

А. И. БЫКОВ, ведущий инженер по промышленной безопасности, ООО “Газпром трансгаз Ухта” (Россия, Республика Коми, 169300, г. Ухта, наб. Газовиков, 10/1; e-mail: abykov@sgp.gazprom.ru)

А. В. НОВАК, инженер учебно-научной лаборатории диагностики и неразрушающего контроля, Ухтинский государственный технический университет (Россия, Республика Коми, 169300, г. Ухта, ул. Первомайская, 13; e-mail: avnovak84@gmail.com)

УДК 658.382

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ЗОН ТЕРМИЧЕСКОГО ПОРАЖЕНИЯ ПРИ ПОЖАРЕ НА МАГИСТРАЛЬНОМ ГАЗОПРОВОДЕ

Показано, что при пожаре на магистральном газопроводе, наряду с параметрами массы газа, средних значений давления и температуры, характеризующих горение, необходимо установить предельные состояния термического воздействия на персонал. Проведен расчет геометрических размеров пламени пожара на магистральном газопроводе для двух сценариев: C_1 — пожар в котловане в виде вертикально горящего столба (колонный пожар); C_2 — две горящие струи газа, направленные от точки разрыва в противоположные стороны вдоль оси магистрального газопровода (струевые пламена). Показано, что термическое воздействие при пожаре на магистральном газопроводе может оцениваться с помощью твердотельных геометрических моделей в виде цилиндра (колонный пожар) и усеченных конусов (струевой пожар). Обоснованы границы опасности теплового влияния для построения модели зон термического поражения.

Ключевые слова: колонный тип горения; струевой тип горения; интенсивность теплового потока; “огненный шар”; коэффициенты облучения; геометрические размеры пламени.

DOI: 10.18322/PVB.2018.27.11.41-50

Введение

Расчет геометрических размеров пламени пожара на магистральном газопроводе (далее — МГ) проводится для двух сценариев: C_1 — пожар в котловане в виде вертикально горящего столба (колонный пожар); C_2 — две горящие струи газа, направленные от точки разрыва в противоположные стороны вдоль оси МГ (пожар струевого типа). Моделирование этих типов пожаров на основе твердотельных моделей в виде вертикального цилиндра для колонного пожара и двух симметрично разнонаправленных усеченных конусов, вершины которых приурочены к точке разрыва МГ для струевого пожара, рекомендовано в СТО Газпром 2-2.3-351–2009 [1] (далее — СТО Газпром). Однако системная методика оценки геометрии, размеров и термического поражения персонала в этом документе не приводится. Отсутствует такая методика и в других действующих нормативных документах, что и определяет актуальность настоящей работы.

Задачами работы являются: 1) обоснование методики оценки распределения интенсивности тепловых потоков на уровне земли для пожара колонного типа (сценарий C_1), вдоль лепестка модели струевого пожара (сценарий C_2) и поперек такого лепестка на основе гипотетического представления

о распределении массы горящего газа внутри усеченного конуса в виде сфер типа “огненный шар”; 2) обоснование методики графического построения зон термического поражения для сценариев C_1 и C_2 с выделением границ территорий безопасных, опасных и фатально непригодных для жизнедеятельности человека в окрестности горящего факела.

Для построения моделей зон термического поражения необходимо зафиксировать границы опасности теплового влияния. Так, по стандарту Американского нефтяного института API 521 уровень теплового потока $q = 9,46 \text{ кВт/м}^2$ для человека без специальной защиты является смертельным в первые же секунды воздействия, а уровень болевого порога (уровень безопасности) по российским нормам, установленный в Методике, утвержденной приказом МЧС РФ № 404 [2], составляет $q_x = 1,4 \text{ кВт/м}^2$.

Целью настоящей статьи является разработка методики построения моделей зон термического поражения при пожаре на МГ.

1. Модель пожара колонного типа

Для пожара колонного типа (сценарий C_1) форма зоны потенциального термического поражения представляется в виде круга с внешним радиусом $R_{1\%}$ условного поражения, равного 1 %, и внутренним ра-

Таблица 1. Распределение теплового потока на уровне поверхности земли при пожаре колонного типа (сценарий C_1)
Table 1. Heat flux distribution at ground level for column-type fire (scenario C_1)

Параметр Parameter	Значение параметра при X , м / Parameter value at X , m											
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1200	1300
φ_x	1,09	0,373	0,150	0,072	0,038	0,022	0,013	0,008	0,005	0,003	0,001	0,000
v_x	0,694	0,658	0,637	0,628	0,611	0,601	0,593	0,586	0,580	0,574	0,565	
q_x , кВт/м ² q_x , kW/m ²	128,6	41,7	16,2	7,5	3,9	2,25	1,31	0,8	0,5	0,3	0,1	

диусом $R_{100\%}$, соответствующим 100 %-ному условному поражению.

Построение модели зоны термического поражения основано на распределении теплового потока в окрестности горящего пламени и включает определение:

- 1) среднеповерхностной интенсивности теплового излучения пламени E_f (кВт/м²) (в рассматриваемом примере для колонного пожара $E_f \leq 170$ кВт/м²):

$$E_f = Q_{\text{изл}} / S_{\text{ф}}; \quad (1)$$

- 2) коэффициента поглощения теплового потока в атмосфере v_x :

$$v_x = 1,033 + w(0,66w - 0,18) - 0,12 \lg X; \quad (2)$$

- 3) углового коэффициента облучения φ_x :

$$\varphi_x = \frac{R_{\text{эф}}^2 X [1 + (1,7 \exp(0,0022X) \cos^2 \alpha)]}{(R_{\text{эф}}^2 + X^2)^{1,5}} \times [0,0937(\ln X)^2 - 2,29 \ln X + 11,7]; \quad (3)$$

- 4) интенсивности теплового потока q_x (кВт/м²):

$$q_x = E_f v_x \varphi_x, \quad (4)$$

где $Q_{\text{изл}}$ — поток теплового излучения, определяемый как часть общего тепловыделения, кВт;
 $S_{\text{ф}}$ — площадь излучающей поверхности, м²;
 w — относительная влажность, доли ед.;
 X — расстояние от источника горения до облучаемого объекта, м;

$R_{\text{эф}}$ — эффективный радиус пламени, м;
 α — угол наклона оси пламени к горизонту, град.
 Расчеты выполнялись при следующих условиях:

- угол наклона столба пожара к горизонту $\alpha = 90^\circ$ (столб пламени вертикальный);
- эффективный радиус $R_{\text{эф}}^{C_1}$ принимается из выражения

$$R_{\text{эф}}^{C_1} = 0,25 L_{\text{ф}}^{C_1} = 0,25 \cdot 386,41 = 96,6 \text{ м}, \quad (5)$$

где $L_{\text{ф}}^{C_1}$ — длина модели факельного пламени, м;

- среднеповерхностная интенсивность теплового излучения $E_f = 170$ кВт/м² в соответствии с условием, указанным в СТО Газпром [1].

Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, расчет теплового потока можно проводить с любым шагом, что позволяет выявить границы опасности для различных зон теплового влияния [4–9]. Руководствуясь граничными значениями опасности термического поражения ($q \leq 1,4$ кВт/м² — безопасно, $q \geq 9,46$ кВт/м² — смертельно) из табл. 1 и применяя линейную интерполяцию, нетрудно установить, что граница 100 %-ного термического поражения человека в рассматриваемом примере расположена на расстоянии $R_{100\%} = 375$ м, а граница безопасности (вероятность поражения не более 1 %) — на расстоянии $R_{1\%} = 690$ м по горизонтали от центра очага горения до объекта облучения на поверхности земли. Схематично это отражено на рис. 1, на котором модель пожара колонного типа представлена в виде твердотельного цилиндра и зоны потенциального поражения (ЗПП) тепловым излучением, характеризующейся круговыми границами со 100 %-ным (при $q = 9,46$ кВт/м²) и 1 %-ным (при $q = 1,4$ кВт/м²) уровнями летальной опасности [10, 11].

Для оценки достоверности полученных результатов сравним их с расчетами возможных радиусов термического поражения человека, выполненными для вероятных пожаров на магистральных газопроводах Курской обл., на территории которой расположены четыре газопроводных магистрали диаметром $D_y = 1400$ мм с рабочим давлением $P_p = 7,5$ МПа (согласно схеме территориального планирования Курской обл. на <http://www.poiroz.ru>).

Результаты этих расчетов приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, для колонного пожара при рекомендуемом времени [1] $t_{\text{рек}} = 60$ с возможный радиус термического поражения при вероятных пожарах на магистральных газопроводах Курской обл. по прогнозу МЧС РФ составляет $R_{п 1\%} = 687$ м, при этом зона 100 %-ного смертельного поражения распространяется на расстояние $R_{п 100\%} = 379$ м от центра очага горения. Те же показатели, полученные по предлагаемой расчетной методике, составляют соответственно $R_{п 1\%} = 690$ м и $R_{п 100\%} = 375$ м.

Такая достаточно тесная сходимость позволяет рекомендовать разработанный подход для оперативной оценки зон термического поражения людей

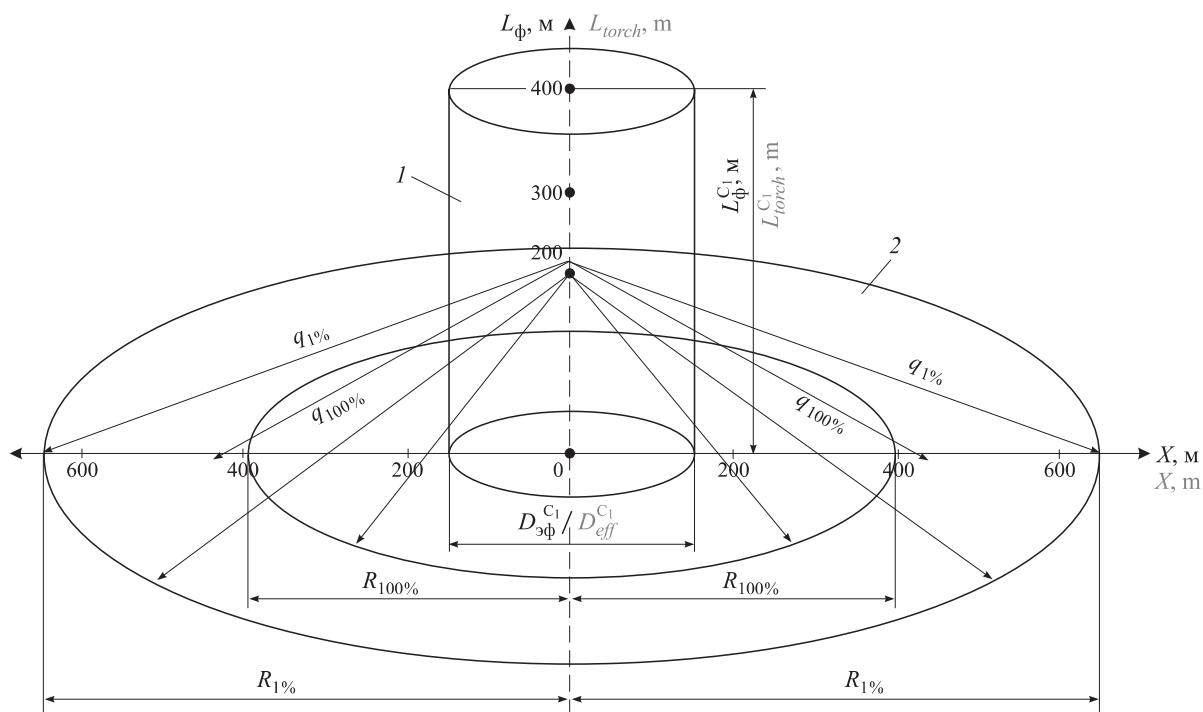


Рис. 1. Модель пожара колонного типа (сценарий C_1): 1 — модель факела (твердотельный цилиндр); 2 — зона термического поражения; $D_{\text{эф}}^{C_1}$ — эффективный диаметр модели факела

Fig. 1. Model of column type fire (scenario C_1): 1 — model of the torch (solid-state cylinder); 2 — heat affected zone; $D_{\text{eff}}^{C_1}$ — the effective diameter of the model of the torch

Таблица 2. Возможные радиусы термического поражения человека при пожаре на МГ Курской обл.

Table 2. Possible radii of thermal damage of the person at the fire on main gas pipeline of Kursk Region

№ п/п No.	Время нахождения в зоне пожара, с Time spent in the fire zone, sec	Радиус поражения $R_{\text{п}}$, м, при типе пожара Radius of thermal damage R_{dam} , m, at fire type			
		колонном column		струевом jet	
		$R_{\text{п}} 100\%$ $R_{\text{dam}} 100\%$	$R_{\text{п}} 1\%$ $R_{\text{dam}} 1\%$	$R_{\text{п}} 100\%$ $R_{\text{dam}} 100\%$	$R_{\text{п}} 1\%$ $R_{\text{dam}} 1\%$
1	5	306	566	690	1200
2	20	354	654	1060	1360
3	60	379	687	1114	1420

при пожарах колонного типа на магистральных газопроводах [12, 13].

Этот же методический подход предлагается использовать для определения зон термического поражения в случае струевого типа пожара.

2. Модель пожара струевого типа

Модель пожара струевого типа (сценарий C_2) в виде двух противоположно направленных твердотельных усеченных конусов, вершины которых приурочены к точке разрыва газопровода, а их образующие совпадают с плоскостью поверхности земли, представлена на рис. 2,а, а ее горизонтальная проекция в форме двулестковой фигуры — на рис. 2,б.

В силу этой особенности расчет распределения теплового потока следует выполнять для каждого лепестка модели вдоль и поперек оси его простираения [14, 15].

А. Распределение теплового потока вдоль оси лепестка модели струевого пламени

Для рассматриваемого примера по аналогии с предыдущим расчетом задаются значениями эффективного радиуса $R_{\text{эф}}^{C_2(i)}$ ($i = 1, 2$) для каждого лепестка струевого пламени исходя из рекомендаций СТО Газпром [1]:

$$R_{\text{эф}(1)}^{C_2} = 0,25 L_{\text{ф}}^{C_2} = 0,25 \cdot 450,92 = 112,73 \text{ м};$$

$$R_{\text{эф}(2)}^{C_2} = 0,25 L_{\text{ф}}^{C_2} = 0,25 \cdot 430,43 = 107,61 \text{ м},$$

где $L_{\text{ф}}^{C_2}$ — общая длина пламени, м.

С учетом симметричности горения струевого пламени расчет распределения интенсивности теплового потока выполняется для одного лепестка модели с наибольшим радиусом $R_{\text{эф}(1)}^{C_2} = 112,73 \text{ м}$.

Далее с учетом угла наклона α оси усеченного конуса к горизонту рассчитывается распределение интенсивности теплового потока q_x на уровне поверхности земли аналогично тому, как это делается для колонного пожара. При этом ось усеченного конуса будет иметь наклон к горизонту под углом α (см. рис. 2,а), тангенс которого определяется по формуле

$$\text{tg } \alpha = 0,5 W_{2(1)} / L_{\text{ф}(1)}^{C_2}. \quad (6)$$

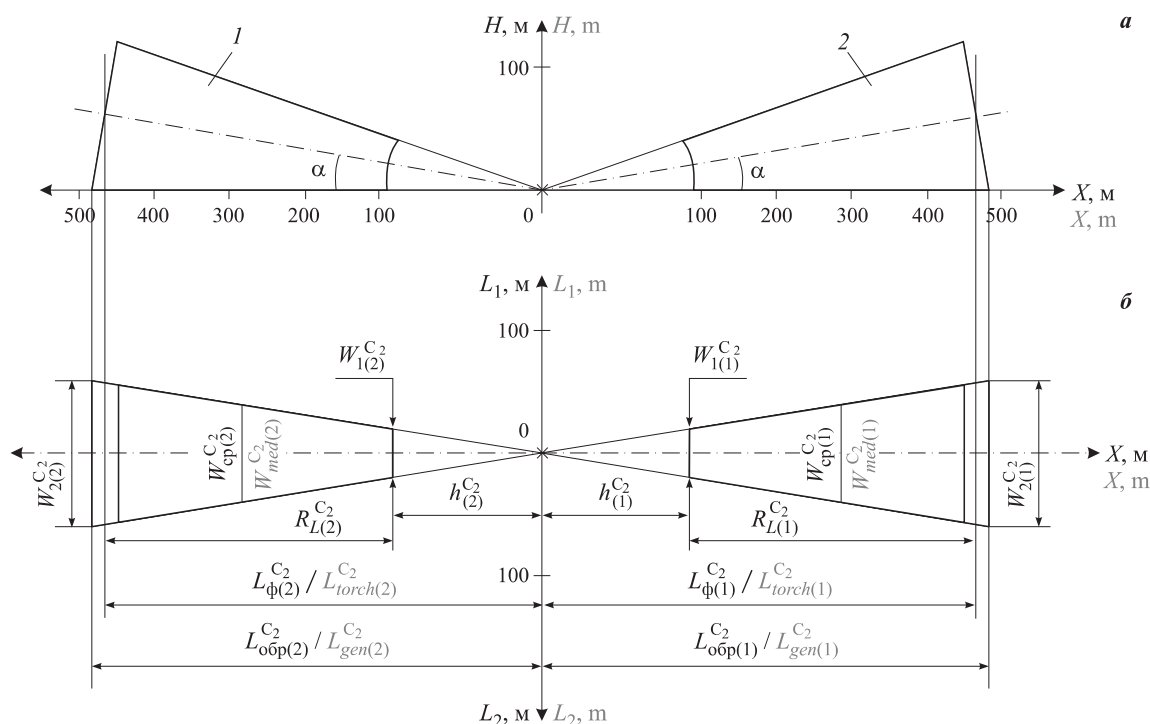


Рис. 2. Модель пожара струевого типа (сценарий C_2): $a, б$ — вертикальная и горизонтальная проекции модели; 1, 2 — модели усеченных конусов 1-й и 2-й струй пожара; (1), (2) — номера факельных струй; W_1, W_2, W_{cp} — ширина соответственно малого, большого и среднего оснований усеченных конусов; h — длина отрыва пламени; R_L — видимая длина пламени; $L_{обр}^{C_2}$ — длина образующей; 0 — точка разрыва газопровода

Fig. 2. Jet type fire model: $a, б$ — vertical and horizontal projection of the model; 1, 2 — models of truncated cones of the 1st and 2nd jets of fire; (1), (2) — numbers of flare jets; W_1, W_2, W_{med} — the width of small, large and medium bases of truncated cones; h — length of separation of the flame; R_L — visible length of the flame; $L_{gen}^{C_2}$ — the length of the generatrix; 0 — break point of the pipeline

Для рассматриваемого случая

$$\operatorname{tg} \alpha = 0,5 \cdot 117,24 / 450,92 = 0,13.$$

Отсюда $\alpha = 7,4^\circ$.

Затем с использованием полученного значения α определяются:

- среднеповерхностная интенсивность теплового излучения E_f (кВт/м²) — по формуле (1) (для струевого пожара в рассматриваемом примере $E_f \leq 200$ кВт/м²);
- коэффициенты поглощения теплового излучения v_x — по формуле (2);
- угловые коэффициенты облучения φ_x — по формуле (3);
- интенсивность теплового потока q_x — по формуле (4).

Распределение интенсивности теплового потока вдоль оси простирания лепестка модели представлено в табл. 3.

Анализ табл. 3 показывает, что в рассматриваемом примере продольная зона опасного термического воздействия с вероятностью граничного поражения 1 % (при $q = 1,4$ кВт/м²) простирается на расстояние $R_{1\%}^{C_2} = 1355$ м от точки разрыва газопровода. Полученное значение эффективного радиуса по сравнению с прогнозом МЧС РФ для Курской обл. ($R_{1\%}^{C_2} = 1420$ м), выполненным для аналогичных условий (см. табл. 2), отличается менее чем на 5 %, что можно признать удовлетворительным для теплотехнических прогнозов [16, 17].

Однако распределение интенсивности теплового потока вдоль оси струевого пламени определяет

Таблица 3. Распределение интенсивности теплового потока вдоль оси простирания лепестка модели струевого пламени (сценарий C_2) / **Table 3.** Intensity of heat flux distribution along the axis of the blade strike of the jet flame model (scenario C_2)

Параметр Parameter	Значение параметра при X , м / Parameter value at X , m															
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	
v_x	3,6	1,7	0,8	0,5	0,3	0,2	0,16	0,12	0,09	0,07	0,05	0,04	0,02	0,005	—	
φ_x	0,694	0,658	0,637	0,622	0,611	0,601	0,593	0,586	0,580	0,574	0,570	0,565	0,561	0,557	0,553	
q_x , кВт/м ² q_x , kW/m ²	505,2	221,1	107,0	59,7	37,9	26,4	19,0	14,1	10,4	8,0	5,7	4,1	2,35	0,56	—	

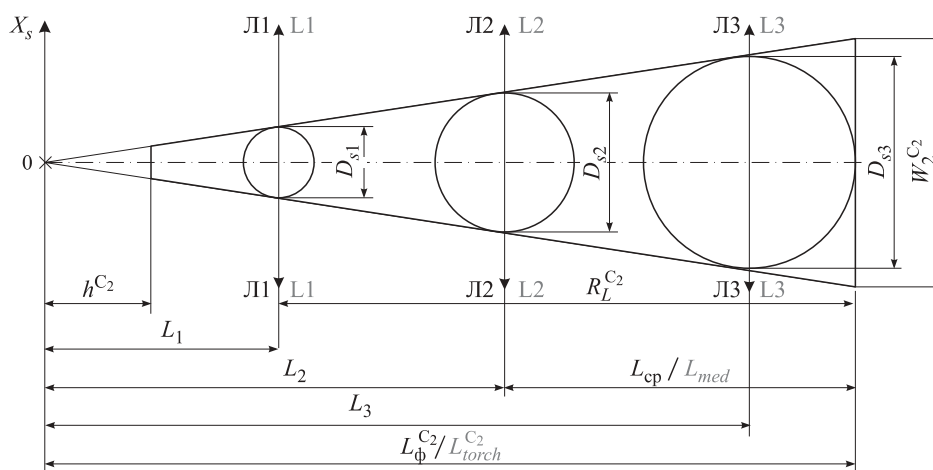


Рис. 3. Модель усеченного конуса с вписанными сферами “огненный шар”

Fig. 3. Model of a truncated cone with inscribed spheres “fireball”

только линейную координату положения точки облучения относительно точки воспламенения. Для определения границ зоны потенциального термического воздействия необходимо оценить тепловые потоки, направленные перпендикулярно оси горения струевого пламени.

Б. Распределение теплового потока поперек оси лепестка модели струевого пламени

Для решения этой задачи предлагается принять следующие допущения.

Положим, что масса горящего газа, заключенная в модели усеченного конуса, сосредоточена пропорционально в нескольких (например, в трех) шаровых сферах, вписанных в лепесток модели конуса с касанием большого основания, в сечении средней линии и вблизи малого основания. Модель усеченного конуса с вписанными сферами представлена на рис. 3.

При этом диаметр вписанного шара D_{s3} у большого основания модели усеченного конуса можно определить из геометрических построений:

$$D_{s3} = W_2^{C2} \operatorname{tg}(45 - \alpha/2), \quad (7)$$

где α — угол между образующей и осью модели конуса.

Для рассматриваемого примера угол α составляет $7,4^\circ$ (см. рис. 2). Подставив это значение в уравнение (7), получим:

$$D_{s3} = 117,24 \operatorname{tg}(45 - 7,4/2) = 103 \text{ м.}$$

Диаметры вписанных шаров средней линии D_{s2} и вблизи малого основания модели D_{s1} определяются из уравнений подобия:

$$D_{s1} = D_{s3} L_1 / L_3; \quad (8)$$

$$D_{s2} = D_{s3} L_2 / L_3, \quad (9)$$

где L_1 — расстояние от точки разрыва 0 до сечения D_{s1} ; принимается произвольно из условия $L_1 > h^{C2}$; L_2 — то же, до среднего сечения D_{s2} ; $L_3 = L_{\phi}^{C2} - R_L^{C2}/2$;

L_3 — то же, до сечения D_{s3} ; $L_3 = L_{\phi}^{C2} - D_{s3}/2$.

Для рассматриваемого примера

$$L_1 = 120 \text{ м} > h^{C2} = 90,18 \text{ м};$$

$$L_2 = 450,92 - 360,74/2 = 270,55 \text{ м};$$

$$L_3 = 450,92 - 103/2 = 399,42 \text{ м.}$$

Подставив эти значения в формулы (8) и (9), получим:

$$D_{s2} = 103 \cdot 270,55/399,42 = 69,77 \text{ м};$$

$$D_{s1} = 103 \cdot 120/399,42 = 30,94 \text{ м.}$$

Каждая из вписанных сфер принимается за “огненный шар”, тепловое излучение которого направлено по лучам Л1, Л2 и Л3, проведенным через проекции диаметров этих сфер на горизонтальную плоскость (см. рис. 3).

В этом случае интенсивность теплового излучения q_s (кВт/м²) для “огненного шара” определяется по Методике [2] в соответствии с п. 24 приложения 3 из выражения (П3.52):

$$q_s = E_s v_s \phi_s, \quad (10)$$

где E_s — среднеповерхностная интенсивность теплового излучения “огненного шара”, кВт/м²; v_s — коэффициент пропускания атмосферы; ϕ_s — угловой коэффициент облучения.

Значение E_s для “огненного шара” в соответствии с рекомендациями п. 24 Методики [2] и ГОСТ 12.3.047–2012 принимается на основе имеющихся экспериментальных данных или равным 350 кВт/м². Однако методика проведения экспериментов по определению среднеповерхностной интенсивности излучения “огненных шаров” с горящим сжатым природным газом в нормативных документах отсутствует. В рассматриваемом примере параметр E_s для обеих струй горения газа имеет следующие расчетные значения:

$$E_{f(1)}^{C2} = 319,96 \text{ кВт/м}^2 < 350 \text{ кВт/м}^2;$$

$$E_{f(2)}^{C2} = 312,82 \text{ кВт/м}^2 < 350 \text{ кВт/м}^2.$$

В соответствии с принятым допущением о пропорциональности распределения лучистой энергии в объемах трех вписанных сфер интенсивность сред-
неповерхностного излучения каждой из них $E_{s(i)}$ ($i = 1, 2, 3$) может быть определена из уравнения про-
порциональности:

$$E_{s(i)} = V_{s(i)} E_{f(1)}^{C_2} / V_M, \quad (11)$$

где $V_{s(i)}$ ($i = 1, 2, 3$) — объем каждого из вписанных “огненных шаров”, м^3 ;

V_M — объем модели усеченного конуса, м^3 .

Объем для каждого из вписанных “огненных шаров” определяется по формуле [3]:

$$V_{s(i)} = \frac{\pi D_{s(i)}^3}{6} = 0,524 D_{s(i)}^3. \quad (12)$$

Для рассматриваемого примера:

$$V_{s(1)} = 0,524 \cdot 30,94^3 = 0,0155 \cdot 10^6 \text{ м}^3;$$

$$V_{s(2)} = 0,524 \cdot 69,77^3 = 0,1780 \cdot 10^6 \text{ м}^3;$$

$$V_{s(3)} = 0,524 \cdot 103^3 = 0,5726 \cdot 10^6 \text{ м}^3.$$

Объем модели усеченного конуса определяется из стандартного выражения:

$$V_M = \frac{\pi R_L^{C_2}}{3} \left[\left(\frac{W_1^{C_2}}{2} \right)^2 + \frac{W_1^{C_2}}{2} \frac{W_2^{C_2}}{2} \left(\frac{W_2^{C_2}}{2} \right)^2 \right]. \quad (13)$$

Для рассматриваемого примера объем модели усеченного конуса составит:

$$V_M = \frac{3,14 \cdot 360,74}{3} \left[\left(\frac{23,45}{2} \right)^2 + \frac{23,45}{2} \frac{117,24}{2} \left(\frac{117,24}{2} \right)^2 \right] = 1,61 \cdot 10^6 \text{ м}.$$

Тогда условные значения среднеповерхностного излучения $E_{s(i)}$ для каждого из вписанных “огненных шаров” составят:

$$E_{s(1)} = \frac{0,0155 \cdot 10^6 \cdot 319,96}{1,61 \cdot 10^6} = 3,08 \text{ кВт/м}^2;$$

$$E_{s(2)} = \frac{0,1780 \cdot 10^6 \cdot 319,96}{1,61 \cdot 10^6} = 35,37 \text{ кВт/м}^2;$$

$$E_{s(3)} = \frac{0,5726 \cdot 10^6 \cdot 319,96}{1,61 \cdot 10^6} = 113,79 \text{ кВт/м}^2.$$

Далее в соответствии с п. 24 Методики МЧС РФ [2] определяются значения интенсивности тепло-
вого излучения $q_s(X_s)$ из выражения (10) с одновре-
менным расчетом коэффициентов:

- облучения $\varphi_s(X_s)$:

$$\varphi_s(X_s) = \frac{1}{4 [1 + (X_s/D_s)^2]^{1,5}}; \quad (14)$$

- пропускания атмосферы $v_s(X_s)$:

$$v_s(X_s) = \exp \left[-7 \cdot 10^4 \left(\sqrt{X_s^2 + H_s^2} - H_s \right) \right], \quad (15)$$

где X_s — расстояние от облучаемого объекта до точ-
ки на поверхности земли непосредственно под
центром “огненного шара”, м;

H_s — высота центра “огненного шара”, м; $H_s = D_s/2$.

Таблица 4. Результаты расчета интенсивности теплового излучения $q_s(X_s)$ вписанных в модель “огненных шаров”

Table 4. Results of calculation of heat flows $q_s(X_s)$ inscribed in the model of “fireballs”

Параметр Parameter	Значение параметра при X_s , м / Parameter value at X_s , m										
	20	50	75	100	125	150	200	220	240	260	280
$E_{s1} = 3,08 \text{ кВт/м}^2$; $H_{s1} = 15,47 \text{ м}$; $D_{s1} = 30,94 \text{ м}$ / $E_{s1} = 3.08 \text{ kW/m}^2$; $H_{s1} = 15.47 \text{ m}$; $D_{s1} = 30.94 \text{ m}$											
Луч 1 / Beam 1											
$v_{s1}(X_s)$	0,99	0,97	0,96	0,94	0,93	0,91					
$\varphi_{s1}(X_s)$	0,15	0,04	0,014	0,006	0,003	0,002					
$q_{s1}(X_s)$	0,46	0,12	0,04	0,02	0,009	0,006					
$E_{s2} = 35,37 \text{ кВт/м}^2$; $H_{s2} = 34,89 \text{ м}$; $D_{s2} = 69,77 \text{ м}$ / $E_{s2} = 35.37 \text{ kW/m}^2$; $H_{s2} = 34.89 \text{ m}$; $D_{s2} = 69.77 \text{ m}$											
Луч 2 / Beam 2											
$v_{s2}(X_s)$	0,99	0,98	0,97	0,95	0,94						
$\varphi_{s2}(X_s)$	0,22	0,13	0,08	0,05	0,029						
$q_{s2}(X_s)$	7,83	4,50	2,74	1,68	0,93						
$E_{s3} = 113,79 \text{ кВт/м}^2$; $H_{s3} = 51,5 \text{ м}$; $D_{s3} = 103,0 \text{ м}$ / $E_{s3} = 113.79 \text{ kW/m}^2$; $H_{s3} = 51.5 \text{ m}$; $D_{s3} = 103.0 \text{ m}$											
Луч 3 / Beam 3											
$v_{s3}(X_s)$	1,0	0,99	0,97	0,96	0,94	0,93	0,90	0,89	0,87	0,86	0,84
$\varphi_{s3}(X_s)$	0,24	0,18	0,13	0,09	0,06	0,05	0,024	0,019	0,015	0,012	0,010
$q_{s3}(X_s)$	27,29	20,26	14,13	9,82	6,41	5,29	2,46	1,92	1,48	1,17	0,95

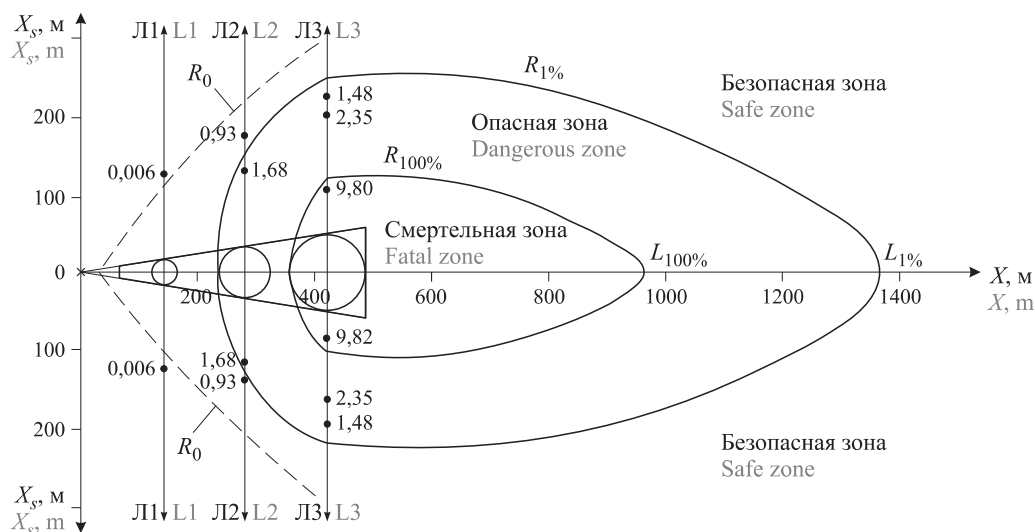


Рис. 4. Распределение теплового потока на горизонтальную плоскость при струевом типе пожара для одной струи горения: R_0 — граница теплового влияния (безопасная зона); $R_{1\%}$, $R_{100\%}$ — границы 1 %-ного поражения ($q = 1,4 \text{ кВт/м}^2$, опасная зона); 100 %-ного поражения ($q = 9,46 \text{ кВт/м}^2$, зона смертельного поражения); $L_{1\%}$, $L_{100\%}$ — координаты продольных длин участков соответственно с 1 %-ным ($q = 1,4 \text{ кВт/м}^2$) и 100 %-ным ($q = 9,46 \text{ кВт/м}^2$) термическим поражением; на лучах Л1, Л2 и Л3 — значения интенсивности теплового излучения, кВт/м^2 , в точках X_s

Fig. 4. The distribution of heat flow to the horizontal plane at the jet type of fire for one jet of combustion: R_0 — the boundary of the thermal effect (safe zone); $R_{1\%}$ — the boundary of 1 % damage ($q = 1,4 \text{ кВт/м}^2$, dangerous zone); $R_{100\%}$ — the boundary of 100 % damage ($q = 9,46 \text{ кВт/м}^2$, fatal zone); $L_{1\%}$, $L_{100\%}$ — the coordinates of the longitudinal lengths of the plots, respectively, with 1 % ($q = 1,4 \text{ кВт/м}^2$) and 100 % thermal damage ($q = 9,46 \text{ кВт/м}^2$); on beams L1, L2 and L3 — values of thermal radiation intensity, кВт/м^2 , at points X_s

Результаты расчетов представлены в табл. 4.

Графический вид распределения теплового потока на горизонтальную плоскость при струевом типе пожара для одной струи горения представлен на рис. 4 (для противоположной струи горения графическое распределение теплового потока является аналогичным и размещается симметрично). Как видно из рис. 4, для струевого пожара (сценарий C_2) форма зоны потенциального поражения тепловым излучением представляется в виде лепестков. Внешняя граница лепестков определяется длиной $L_{1\%}$ продольной оси, ограниченной изолинией $R_{1\%}$ условного поражения, равного 1 %, и внутренним размером $L_{100\%}$ по изолинии $R_{100\%}$ условного поражения, равного 100 %, а также полушириной лепестков, образованных изолиниями $R_{1\%}$ и $R_{100\%}$ вероятности поражения, равной соответственно 1 и 100 % [18–21].

В рассматриваемом примере параметры полуширины лепестка с изолиниями $R_{1\%}$ и $R_{100\%}$ приурочены к лучу Л3 и составляют в линейном измерении соответственно $L_{31\%} = 245 \text{ м}$ и $L_{3100\%} = 106 \text{ м}$. Эти координаты полностью определяют территориальные размеры зон термического поражения с опасным ($L_{31\%}$) и смертельным ($L_{3100\%}$) исходом при горении струевых пламен (см. рис. 4). При этом луч Л2 определяет границу только 1 %-ной вероятности поражения — $L_{21\%} = 110 \text{ м}$, а в направлении луча Л1 фиксируется лишь незначительное тепловое влияние, исходящее от малого гипотетического “огненного шара”.

Как показывает анализ полученных результатов, преобладающая роль в определении территориальных размеров зон термического поражения принадлежит наибольшему гипотетическому “огненному шару”, приуроченному к большему основанию усеченного конуса, представляющего собой твердотельную модель струевого пламени.

В заключение следует отметить, что представленная методика построения моделей зон термического поражения при пожаре на МГ использована для разработки программного продукта “Экспертная система «Аналитик пожаров»”, позволяющего осуществлять текущий мониторинг уровня потенциального пожарного риска эксплуатируемого МГ.

Выводы

Таким образом, исходя из поставленной цели в настоящей статье приведена методика построения моделей зон термического поражения при пожаре на МГ для двух видов сценариев.

1. Предложена методика геометрического построения (в виде модели твердотельного цилиндра) зоны термического поражения при колонном типе пожара (сценарий C_1) на магистральном газопроводе, образующем круговую проекцию на поверхности ландшафта с радиальным распространением теплового потока от центра очага горения к внешней границе зоны.

2. Разработан способ построения зон термического поражения при струевом пожаре (сценарий

C₂) на магистральном газопроводе, основанный на гипотетическом допущении концентрации лучистой энергии в виде “огненных шаров”, размещен-

ных равномерно в границах усеченного конуса, представляющего собой твердотельную модель струевого пламени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СТО Газпром 2-2.3-351–2009. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО “Газпром”: распоряжение ОАО “Газпром” № 83 от 30.03.2009; введ. 30.12.2009. — М.: ООО “Газпром Экспо”, 2009. — 377 с.
2. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах: приказ МЧС РФ от 10.07.2009 № 404 (ред. от 14.12.2010). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902170886> (дата обращения: 18.10.2018).
3. Корн Г. А., Корн Т. М. Справочник по математике для научных работников и инженеров: определения, теоремы, формулы / Пер. с англ. — 5-е изд. — М.: Наука, 1984. — 831 с.
4. Белицкий В. Д., Ломов С. М. Проектирование и эксплуатация магистральных газопроводов. — Омск: ОмГТУ, 2011. — 62 с.
5. Брушлинский Н. Н., Глуховенко Ю. М., Коробко В. Б., Соколов С. В., Вагнер П., Лупанов С. А., Клепко Е. А. Пожарные риски. Вып 3. Прогнозирование динамики пожарных рисков / Под ред. Н. Н. Брушлинского. — М.: ФГУ ВНИИПО, 2005. — 64 с.
6. Бухмиров В. В. Расчет коэффициента теплоотдачи: учебное пособие для вузов. — Иваново: Ивановский гос. энергетический ун-т, 2007. — 78 с.
7. Быков А. И. Определение параметра среднего давления газа на участке магистрального газопровода // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2015. — Т. 24, № 1. — С. 49–54.
8. Быков А. И. Определение средней температуры газа на аварийном участке магистрального газопровода // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2015. — Т. 24, № 6. — С. 43–50.
9. Быков А. И. Методика оценки массы природного газа, участвующего в образовании огненного факела при разрыве магистрального газопровода // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2015. — Т. 24, № 9. — С. 48–54. DOI: 18322/PVB.2015.24.09.48-54.
10. Быков А. И. Оценка пожарной опасности газотранспортных объектов // Газовая промышленность. — 2013. — № 10(697). — С. 69–71.
11. Дектерев А. А., Гаврилов А. А., Литвинцев К. Ю., Амельчугов С. П., Серегин С. Н. Моделирование динамики пожаров в спортивных сооружениях // Пожарная безопасность. — 2007. — № 4. — С. 49–58.
12. Закиров А. М. Количественная оценка опасности поражения человека тепловым излучением при пожарах на химических и нефтехимических предприятиях: дис. ... канд. техн. наук. — Казань, 2011. — 105 с.
13. Цхадая Н. Д., Быков А. И. Методика определения величины радиационного теплового потока при пожаре на магистральном газопроводе // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. — 2017. — № 4. — С. 39–41.
14. Bohl D., Jackson G. Experimental study of the spill and vaporization of a volatile liquid // Journal of Hazardous Materials. — 2007. — Vol. 140, Issue 1-2. — P. 117–128. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.06.076.
15. Yang D., Li Z. P., Hong O. Y. Effects of humidity, temperature and slow oxidation reactions on the occurrence of gasoline-air explosions // Journal of Fire Protection Engineering. — 2013. — Vol. 23, No. 3. — P. 226–238. DOI: 10.1177/1042391513486464.
16. Wong W. C.-K., Dembsey N. A., Alston J., Lautenberger C. A multi-component dataset framework for validation of CFD flame spread models // Journal of Fire Protection Engineering. — 2013. — Vol. 23, No. 2. — P. 85–134. DOI: 10.1177/1042391512472087.
17. Zhai L., Li J. Correlation and difference between stoll criterion and damage integral model for burn evaluation of thermal protective clothing // Fire Safety Journal. — 2016. — Vol. 86, No. 2. — P. 120–125. DOI: 10.1016/j.firesaf.2016.10.007.
18. Rajendram A., Khan F., Garaniya V. Modelling of fire risks in an offshore facility // Fire Safety Journal. — 2015. — Vol. 71, No. 1. — P. 79–85. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.11.019.
19. Lau C. K., Lai K. K., Lee Y. P., Du J. Fire risk assessment with scoring system, using the support vector machine approach // Fire Safety Journal. — 2015. — Vol. 78, No. 8. — P. 188–195. DOI: 10.1016/j.firesaf.2015.10.003.
20. Zhen Y., Wang Z., Wang J., Wang C., Cui Y. Experimental and numerical study on connecting pipe and vessel size effects on methane-air explosions in interconnected vessels // Journal of Fire Sciences. — 2018. — Vol. 36, No. 3. — P. 164–180. DOI: 10.1177/0734904118760165.

21. Troitzsch J. H. Fires, statistics, ignition sources, and passive fire protection measures // Journal of Fire Sciences. — 2016. — Vol. 34, No. 3. — P. 171–198. DOI: 10.1177/0734904116636642.

Материал поступил в редакцию 20 октября 2018 г.

Для цитирования: Быков А. И., Новак А. В. Методика построения моделей зон термического поражения при пожаре на магистральном газопроводе // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2018. — Т. 27, № 11. — С. 41–50. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.11.41-50.

English

TECHNIQUE OF BUILDING MODELS OF THE HEAT AFFECTED ZONES IN THE FIRE ON THE MAIN GAS PIPELINE

A. I. BYKOV, Lead Engineer for Industrial Safety of LLC “Gazprom transgaz Ukhta” (Embankment Gazovikov, 10/1, Ukhta, 169300, Komi Republic, Russian Federation; e-mail: abykov@sgp.gazprom.ru)

A. V. NOVAK, Engineer of Educational and Scientific Laboratory of Diagnostics and Nondestructive Testing, Ukhta State Technical University (Pervomayskaya St., 13, Ukhta, 169300, Komi Republic, Russian Federation; e-mail: avnovak84@gmail.com)

ABSTRACT

Introduction. It is known that the calculation of the parameters of uncontrolled combustion is very difficult because of its spontaneity and disordered forms. Therefore, they resort to the modeling of combustion on the basis of known geometric shapes. For example, for a strait fire the burning area is modeled in the form of a rectangle, when burning a torch — in the form of a circle, when igniting a tank with LVZh, GZh or LNG — in the form of a “fireball”, etc.

Methodology. Models of the fire to the main gas pipeline (MG) in accordance with the recommendations of STO Gazprom 2-2.3-351–2009 is a vertical solid cylinder to fire column type (scenario C_1) and two against solid-opalone directed truncated cones for jet-type combustion (scenario C_2). However, there are no systematic methods of quantitative assessment of the intensity of thermal effects and geometric construction of heat affected zones in case of fires at MG in the existing regulations. This gap explains the relevance of this article, which presents methods for determining the emissivity of heat fluxes at ground level for fires scenarios C_1 and C_2 and justified methods of geometric construction of zones of thermal danger in the vicinity of the burning flame column or two oppositely directed burning jets. A numerical example of the calculation of thermal parameters for the construction of geometric shapes of heat affected zones is given and the illustrations of their graphical execution are presented.

Conclusion. The method of construction of models of heat affected zones is put in the subsequent basis for the development of the software product “Expert system “Fire Analyst”, which provides operational monitoring of the level of potential fire risk operated by MG in the “online” mode.

Keywords: column burning type; jet-flames burning type; intensity of heat flow; “fireball”; radiation coefficient; geometrical dimensions of flame.

REFERENCES

1. STO Gazprom 2-2.3-351–2009. *Methodical guidelines for risk analysis of hazardous production facilities of gas transportation companies of JSC Gazprom*. Decree of LLC “Gazprom transgaz Ukhta” on 30.03.2009 No. 83. Moscow, LLC “Gazprom Expo” Publ., 2009. 377 p. (in Russian).
2. *The methodology for determining the estimated values of fire risk at the production facilities*. Order of Emercom of Russian Federation on 10.07.2009 No. 404 (ed. on 14.12.2010) (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902170886> (Accessed 18 October 2018).
3. G. A. Korn, T. M. Korn. *Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems and formulas for reference and review*. 2nd ed. New York, McGraw-Hill, 1968. xix, 1130 p. (Russ. ed.: Korn G. A., Korn T. M. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov: opredeleniya, teoremy, formuly*. Moscow, Nauka Publ., 1984. 831 p.).

4. V. D. Belitskiy, S. M. Lomov. *Proektirovaniye i ekspluatatsiya magistralnykh gazoprovodov* [Design and operation of gas pipelines]. Omsk, Omsk State Technical University Publ., 2011. 62 p. (in Russian).
5. N. N. Brushlinskiy (ed.), Yu. M. Glukhovenko, V. B. Korobko, S. V. Sokolov, P. Wagner, S. A. Lupanov, E. A. Klepko. *Pozharnyye riski. Vypusk 3. Prognozirovaniye dinamiki pozharnykh riskov* [Fire risks. Episode 3. Forecasting fire risk]. Moscow, VNIPO Publ., 2005. 64 p. (in Russian).
6. V. V. Bukhmirov. *Raschet koeffitsienta teplootdachi* [Calculation of heat transfer coefficient]. Ivanovo, Ivanovo State Energy University Publ., 2007. 78 p. (in Russian).
7. A. I. Bykov. Parameter definition of the average gas pressure in the section of the pipeline. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 1, pp. 49–54 (in Russian).
8. A. I. Bykov. Determination of the average gas temperature in the emergency section of the main pipeline. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 6, pp. 43–50 (in Russian).
9. A. I. Bykov. Method of estimating of the natural gas mass involved in the formation of a fiery torch at break of the main pipeline. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 9, pp. 48–54 (in Russian). DOI: 18322/PVB.2015.24.09.48-54.
10. A. I. Bykov. Estimation of fire danger of gas transportation objects. *Gazovaya promyshlennost' / Gas Industry*, 2013, no. 10(697), pp. 69–71 (in Russian).
11. A. A. Dekterev, A. A. Gavrilov, K. Yu. Litvintsev, S. P. Amelchugov, S. N. Seregin. Modelin of fire dynamics in sport building. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2007, no. 4, pp. 49–58 (in Russian).
12. A. M. Zakirov. *Quantitative assessment of the danger of human exposure to thermal radiation in fires in chemical and petrochemical plants*. Cand. tech. sci. diss. Kazan, 2011. 105 p. (in Russian).
13. N. D. Tskhadaya, A. I. Bykov. The method of determining the value of the radiation flow in case of fire on the main gas pipeline. *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more / Construction of Oil and Gas Wells on Land and at Sea*, 2017, no. 4, pp. 39–41 (in Russian).
14. D. Bohl, G. Jackson. Experimental study of the spill and vaporization of a volatile liquid. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, vol. 140, issue 1-2, pp. 117–128. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.06.076.
15. D. Yang, Z. P. Li, O. Y. Hong. Effects of humidity, temperature and slow oxidation reactions on the occurrence of gasoline-air explosions. *Journal of Fire Protection Engineering*, 2013, vol. 23, no. 3, pp. 226–238. DOI: 10.1177/1042391513486464.
16. W. C.-K. Wong, N. A. Dembsey, J. Alston, C. Lautenberger. A multi-component dataset framework for validation of CFD flame spread models. *Journal of Fire Protection Engineering*, 2013, vol. 23, no. 2, pp. 85–134. DOI: 10.1177/1042391512472087.
17. L. Zhai, J. Li. Correlation and difference between stoll criterion and damage integral model for burn evaluation of thermal protective clothing. *Fire Safety Journal*, 2016, vol. 86, no. 2, pp. 120–125. DOI: 10.1016/j.firesaf.2016.10.007.
18. A. Rajendram, F. Khan, V. Garaniya. Modelling of fire risks in an offshore facility. *Fire Safety Journal*, 2015, vol. 71, no. 1, pp. 79–85. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.11.019.
19. C. K. Lau, K. K. Lai, Y. P. Lee, J. Du. Fire risk assessment with scoring system, using the support vector machine approach. *Fire Safety Journal*, 2015, vol. 78, no. 8, pp. 188–195. DOI: 10.1016/j.firesaf.2015.10.003.
20. Y. Zhen, Z. Wang, J. Wang, C. Wang, Y. Cui. Experimental and numerical study on connecting pipe and vessel size effects on methane–air explosions in interconnected vessels. *Journal of Fire Sciences*, 2018, vol. 36, no. 3, pp. 164–180. DOI: 10.1177/0734904118760165.
21. J. H. Troitzsch. Fires, statistics, ignition sources, and passive fire protection measures. *Journal of Fire Sciences*, 2016, vol. 34, no. 3, pp. 171–198. DOI: 10.1177/0734904116636642.

For citation: A. I. Bykov, A. V. Novak. Technique of building models of the heat affected zones in the fire on the main gas pipeline. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 11, pp. 41–50 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.11.41-50.