

Ю.С. ИВАНОВ

НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций МЧС Республики Беларусь

к.т.н. В.Л КОЛПАЩИКОВ

Институт тепло- и массо обмена им. А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,

С.Ю. ЯНОВСКИЙ

Институт тепло- и массо обмена им. А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПАСНОСТИ ПОДЖИГА ГАЗОВОЗДУШНОЙ ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ ФРИКЦИОННЫМИ ИСКРАМИ

Streszczenie

Artykuł przedstawia badania dotyczące określania niebezpieczeństwa zapłonu gazowo-powietrznej mieszanki paliwowej na skutek iskrzenia frykcyjnego.

Содержание - Аннотация

На основе аналитического соотношения для ряда горючих смесей рассчитаны зависимости критической температуры частицы, способной поджечь смесь, от ее размеров, скорости полета, начальной температуры смеси и концентрации горючего компонента. Предложена расчетная методика определения пожарной опасности фрикционных искр, основанная на вычислении по теплофизическим, гидродинамическим и кинетическим параметрам горючей смеси, концентрации горючего компонента и окислителя, температуре и скорости полета искры ее критического размера, при превышении которого искра способна поджечь горючую смесь.

В связи со сложностью процесса фрикционного искрообразования и его зависимости от большого числа недостаточно изученных факторов до настоящего времени нет надежных методик определения опасности поджигания газоздушных горючих фрикционными искрами. Так в методике, приведенной в ГОСТ 12.1.004–91 /1/ предлагается рассчитывать время охлаждения фрикционной искры от начальной температуры до температуры самовоспламенения горючей среды, определять какая энергия передается за это время от искры к смеси и сравнивать ее с минимальной энергией зажигания смеси. Принято считать, что искра должна рассматриваться как опасная, если переданная от нее энергия превышает 40 % от минимальной энергии зажигания горючей смеси. Следует отметить, что в данной методике оценки пожарной опасности фрикционных искр горючая среда рассматривается как инертная, не

учитывается гидродинамика движения частицы в газовой среде и влияние начальной температуры среды на условие поджигания.

В работе /2/ авторы предложили использовать в качестве критического условия поджигания горючей смеси фрикционной искрой время загорания этой смеси искрой определенного размера и температуры. Поскольку время высокотемпературной «жизни» фрикционных искр (время от момента воспламенения искры до начала ее остывания) конечное и по экспериментальным данным составляет 10–20 мс /3, 4/, то необходимо рассматривать нестационарный процесс загорания горючих смесей с целью определения времени загорания. Если оно больше времени высокотемпературной «жизни» искры, то смесь не воспламеняется. На основе работы /5/ из решения системы уравнений теплопроводности, диффузии и химической кинетики определяется время загорания газа фрикционной искрой. Недостатком данной методики является то, что искра считается неподвижной. Однако характер теплообмена между поджигающим телом и потоком реагирующего газа существенно зависит от скорости полета искры. Поэтому целесообразно рассмотреть поджигание горючей газовой смеси движущимися накаливаемыми частицами.

На основе решения системы уравнений тепломассопереноса в окрестности критической точки движущейся раскаленной сферической частицы, моделирующей фрикционную искру в работе /6/ предложено следующее соотношение для определения критического радиуса частиц, зажигающих горючую смесь

$$(1 + 0,691 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,414}) \left(\frac{1}{\delta_\infty} - \frac{1}{\delta} + \frac{\delta}{\delta_\infty} \ln 4 \right) = A \cdot \exp \left(-\frac{1}{2\delta} \right) \quad (1)$$

где

$$A = \frac{a}{T_\infty} \sqrt{\frac{2QK_a E}{\lambda_a R}}; K_a = k \left(\frac{\rho_a C_{fa}}{M_f} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{\rho_a C_{oa}}{M_o} \right)^\beta; \delta = \frac{RT_a}{E}; \delta_\infty = \frac{RT_\infty}{E};$$

$$Re = \frac{2aU\rho_a}{\mu_a}; Pr = \frac{v_a}{\chi_a}; \chi_a = \frac{\lambda_a}{\rho_a c_p};$$

$$C_{fa} = C_{f\infty} - c_p \frac{(T_a - T_\infty)}{Q}; \quad (2)$$

$$C_{oa} = C_{o\infty} - c_p \frac{v_o M_o (T_a - T_\infty)}{v_f M_f Q}.$$

Здесь $\rho_a, c_p, \lambda_a, \chi_a, \mu_a, \nu_a$ – плотность, теплоемкость, коэффициент теплопроводности коэффициент температуропроводности, коэффициент динамической вязкости и коэффициент кинематической вязкости газовой смеси у поверхности частицы; $C_{fa}, C_{oa}, C_{f\infty}, C_{o\infty}$ – концентрации горючего и окислителя соответственно у поверхности частицы и в невозмущенной газовой смеси, a – радиус частицы; U – скорость относительного движения частицы и смеси; k – предэкспоненциальный множитель; M_f, M_o – молекулярные веса горючего и окислителя; ν_f, ν_o – стехиометрических коэффициентов реакции горения горючего компонента и окислителя α, β – показатели порядка реакции по отношению к концентрации реагирующих компонентов; E – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; T_a, T_∞ – температура частицы и невозмущенной газовой среды соответственно, Q – тепловой эффект реакции горения; Re – критерий Рейнольдса, Pr – критерий Прандтля.

Выражая явно значение радиуса частицы a из (1), получим

$$a = 0.25 B_1^{-2} \left(B_2 B_3 + (B_2^2 B_3^2 + 4 B_1 B_3)^{0.5} \right)^2, \quad (3)$$

где

$$B_1 = \frac{1}{T_\infty} \sqrt{\frac{2 Q K_a E}{\lambda_a R}} \exp\left(-\frac{1}{2\delta}\right); \quad B_2 = 0,977 \cdot Pr^{0,414} \cdot \sqrt{\frac{U \rho_a}{\mu_a}}; \quad B_3 = \frac{1}{\delta_\infty} - \frac{1}{\delta} + \frac{\delta}{\delta_\infty} \ln 4. \quad (4)$$

Значения плотности ρ_a , динамической вязкости μ_a и коэффициента теплопроводности λ_a для газа вблизи поверхности искры, входящие в параметры K_a, B_1, B_2, Re и Pr , вычисляем по значениям температуры на поверхности частицы

$$\rho_a = \rho_\infty \frac{T_\infty}{T_a}; \quad \mu_a = \mu_\infty \left(\frac{T_a}{T_\infty} \right)^{0,69}; \quad \lambda_a = \lambda_\infty \left(\frac{T_a}{T_\infty} \right)^{0,77}. \quad (5)$$

Значения плотности ρ_∞ , динамической вязкости μ_∞ и коэффициента теплопроводности λ_∞ на удалении от искры для газовой смеси можно рассчитать, зная соответствующие параметры для воздуха и горючего компонента.

Концентрация горючего компонента в воздухе может быть задана либо в объемных долях X_f , либо в весовых долях C_f . Пересчет концентраций осуществляется по формулам

$$C_f = \frac{X_f \cdot 0,069}{\left[\frac{1}{M_f} - X_f \left(\frac{1}{M_f} - 0,069 \right) \right]}, \quad (6)$$

$$X_f = \frac{C_f}{C_f + (1 - C_f) M_f \cdot 0,069}. \quad (7)$$

Коэффициент теплопроводности смеси λ_c определяется по формуле

$$\lambda_c = \frac{1}{\frac{X_e}{\lambda_e} + \frac{X_f}{\lambda_f}}, \quad (8)$$

где X_e, X_f – соответственно объемные доли воздуха и горючего компонента; λ_e, λ_f – коэффициенты теплопроводности воздуха и горючего компонента.

Плотность смеси ρ_c определяем из формулы

$$\rho_c = \rho_e X_e + \rho_f X_f, \quad (9)$$

где X_e, X_f – объемные доли воздуха и горючего компонента, а парциальные давления воздуха и горючего компонента определяются из соотношений

$$\rho_e = \frac{P_e M_e}{RT}; \quad \rho_f = \frac{P_f M_f}{RT}. \quad (10)$$

Теплоемкость смеси определяется по формуле

$$c_{pc} = c_{pe} c_e + c_{pf} c_f, \quad (11)$$

где c_e, c_f – весовые доли воздуха и горючего компонента в смеси; c_{pe}, c_{pf} – теплоемкости воздуха и горючего компонента.

Вязкость смеси определяется из соотношений

$$\mu_c = \frac{\mu_e}{1 + \frac{X_f}{X_e} \psi_{ef}} + \frac{\mu_f}{1 + \frac{X_e}{X_f} \psi_{fe}}, \quad (12)$$

где X_e, X_f – объемные доли воздуха и горючего компонента, μ_e, μ_f – коэффициенты динамической вязкости воздуха и горючего компонента

$$\psi_{ef} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_e}{\mu_f} \right)^{0.5} \left(\frac{M_f}{M_e} \right)^{0.25} \right]^2}{2\sqrt{2} \left(1 + \frac{M_e}{M_f} \right)^{0.5}}; \quad \psi_{fe} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_f}{\mu_e} \right)^{0.5} \left(\frac{M_e}{M_f} \right)^{0.25} \right]^2}{2\sqrt{2} \left(1 + \frac{M_f}{M_e} \right)^{0.5}}. \quad (13)$$

По теплофизическим и гидродинамическим свойствам индивидуальных горючих газов, приведенных в таблице 1, по формулам (5)-(13) были проведены расчеты соответствующих теплофизических и гидродинамических параметров газоздушных смесей на нижнем концентрационном пределе воспламенения (НКПВ) (таблица 2) и верхнем концентрационном пределе воспламенения (ВКПВ) (таблица 3).

По формуле (3) были рассчитаны зависимости критической температуры искры от ее радиуса и скорости движения в водородно-воздушной и пропано-воздушной смесях.

Принимались следующие значения теплофизических и гидродинамических параметров газоздушных смесей: $c_p = 1,1 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$; $\rho_\infty = 1,16 \text{ кг} / \text{м}^3$; $\mu_\infty = 0,182 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\lambda_\infty = 0,0025 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$. Для водородно-воздушной смеси глобальные кинетические параметры имеют значения /7/: $k = 4,32 \cdot 10^{13} \text{ кг} \cdot \text{м}^3 / (\text{кмоль}^2 \cdot \text{с})$; $E = 125,5 \text{ МДж} / \text{кг}$; $\alpha = \beta = 1$. Кроме того, принималось $Q = 121 \text{ МДж} / \text{кг}$ (H_2); $\nu_f = 2$; $\nu_o = 1$; $M_f = 2 \text{ кг} / \text{кмоль}$; $M_o = 32 \text{ кг} / \text{кмоль}$. Для пропано-воздушной смеси глобальные кинетические параметры имеют значения /8/: $k = 5,4 \cdot 10^{13} \text{ кг} \cdot \text{м}^3 / (\text{кмоль}^2 \cdot \text{с})$; $E = 131 \text{ МДж} / \text{кг}$; $\alpha = \beta = 1$. Кроме того, принималось $Q = 46,4 \text{ МДж} / \text{кг}$ (C_3H_8); $\nu_f = 1$; $\nu_o = 5$; $M_f = 44 \text{ кг} / \text{кмоль}$; $M_o = 32 \text{ кг} / \text{кмоль}$.

Таблица 1

Теплофизические и гидродинамические параметры индивидуальных горючих газов

Вещество	Формула	Молярная масса	Стехиометрический коэффициент	Теплоемкость, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	Теплопроводность, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	Плотность, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Температуропроводность, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}, \times 10^5$	Коэффициент диффузии, $\times 10^5$	Динамическая вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}, \times 10^5$	Кинематическая вязкость, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}, \times 10^5$
Воздух		0,029		1006	0,025	1,163	2,137	—	1,84	1,582
Водород	H_2	0,002	0,5	14200	0,168	0,04	29,58	7	0,896	22,400
Метан	CH_4	0,016	2	2180	0,031	0,641	2,218	1,96	1,11	1,732
Ацетилен	C_2H_2	0,026	2,5	1580	0,019	1,042	1,154	1,91	1,03	0,988
Этилен	C_2H_4	0,028	3	1470	0,018	1,123	1,09	1,41	1,03	0,917

Этан	C ₂ H ₆	0,03	3,5	1700	0,02	1,203	0,978	1,3	0,93	0,773
Пропилен	C ₃ H ₆	0,042	4,5	1460	0,014	1,684	0,569	1,07	0,86	0,511
Пропан	C ₃ H ₈	0,044	5	1570	0,015	1,764	0,542	1	0,81	0,459
Бутан	C ₄ H ₁₀	0,058	6,5	1580	0,015	2,325	0,425	0,833	0,75	0,323
Пентан	C ₅ H ₁₂	0,072	8	1675	0,016	2,887	0,331	0,718	0,68	0,236

Таблица 2

Теплофизические и гидродинамические параметры смесей горючих газов и воздуха на нижнем концентрационном пределе воспламенения (НКПВ)

Смесь воздуха с горючим газом	НКП В объемный	НКП В весовой	Теплоемкость, $\frac{Дж}{кг \cdot K}$	Теплопроводность, $\frac{Вт}{м \cdot K}$	Плотность, $\frac{кг}{м^3}$	Температуропроводность, $\frac{м^2}{с}, \times 10^5$	Динамическая вязкость, $Па \cdot с, \times 10^5$	Кинематическая вязкость, $м^2 / с, \times 10^5$
Водород	0.04	0.03	1046	0.031	1.118	2.628	1.843	1.641
Метан	0.05	0.055	1071	0.025	1.137	2.079	1.808	1.587
Ацетилен	0.025	0.044	1031	0.025	1.160	2.077	1.813	1.557
Этилен	0.027	0.06	1030	0.025	1.162	2.074	1.813	1.55
Этан	0.03	0.062	1048	0.025	1.164	2.037	1.798	1.532
Пропилен	0.022	0.061	1034	0.025	1.174	2.038	1.798	1.51
Пропан	0.021	0.069	1040	0.025	1.176	2.027	1.795	1.503
Бутан	0.018	0.018	1046	0.025	1.184	2.005	1.791	1.477
Пентан	0.014	0.066	1050	0.025	1.187	1.995	1.792	1.463

Таблица 3

Теплофизические и гидродинамические параметры смесей горючих газов и воздуха на верхнем концентрационном пределе воспламенения (ВКПВ)

Смесь воздуха с горючим газом	ВКП В объемный	ВКП В весовой	Теплоемкость, $\frac{Дж}{кг \cdot K}$	Теплопроводность, $\frac{Вт}{м \cdot K}$	Плотность, $\frac{кг}{м^3}$	Температуропроводность, $\frac{м^2}{с}, \times 10^5$	Динамическая вязкость, $Па \cdot с, \times 10^5$	Кинематическая вязкость, $м^2 / с, \times 10^5$
Водород	0.75	0.172	3275	0.132	0.321	12.558	1.72	5.216
Метан	0.15	0.164	1199	0.02	1.085	1.992	1.742	1.601
Ацетилен	0.1	0.167	1102	0.024	1.151	1.924	1.735	1.491
Этилен	0.32	0.511	1243	0.023	1.15	1.592	1.517	1.283
Этан	0.15	0.229	1165	0.024	1.169	1.781	1.643	1.366
Пропилен	0.11	0.265	1126	0.027	1.348	1.748	1.646	1.179
Пропан	0.095	0.243	11143	0.024	1.22	1.724	1.652	1.282
Бутан	0.091	0.272	1162	0.024	1.269	1.634	1.617	1.167
Пентан	0.35	0.294	1203	0.022	1.766	1.029	1.116	0.528

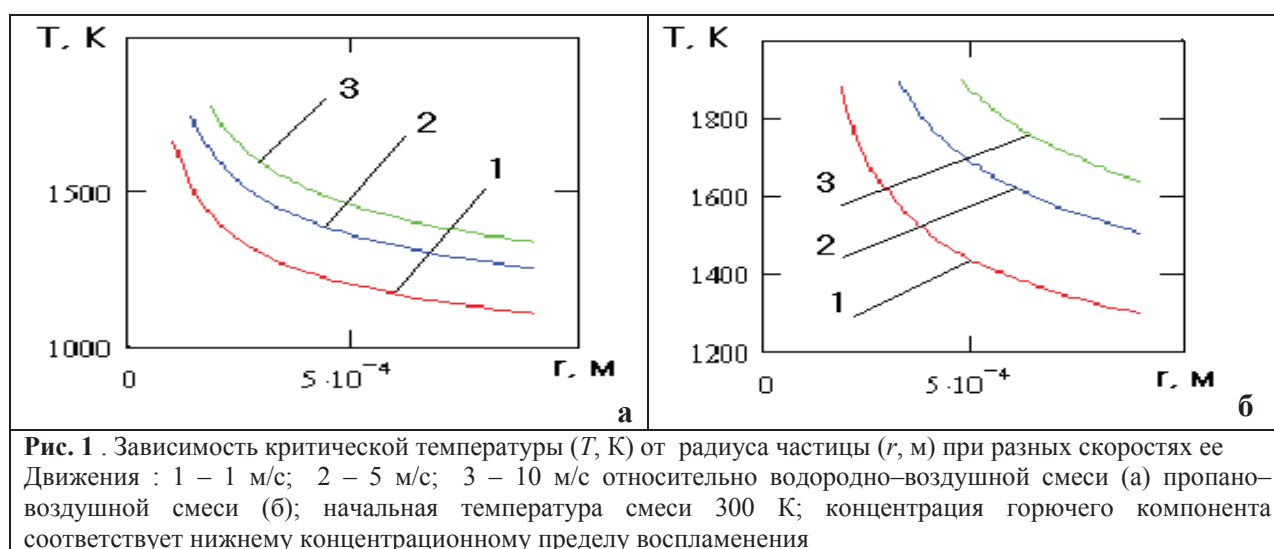
Таблица 4

Минимальная температура фрикционной искры для поджигания горючей смеси

Горючая смесь	Размер искры,	Скорость	Минимальная
---------------	---------------	----------	-------------

	мм	полета искры, м/с	температура искры для поджигания горючей смеси, К
водородно–воздушная	0,5	1	1196
пропано–воздушная	0,5	1	1431
водородно–воздушная	0,5	5	1357
пропано–воздушная	0,5	5	1681
водородно–воздушная	0,25	1	1339
пропано–воздушная	0,25	1	1679
водородно–воздушная	0,25	5	1527
пропано–воздушная	0,25	5	2097

На рисунке 1 показаны зависимости критической температуры от радиуса частицы при разных скоростях ее движения относительно водородно–воздушной смеси и пропано–воздушной смеси, рассчитанные для нижнего концентрационного предела воспламенения (НКПВ) (весовые концентрации водорода, пропана и кислорода $C_{H_2} = 0,003$; $C_{C_3H_8} = 0,061$ и $C_{O_2} = 0,23$ соответственно; мольные доли водорода и пропана 4 и 2,1 %). Как видно из приведенных графиков, для поджигания горючей смеси температура искры должна быть тем выше, чем меньше ее размер и больше скорость полета (таблица 4).



На основе рассмотренных соотношений может быть предложена следующая методика определения пожарной опасности фрикционных искр.

1. По известным значениям температуры искры (T_u , К), температуры смеси (T_c , К), теплоемкости смеси при постоянном давлении (c_{pc} , Дж/кг·К), стехиометрических коэффициентов реакции горения горючего компонента и окислителя (ν_z, ν_o), молекулярных весов горючего компонента и окислителя (M_z, M_o , кг/кмоль), безразмерных массовых концентраций горючего компонента и окислителя в невозмущенной смеси (C_{zn}, C_{on}), теплового эффекта реакции горения (Q , Дж/кг)

определяют безразмерные массовые концентрации горючего компонента C_{zu} и окислителя C_{ou} у поверхности фрикционной искры

$$C_{zu} = C_{zn} - c_{pc} \frac{(T_u - T_c)}{Q};$$

$$C_{ou} = C_{on} - c_{pc} \frac{v_o M_o (T_u - T_c)}{v_z M_z Q}.$$

2. По значениям плотности невозмущенной газовой смеси (ρ_n , кг/м³) находят плотность смеси у поверхности фрикционной искры

$$\rho_u = \rho_n \frac{T_n}{T_u}.$$

3. По значениям коэффициента теплопроводности невозмущенной газовой среды (λ_n , Вт/м·К) находят коэффициент теплопроводности смеси λ_u у поверхности фрикционной искры

$$\lambda_u = \lambda_n \left(\frac{T_u}{T_n} \right)^{0.77}.$$

4. По значениям коэффициента динамической вязкости невозмущенной смеси (μ_n , Па·с) находят коэффициент динамической вязкости смеси μ_u у поверхности фрикционной искры

$$\mu_u = \mu_n \left(\frac{T_u}{T_n} \right)^{0.69}.$$

5. Определяют коэффициент кинематической вязкости смеси (ν_u , м²/с) у поверхности фрикционной частицы

$$\nu_u = \frac{\mu_u}{\rho_u}.$$

6. Определяют коэффициент температуропроводности смеси a_u у поверхности фрикционной частицы

$$a_u = \frac{\lambda_u}{c_{pc} \rho_u}.$$

7. Вычисляют критерий Прандтля

$$Pr = \frac{\nu_u}{a_u}$$

8. Вычисляют безразмерный параметр K_u

$$K_u = k \left(\frac{\rho_u C_{zu}}{M_z} \right) \left(\frac{\rho_u C_{ou}}{M_o} \right),$$

где k – предэкспоненциальный множитель в уравнении для скорости реакции $\left(\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3}{\text{кмоль}^2 \cdot \text{с}} \right)$, который берется из справочных баз данных

9. По заданным значениям скорости полета искры (w , м/с) и ее температуры (T_u , К), рассчитывают критический радиус фрикционной искры $r_{кр.и}$, способной поджечь горючую смесь

$$r_{кр.и} = 0.25 A^{-2} \left(BC + (B^2 C^2 + 4AC)^{0.5} \right)^2,$$

где

$$A = \frac{1}{T_u} \sqrt{\frac{2QK_u E}{\lambda_u R}}; \quad B = 0,977 \cdot \left(\frac{w \rho_u}{\mu_u} \right)^{0.5} Pr^{0.414};$$

$$C = \frac{1}{\delta_n} - \frac{1}{\delta} + \frac{\delta}{\delta_n} \ln 4; \quad \delta = \frac{RT_u}{E}; \quad \delta_n = \frac{RT_n}{E};$$

E – энергия активации (Дж/кмоль); R – универсальная газовая постоянная ($R = 8314 \text{ Дж} / (\text{кмоль} \cdot \text{К})$).

10. Если для газовой смеси данного концентрационного состава и данной температуры фрикционная искра с данной температурой и скоростью полета имеет размеры меньше критического радиуса $r_{кр.и}$, то поджигания смеси не происходит и искра может считаться безопасной. При $r_u \geq r_{кр.и}$ искра может поджечь газовую смесь и должна считаться опасной.

Литература

- ГОСТ 12.1.004–91. ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.

2. Калинчак В.В., Михель Ю.М. Время зажигания газа фрикционной искрой // ИФЖ – 1986 – Т.51, №1, – С.114-116.
3. Розловский А.И. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами – М.: Химия,1980. – 376 с.
4. Иващенко П.Ф., Меньшаков В.А., Толчинский В.Н. Исследование механизма искрообразования и поджигающей способности фрикционных искр / Взрывобезопасность в строительстве. – М.: МИСИ, 1984. – С.34–43.
5. Зельдович Я.Б. К теории зажигания // Доклады АН СССР. – 1963. – Т.150, №2. – С.283–285.
6. Головин А.М. Зажигание горючей смеси медленно движущейся нагретой сферической частицей // Вестник МГУ, сер.1, Математика механика. – 1998. – № 6. – С.27–32.
7. Peters N. Premixed burning in diffusion flames – the flame zone model of Libbi and Ecomons // Int. J. Heat and Mass Transfer – 1999. – V.22, №5. – P.691–712.
8. Sharma O.P., Sirigano W.A. Ignition of stagnation point flow by a hot body combust / Sci. Tech. –1969. – V.1. – P.95.