

ОЦЕНКА ТЕПЛООВОГО ЛУЧИСТОГО ПОТОКА, ВОЗДЕЙСТВУЮЩЕГО НА СПАСАТЕЛЯ ПРИ ТУШЕНИИ ПОЖАРА

Завьялов Геннадий Вячеславович, науч. сотрудник отдела гражданской защиты;
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР;
e-mail: zavyalov57@mail.ua;
283048, Донецк, ул. Артёма, 157;
Тел.: +38(095) 423-73-95

Завьялова Елена Леонидовна, к.т.н., доцент кафедры природоохранной деятельности;
Донецкий национальный технический университет;
e-mail: elenazavialova@rambler.ru;
283048, Донецк, ул. Розы Люксембург, 34а;
Тел.: +38(062) 335-26-20

Определены тепловые лучистые потоки от фронта пламени пожара, действующие на спасателя в зависимости от площади сечения фронта пламени, максимальной температуры очага пожара и расстояния от фронта пламени. Исследована плотность тепловых лучистых потоков при пожарах с использованием основных законов термогазодинамики и теплопроводности, разработана номограмма для определения плотности теплового лучистого потока, действующего на спасателя в зависимости от расстояния до фронта пламени, максимальной температуры очага пожара и площади сечения фронта пламени. Приведены графические зависимости для определения допустимого расстояния от фронта пламени, действующего на противотепловой костюм и проникающих через него тепловых потоков в зависимости от максимальной температуры очага пожара и площади фронта пламени. Приведенные результаты исследований после проверки их на адекватность данным экспериментальных исследований будут использованы для исследований тепломассообменных процессов при разработке противотеплового костюма с принудительным охлаждением проточной водой.

Ключевые слова: очаг пожара; максимальная температура; плотность теплового лучистого потока; площадь горения; допустимое расстояние.

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями.

Проблема создания безвредных и безопасных условий труда существовала в Украине давно, о чем свидетельствует статистика несчастных случаев: еще 15-20 лет тому назад на производстве погибало около 4 тыс. человек, что в 1,6 раза больше, чем в настоящее время. От дыма и газов при пожарах в мире ежегодно погибает около 86 человек на 1 млн. населения, причем эта величина имеет тенденцию к дальнейшему росту. Уже сегодня число жертв в США, Швеции, Франции и ряду других стран достигает 20-27 человек на 1 млн. населения, в Украине этот показатель превышает 50 человек. При этом недостаточно внимания уделялось оснащению личного состава пожарно-спасательных подразделений средствами индивидуальной противотепловой защиты с активным теплосъемом, что нередко приводило к перегреванию их организма, потере здоровья, а иногда и жизни, значительным материальным затратам на лечение, выплатам по профессиональному заболеванию.

Поэтому разработка этих средств является актуальной задачей, решение которой обеспечит повышение эффективности работы и безопасности спасателей при тушении пожаров.

В настоящее время для ведения аварийно-спасательных работ в условиях нагревающего микроклимата горноспасатели ГВГСС применяют типоряд противотепловой одежды (куртки, костюмы) с активным теплосъемом, то есть, с локально расположенными в пододежном пространстве водолеяющими охлаждающими элементами, теплосъем в которых происходит за счет конвекции и излучения [1, 2]. Для их замораживания, хранения и доставки к месту ведения работ необходимо применять морозильные установки, в том числе передвижные азотные, переносные и передвижные теплоизолирующие контейнеры [3].

Разработанные противотепловые костюмы с подобным охлаждением спасателей для тушения пожаров с высоким тепловым излучением [4] не нашли широкого применения в связи с большими материальными затратами.

Поэтому целесообразным является разработка костюма с кондуктивным теплосъемом проточной водой, которая широко используется спасателями для тушения пожаров.

При разработке противотепловой одежды, в том числе для тушения пожаров, и дальнейших исследованиях тепломассообменных процессов принимался тот или иной диапазон изменения температуры окружающей среды, а не действующих на спасателей и проникающих через наружный слой защитного костюма тепловых лучистых потоков, от значений которых зависит выбор коэффициента черноты его поверхности.

Цель данной работы – определить плотность тепловых лучистых потоков от фронта пламени пожара, воздействующих на спасателя, в зависимости от максимальной температуры очага пожара, площади фронта пламени пожара и расстояния до него.

Основные задачи – разработка метода по определению плотности тепловых лучистых потоков от фронта пламени горения, воздействующих на спасателя, и определение их зависимости от площади фронта пламени пожара, максимальной температуры очага пожара и расстояния до фронта пламени пожара.

Изложение основного материала исследования. Примем расчетную модель очага пожара, возникшего в объеме любого объекта, представленную на рис. 1.

Обозначим $dV(x, y, z)$, m^3 – элементарный объем поглощающей и рассеивающей газовой среды в области очага пожара, T и d_0 – его температура, K , и диаметр, m ; L – расстояние от элементарного объема dV до произвольно ориентированной площадки с нормалью \vec{n} , m ; α – угол между направлением нормали и прямой, соединяющей центры излучающей сферы и поглощающей площадки, rad ; D – диаметр очага пожара, m .

Рассмотрим лучистый теплообмен между единичным объемом среды dV и окружающей его сферической оболочкой, считая ее абсолютно черной.

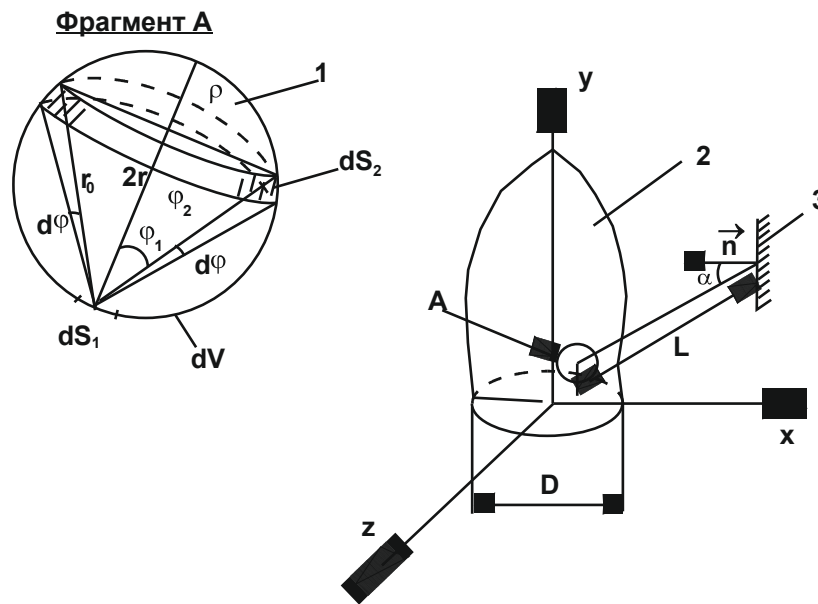


Рис. 1. Модель теплового излучения очага пожара:
1 – элементарный объем поглощающей и рассеивающей газовой среды;
2 – область очага пожара; 3 – фрагмент поверхности костюма.

Согласно закону Кирхгофа [3] излучение рассматриваемого объема сферы в данной области спектра равно количеству энергии, которая поглощается этим объемом из излучения окружающей сферу среды в этой же области спектра. Тогда, вместо расчета излучения объема dV , достаточно определить часть энергии, поглощаемой этим объемом из излучения окружающей среды.

Излучение $d\Phi$ элементарного кольцевого пояса dS_2 сферической оболочки на элемент поверхности dS_1 через шаровой поглощающий слой, считая сначала среду не поглощающей, имеет вид

$$d\Phi = q_0 \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi r_0^2} dS_1 dS_2, \quad (1)$$

где q_0 – плотность потока энергии полного полусферического излучения абсолютно черного тела при температуре T , $Вт/м^2$;

φ_1, φ_2 – углы, под которыми видны поверхности, rad .

Площадь элементарного кольцевого потока определим из уравнения

$$dS_2 = 2\pi r_0^3 \frac{\sin \varphi_1}{\cos \varphi_2} d\varphi_1 \quad (2)$$

Для сферы $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$, а так как среда поглощающая, то для области спектра, в которой она обладает полосами поглощения, уравнение (1) с учетом (2) примет вид

$$d\Phi = 2q_0 \cos \varphi \sin \varphi dS_1$$

Согласно закону Бугера [5], энергия Φ_n , поглощаемая средой из излучения элементарной поверхности dS_2 , равна

$$d(\Phi_n) = (1 - e^{-\kappa r_0}) d\Phi = 2q(1 - e^{-\kappa r_0}) \cos \alpha \sin \alpha dS_1,$$

где κ – коэффициент ослабления очага пожара, который при температуре горения материалов в нем $T_{оч} > 773$ K, определяется по формуле [5]

$$\kappa = 1,6 \cdot 10^{-3} T_{оч} - 0,5.$$

Пренебрегая членами второго и более высокого порядка после разложения экспоненциальной функции в ряд, ввиду малости значения κr_0 , получим

$$d(\Phi_n) = 4q_0 \kappa r \cos^2 \alpha \sin \alpha dS_1. \quad (3)$$

Для определения поглощенной средой энергии излучения, которое посылает сферическая оболочка на элемент dS_1 , проинтегрируем выражение (3) от 0 до $\pi/2$.

Такое же количество энергии, согласно закону Кирхгофа, в указанной области спектра будет излучать сам сферический поглощающий объем на элемент поверхности dS_1 . В результате сферическое излучение $d\Phi_u$ рассматриваемого объема поглощающей среды в заданном интервале длин волн будет равно $d\Phi_n$, т.е.

$$d\Phi_n = d\Phi_u = 4q_0 \kappa r d_1 \int_0^{\pi/2} \cos^2 \alpha d(\cos \alpha) = \frac{4}{3} q_0 \kappa r d. \quad (4)$$

Используя закон Стефана-Больцмана [3],

$$d\Phi_u = \frac{4}{3} \zeta T_{оч}^4 \kappa r dS, \quad (5)$$

где ζ – постоянная Стефана-Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-11} \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$;

$T_{оч}$ – температура очага, K.

Полное сферическое излучение объема $dV = \frac{4}{3} \pi r^3$ получим, интегрируя выражение (4) его поверхности оболочки, учитывая, что величина $\varepsilon = 2\kappa r$, представляющая собой поглотительную способность среды (степень черноты)

$$d\Phi_u = \frac{4}{3} \zeta T_{оч}^4 \kappa r \pi r^2 = \frac{4}{3} \pi r^3 \kappa \zeta T_{оч}^4. \quad (6)$$

Плотность теплового потока q_L с учетом закона Ламберта [6] равна

$$q_L = \frac{\Phi_u}{4\pi L^2} = \frac{1}{4\pi L^2} \kappa \zeta T_{оч}^4 \cos \alpha dV = \kappa_0 \zeta T_{оч}^4 dV, \quad (7)$$

где

$$\kappa_0 = \frac{\kappa \cos \alpha}{4\pi L^2} = \quad (8)$$

коэффициент облучения, с помощью которого можно учесть расположение объектов в пространстве по отношению к излучаемой поверхности;

q_L – плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Выражение (7) позволяет рассчитать плотность лучистых тепловых потоков, проходящих через поверхности различной ориентации.

Полное излучение факела в произвольную точку пространства складывается из излучений всех элементарных объемов.

Анализ экспериментальных данных, полученных ранее [7], и моделирование на ЭВМ лучистого потока с использованием формулы (7) показывает, что максимальная плотность падающих на объект лучистых тепловых потоков q , $\text{Вт}/\text{м}^2$, от очага пожара является функцией степенной зависимости от расстояния x между спасателем и центром очага

$$q = a \zeta T_{оч}^4 \left(\frac{x}{D} \right)^b, \quad (9)$$

где a и b – эмпирические константы.

Температура $T_{оч}$ зависит от коэффициента ослабления k , диаметра D , m очага пожара и максимальной температуры в очаге T_{max} , K .

В качестве диаметра очага пожара D (в сторону завывшения) принимаем диаметр круга, площадь которого равна периметру фронта пламени пожара, обращенного к спасателю F , m^2 , т.е.

$$D = 2 \sqrt{\frac{F}{\pi}} = 1,13 \sqrt{F}. \quad (10)$$

Значения a , b и $T_{оч}$ зависят от числа Бугера

$$B_U = \kappa D.$$

Так, для площадей, у которых $3 \leq F \leq 10$,

$$3,3 \leq B_U \leq 6,0. \quad (11)$$

В этом диапазоне чисел B_U следует, согласно [7], принимать

$$T_{оч} = 0,905 T_{max}, \quad (12)$$

а среднее значение $a = 0,16$, $b = 2,00$.

Для больших площадей ($F > 10 m^2$) $T_{оч} = 1370 K$.

Подставляя выражения (10), (12) в уравнение (9), получим заведомо завывшенное значение q , $кВт/м^2$, что является запасом безопасности для спасателя:

$$q = 0,78 \cdot 10^{-11} T_{max}^4 \frac{F}{x^2}. \quad (13)$$

Результаты проведенных исследований [7] показывают, что при $q = 1 кВт/м^2$ – максимальном безопасном его значении, тепловое излучение неопределенно долго действует на кожу человека; $q = 6,4 кВт/м^2$ – боль после 8 секунд с момента начала действия на кожу, т.е. в данном случае необходимо применять противотепловые средства.

Примем $q_{\delta} = 1 кВт/м^2$ в качестве допустимого значения q . Тогда по формуле (13) определим допустимое расстояние x_{δ} , m , на которое можно приблизиться спасателю к фронту пламени пожара без противотепловых средств:

$$x_{\delta} = x \cdot \frac{D}{2} = (6,28 \cdot 10^{-5} T_{max}^2 \cdot 0,564) \sqrt{F}. \quad (14)$$

Используя выражения (13), (14), построена номограмма (рис. 2) для определения интенсивности лучистого потока в зависимости от максимальной температуры горения, зависящей от агрегатного состояния горючих материалов (для твердых горючих материалов, горючих жидкостей и горючих газов $T_{max} = 1273-1473 K$), площади фронта горения и расстояния до него, а также зависимость допустимого расстояния (рис. 3) от максимальной температуры и площади горения.

Результаты исследований показывают, что допустимые расстояния превышают значение 5 м, которое необходимо для эффективного тушения пожаров первичными средствами, например, при пожарах в помещениях небольшой высоты, а максимальный лучистый поток (см. рис. 2) на этом расстоянии в зависимости от максимальных температур равен 3-20 кВт/м² при площади горения F равной 4-16 м².

Зависимости (12), (13) могут быть использованы для определения плотности лучистого теплового потока, который должен быть отражен, рассеян или поглощен противотепловым костюмом. Однако они получены на основании экспериментальных данных для пожаров на начальной стадии их развития. На практике чаще приходится ликвидировать пожары на стадии их полного развития.

В результате обработки полученных данных [7] с учетом условий, в частности, при пожарах в помещениях, оказалось, что значения коэффициента облучения для развившихся пожаров пропорциональны отношению \sqrt{F}/x и значительно превышают значения, рассчитанные по формуле (8).

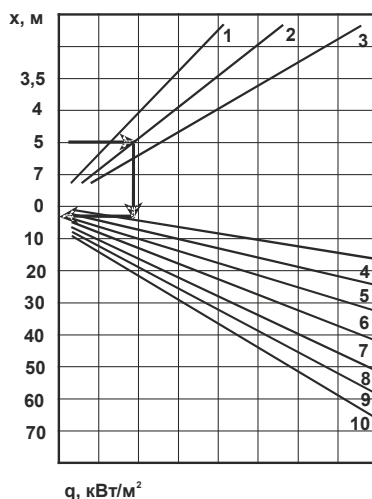


Рис. 2. Номограмма для определения плотности теплового лучистого потока q в зависимости от расстояния (x) до фронта пламени пожара, его площади F и максимальной температуры горения T_{max} :
1, 2, 3 – соответственно $T_{max} = 1273, 1373, 1473$ К; 4-10 – соответственно $F = 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16$ м²

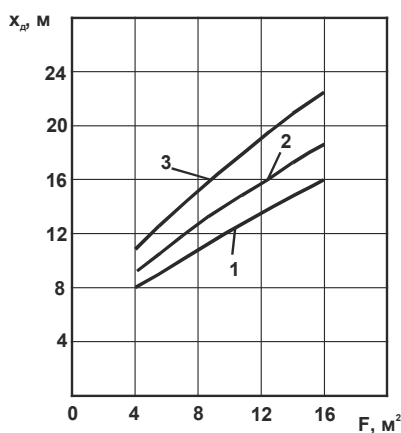


Рис. 3. Зависимость допустимого расстояния до фронта пламени горения от площади пожара F , для максимальных температур горения T_{max} : 1, 2, 3 – 1273, 1373, 1473 К соответственно

При этом предполагаем, что тепловое воздействие на спасателя при тушении пожара происходит за счет лучистого теплообмена с источником излучения равным площади фронта горения.

В данном случае расчет производим следующим образом.

Определяем плотность теплового потока излучаемую очагом пожара ($кВт/м^2$):

$$q = \epsilon \sigma T_{max}^4, \tag{15}$$

находим безразмерный параметр расстояния

$$\bar{x} = x/\sqrt{F}, \tag{16}$$

используя который с помощью графика (рис. 4), находим коэффициент облучения κ_0 противотеплового костюма.

Затем определяем плотность воздействующего лучистого потока на единицу площади поверхности костюма $q_B, кВт/м^2$

$$q_B = \kappa_0 q \tag{17}$$

и интенсивность поглощенного костюмом теплового потока $q_\kappa, кВт/м^2$

$$q_\kappa = \epsilon_\kappa (q_B \cdot \zeta T_0^4), \tag{18}$$

где ϵ_{κ} – степень черноты наружной поверхности костюма;

T_0 – начальная температура костюма до нагревания от очага горения (принимается равной температуре воздуха окружающей среды, K).

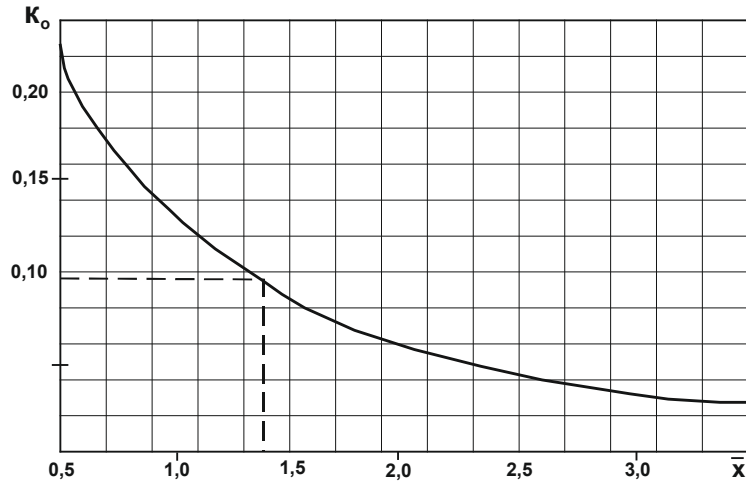


Рис. 4. Зависимость коэффициента облучения κ_0 противотеплового костюма от относительного расстояния $\bar{x} = x/\sqrt{F}$

На основании приведенного метода и зависимостей (15)-(18) определены значения q_n и q_{κ} и их воздействие на противотепловой костюм при развившемся пожаре, которые приведены на рис. 5. При этом q_{κ} определяли по зависимости

$$q_{\kappa} = \epsilon_{\kappa} \zeta (\kappa_0 T_{max}^4 - T_0^4). \quad (19)$$

Отсюда следует, что при принятых исходных данных, в частности, степени черноты наружной поверхности костюма $\epsilon_{\kappa} = 0,1$ (так как в настоящее время имеются покрытия наружной оболочки костюмов, которые отражают 90-97 % тепловых лучистых потоков, то есть $\epsilon_{\kappa} = (0,1-0,03)$), начальной температуре костюма $T_0 = 303 \text{ K}$ ($30 \text{ }^\circ\text{C}$), расстоянии 5 м от фронта пламени при развитом пожаре и максимальной температуре $T_{max} = 1273, 1373, 1473 \text{ K}$ возникают соответственно тепловые лучистые потоки $q = 150, 200, 270 \text{ кВт/м}^2$. При этом падающие потоки q принимают значения 7,0-20,0 (1), 10,0-25,0 (2), 13,0-30,0 (3) кВт/м^2 поглощенные костюмом – $q_{\kappa} = 0,5-2,0$ (1'), 0,9-2,5 (2'), 1,2-3,1 (3') кВт/м^2 .

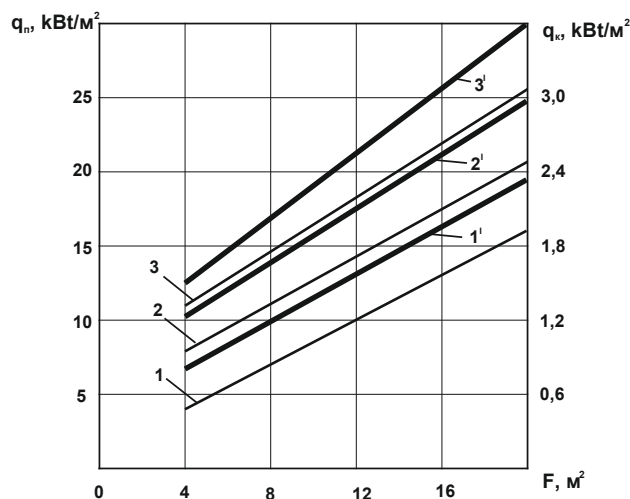


Рис. 5. Зависимости воздействующего q_B (1, 2, 3) и поглощенного костюмом q_{κ} (1', 2', 3') тепловых лучистых потоков от площади пожара F , максимальной температуры горения T_{max} на расстоянии 5 м от фронта пламени горения при развитом пожаре при степени черноты $\epsilon_{\kappa} = 0,1$ и начальной температуре $T_0 = 303 \text{ K}$ ($30 \text{ }^\circ\text{C}$): 1, 1'; 2, 2'; 3, 3' – $T_{max} = 1273, 1373, 1473 \text{ K}$, $q = 150, 200, 270 \text{ кВт/м}^2$ соответственно.

При значении $\epsilon_{\kappa} = 0,03$ можно уменьшить поглощенный поток q_{κ} в 3,3 раза.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Разработан метод для оценки плотности тепловых лучистых потоков, воздействующих на спасателя, в зависимости от максимальной температуры, площади фронта горения и расстояния до него.

Приведенные результаты теоретических исследований, после проверки на адекватность с данными экспериментальных исследований, будут использованы в дальнейшем для исследований теплообменных процессов в костюме спасателя с использованием системы проточного водяного охлаждения.

Библиографический список

1. Многократное применение охлаждающих элементов противотепловой одежды / В.О. Положий, И.Ф., Марийчук, О.В. Папазова., А.А. Гаврилко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2012. – Вып. 49. – С. 165-172.
2. Клименко, Ю.В. Теоретические основы тепловых расчетов противотепловой одежды для горноспасателей / Ю.В. Клименко // Науковий вісник НГА України. – Дніпропетровськ, 2001. – № 3. – С. 70-73.
3. Воронов, П.С. Обоснование параметров и создание комплекса противотепловой защиты горноспасателей с использованием сжатого воздуха: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 «Охрана труда». – Макеевка: МакНИИ, 2008. – 176 с.
4. Гаврилко, О.А. Математичне моделювання нестационарного переносу тепла в захисному одязі пожежних і гірничорятувальників з вододільною системою охолодження / О.А. Гаврилко // Пожежна безпека: Зб. наук.праць, ЛПБ: УкрНДІПБ МНС України. – Львів, 2002. – С. 76-82.
5. Шорин, С.Н. Теплопередача / С.Н. Шорин. – М.: Высшая школа, 1964. – 490 с.
6. Блох, А.Г. Основы теплообмена излучением / А.Г. Блох. – М.– Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 331с.
7. Астапенко, В.М. Термогазодинамика пожаров в помещениях / В.М. Астапенко, Ю.А. Кошмаров. – М.: Стройиздат, 1988. – 448 с.

© Г.В. Завьялов, Е.Л. Завьялова, 2015
Рецензент д.т.н., с.н.с. В.В. Мамаев

MEASURING AND ESTIMATING HEAT RADIATION RATE RESCUERS ARE EXPOSED TO IN FIRE FIGHTING

Gennadiy Vyacheslavovich Zav'yalov, Research Officer of the Civil Protection Department;
«Respirator» State Scientific Research Institute of Mine-Rescue Work, Fire Safety and Civil Protection
of the Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defense Affairs, Emergencies
and Liquidation of Consequences of Natural Disasters;
e-mail: zavyalov57@mail.ua;
283048, Donetsk, 157 Artyoma Str.;
Phone: +38(095) 423-73-95

Dr. Olena Leonidovna Zavyalova, Ph.D. (Tech.), Associate Professor of the Conservation Activity Department;
Donetsk National Technical University;
e-mail: elenazavialova@rambler.ru;
283050, Donetsk, 34a Rosa Luxemburg Str.;
Phone: +38(062) 335-26-20

The heat radiant fluxes from a flame front of the fire exerting influence on the rescuer depending on the cross sectional area of the flame front, maximum temperature of a seat of fire and distance to the flame front are determined. The intensity of the heat radiant fluxes by the fires with the application of fundamental laws of thermodynamics and heat conductivity is investigated, the nomogram to determine the intensity of the heat radiant flux influencing on the heat protective suit of the rescuer depending on the distance to the flame front, maximum temperature of the seat of fire and cross sectional area of the flame front is worked out. The curves to determine the permissible distance to the flame front affecting the heat protective suit and fluxes penetrating through it in dependence on the maximum temperature of the seat of fire and flame front area are adduced. The results of the investigations adduced will be used after their check on compliance with the data of experimental investigations to study the heat and mass exchange processes by working-out the heat protective suit with the forced cooling with running water.

Keywords: seat of fire; maximum temperature; intensity of the heat radiant flux; area of burning; permissible distance.