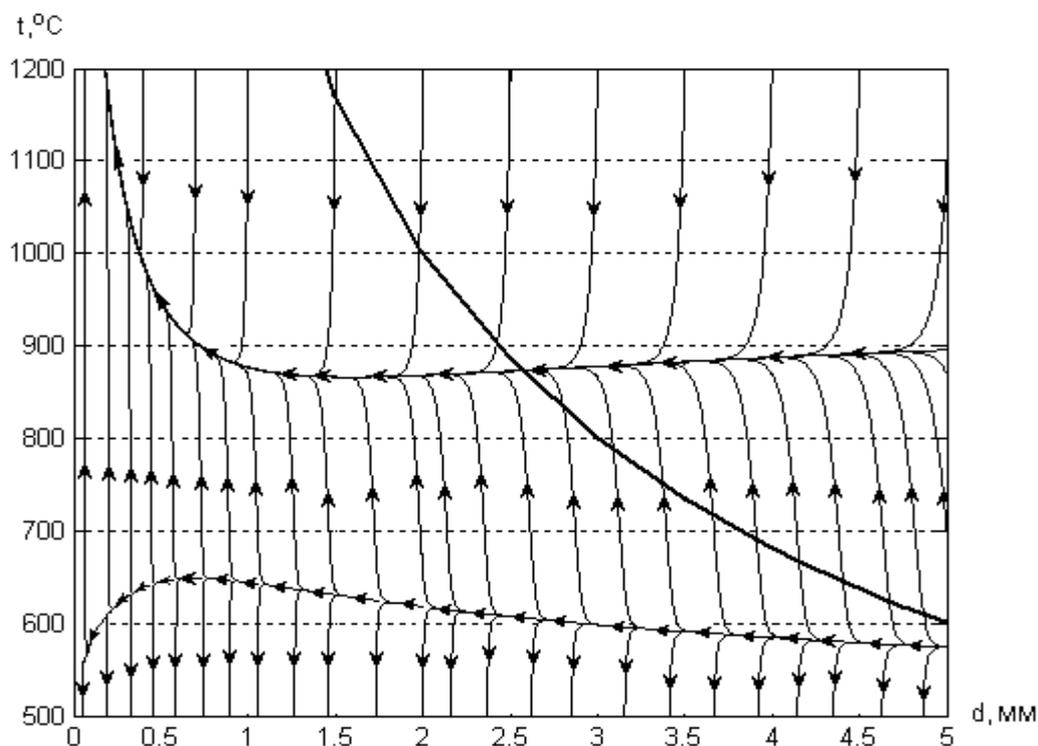
$$q_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_a^4), \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2},$$

где  $\varepsilon$  – степень черноты поверхности искры (в работе принято  $\varepsilon = 0,96$ );  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$  – постоянная излучения абсолютно черного тела.

Уравнения (2), (5) описывают эволюцию параметров искры (температуру, размеры). Начальные условия соответствуют представлению, что горящая искра заброшена вверх (например, конвективными потоками пожара), и далее, выйдя на высоте из восходящего потока, падает сносимая ветром. Данная система решалась численно с использованием среды Matlab. Система уравнений (2), (5) является автономной, что позволило построить фазовую диаграмму T-d, представленную на рис. 1.

Диаграмма демонстрирует существование двух предельных траекторий – притягивающей и отталкивающей. Все искры, с начальными температурами ниже температуры на отталкивающей траектории (примерно  $600^\circ\text{C}$ ), ведут себя, как химически инертные. Они попадают на еще одну не показанную на рисунке притягивающую траекторию с постоянной температурой незначительно превышающую температуру воздуха  $t_a=20^\circ\text{C}$ . Все искры, с температурами выше отталкивающей траектории, попадают на единую высокотемпературную притягиваю-

щую траекторию, то есть в этой области независимо от начальных диаметров и температур все искры выходят на одинаковый режим горения.



**Рис. 1.** Фазовая диаграмма температура–диаметр падающей искры (стрелками указано направление изменения параметров с ростом времени; жирная линия соответствует границе области пожарной опасности)

Как видно из диаграммы, притягивающая траектория содержит значительный квазиизотермический участок (с температурой примерно  $900^{\circ}\text{C}$ ). Последнее обстоятельство подтверждает предположение работы [2] о существовании изотермического режима горения.

На диаграмме жирной линии изображена граница области пожарной опасности, построенная, как и в работе [3], на основе одного из возможных вариантов феноменологического критерия пожарной опасности

$$Par(T, d) \equiv (T - T_c) \cdot d^n > Par_{cr}. \quad (6)$$

Параметры критерия  $Par(T, d)$  получены на основе данных стандарта [1], согласно которым граница поджигающей способности искры соответствует трем парам значений температур и диаметров искры:  $T_1=600+273$ , К,  $d_1=5 \cdot 10^{-3}$ , м;  $T_2=800+273$ , К,  $d_2=3 \cdot 10^{-3}$ , м;  $T_3=1000+273$ , К,  $d_3=2 \cdot 10^{-3}$ , м. Это означает, что  $Par_{cr} \approx 46.3 \text{ К} \cdot \text{м}^n$ ,  $T_c \approx 196 \text{ К}$ ,  $n \approx 0.506$ .

**Выводы.** Проведено численное моделирование горения разлетающихся искр горючих материалов, что важно при оценках опасности распространения пожара от крупных очагов (лесных пожаров).

Построена фазовая диаграмма, описывающая взаимозависимость температуры и размера падающей искры горючего материала. Определена граница потенциально пожароопасной области, являющаяся «отталкивающей» фазовой траекторией, при температурах ниже которой искры переходят в химически инертный режим остывания. Диаграмма также наглядно демонстрирует существование предельного «притягивающего» режима горения искр, на который «скатываются» все пожароопасные траектории. Квазиизотермический характер притягивающей траектории подтверждает важное для получения аналитических результатов [2] предположение о изотермическом горении летящих искр.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 12.1.004-91 Пожарная безопасность. Общие требования. – [ Действительный с 1991-06-14]. – Москва: Издательство стандартов, 1992. – 78 с. – (Государственный стандарт Союза ССР).
2. Шаршанов А.Я. Особенности определения радиуса разлета искр горючих материалов / А.Я. Шаршанов //Проблемы пожарной безопасности. -2010. – Вып. 27. – С.231-236.
3. Шаршанов А.Я. Математическое моделирование разлета искр горючих материалов / А.Я. Шаршанов, А.А. Посник //Проблемы пожарной безопасности. -2013. – Вып. 34. –С.179-185.
4. Померанцев В.В. Основы практической теории горения: учеб. пособие [для вузов]/В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др./ . – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.

А.Я. Шаршанов

### **Визначення області пожежонебезпечних значень параметрів летючих іскор горючих матеріалів**

На основі чисельного моделювання побудована фазова діаграма, що описує взаємозв'язок температури і розмірів падаючої іскри горючого матеріалу. Виявлено межовий «притягуючий» режим горіння іскор, що відповідає значній області початкових значень температур та розмірів іскор. Визначена межа цієї потенційно небезпечної області, що є «відштовхуючою» фазовою траєкторією, при температурах нижче якої іскри переходять у хімічно інертний режим падіння.

**Ключові слова:** іскра, горючий матеріал, джерело запалення, фазова діаграма, притягуючи та відштовхуючі траєкторії.

A.Ya. Sharshanov

### **Definition of area of fire-dangerous values of parameters of scattering sparks of combustible materials**

On the basis of numerical modeling the phase chart describing interdependence of temperature and the size of the falling spark of a combustible material is constructed. The limit "attracting" mode of burning of the sparks, answering to considerable area of initial values of temperatures and the sizes of sparks is found. The border of this potentially fire-dangerous area being a "repellent" phase trajectory is defined, at temperatures below which sparks pass to chemically inert mode of falling.

**Keywords:** spark, combustible material, ignition source, the phase chart, attracting and repellent trajectories.