

УДК 621.72:621.532.656.08

К вопросу об излучении огненных шаров, образовавшихся при сгорании выбросов углеводородных газов

Ю.В. Гамера^{1*}, Ю.Ю. Петрова¹, С.В. Овчаров¹, Л.В. Ягупова¹

¹ ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, 142717, Московская обл., Ленинский р-н, пос. Развилка, Проектируемый пр-д № 5537, вл. 15, стр. 1

* E-mail: Y_Gamera@vniigaz.gazprom.ru

Тезисы. В статье представлена верифицированная по излучению облака продуктов ядерного взрыва нольмерная модель излучающего огненного шара (ОШ) реагирующих газов. На основе данной модели проведены расчеты закономерностей излучения всплывающих в изотермической атмосфере перемешанных и стехиометрических облаков окисляемого с бесконечной скоростью природного газа (метана). Дана аппроксимация результатов численного расчета основных физических характеристик ОШ степенными зависимостями от массы выброса при пожаре-вспышке и диффузионном горении. Для консервативных оценок теплового поражения от ОШ рекомендовано считать ОШ неподвижным и сформировавшимся при мгновенном сгорании стехиометрической смеси. В качестве верхнего предела средней по поверхности интенсивности теплового излучения для ОШ рекомендовано принять величину в 250 кВт/м².

Ключевые слова:

интенсивность теплового излучения, огненный шар, пожар-вспышка, природный газ, режимы горения.

Аварии с выбросом и возгоранием газа всегда сопровождаются термической радиацией. В зависимости от продолжительности выброса и времени воспламенения тепловое излучение может носить как продолжительный (измеряемый десятками минут, а иногда и часов), так и кратковременный (с типичным временем существования в несколько секунд) характер. В первом случае, реализуемом, как правило, при квазистационарном истечении газа и воспламенении на начальной стадии, горение протекает в диффузионном режиме. Во втором, имеющем место при зажигании сформированных изолированных объемов, например, при мгновенном выбросе, горение в зависимости от перемешанности смеси и свойств горючего газа может осуществляться кроме диффузионного и во взрывных (дефлаграционном и детонационном) режимах. При этом с учетом скоротечности взрывных режимов основным источником излучения для них являются нагретые продукты взрыва, в то время как при диффузионном горении источником излучения кроме продуктов горения является и нагретая топливовоздушная смесь.

В нормативно-методической базе по пожароопасности¹ изолированные объемы (облака), сгорающие в диффузионном режиме, принято называть огненными шарами (ОШ), а облака сгорающей в дефлаграционном режиме без существенного барического эффекта топливовоздушной смеси – пожаром-вспышкой (ПВ) (при этом анализируется излучение только ОШ). Здесь необходимо сделать два замечания. Во-первых, исходя в отечественную литературу термин «огненный шар» (*англ.* fireball) был введен переводным изданием классической книги Министерства обороны США «Действие ядерного оружия»: «За менее чем одну миллионную долю секунды, в течение которой происходит взрыв ядерного боеприпаса, сильно нагретые продукты взрыва излучают огромное количество энергии... Это приводит к образованию сильно нагретой и ярко светящейся массы воздуха и газообразных продуктов взрыва, которая была названа

¹ См. ГОСТ Р 12.3.047-2012. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля / введ. в действие 01.01.2014.
ГОСТ Р 12.3.047-98. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля / введ. в действие 01.01.2000.
Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах (с изменениями на 14 декабря 2010 г.): Приложение к приказу МЧС России от 10.07.2009 № 404.

огненным шаром» [1]. Из процитированного текста следует, что ОШ не имеет ничего общего с самим процессом горения, а является лишь его результатом, следовательно, такое название одинаково применимо к изолированным объемам, сгорающим в любом из упомянутых выше режимов. И, во-вторых, вне зависимости от величины барического эффекта при взрывном сгорании изолированного облака топливоздушнoй смеси фактор тепловой радиации будет присутствовать, а значит, помимо ПВ необходимо рассматривать и излучение облаков нагретого газа, образовавшихся вследствие произвольного дефлаграционного горения или детонации. А коль скоро это так, то представляет интерес сравнение излучательной способности при диффузионном горении облака неперемешанного газа и облака продуктов мгновенного сгорания стехиометрической смеси. Кроме того, возникает вопрос об обоснованности рекомендованного в нормативных документах для ОШ значения средней поверхностной интенсивности теплового излучения в 350 кВт/м².

Решать перечисленные задачи удобно в рамках верифицированной по излучению облака продуктов ядерного взрыва нольмерной модели излучающего ОШ реагирующих газов [2, 3]. Для обеспечения консервативности расчетов в качестве модельного газа для исследования удобно выбрать природный газ. Применительно к окисляемому с бесконечной скоростью природному газу (поступающий кислород мгновенно расходуется на горение) по данной модели изменение во времени осредненных по объему характеристик всплывающего в изотермической атмосфере ОШ будет описываться системой обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \frac{dm}{dt} &= 4\pi\lambda |u| \left[\frac{\rho}{\rho_{\text{возд}}} \right]^{\frac{2}{3}} \rho_{\text{возд}} R^2; \\ \frac{d \left(\left[1 + k \frac{\rho_{\text{возд}}}{\rho} \right] mu \right)}{dt} &= g \left(\frac{\rho_{\text{возд}}}{\rho} - 1 \right) m; \\ \frac{d\Delta E}{dt} &= -gu \frac{\rho_{\text{возд}}}{\rho} m - 4\pi\sigma\epsilon R^2 (T^4 - T_{\text{возд}}^4); \\ \frac{dh}{dt} &= u \end{aligned} \quad (1)$$

и уравнениями связи

$$\begin{aligned} \Delta E &= [c_{\text{возд}} m + (c_{\text{CH}_4} - c_{\text{возд}}) m_0] (T - T_{\text{возд}}) + (1-x) m_0 [\Delta c_p (T - T_{\text{возд}}) + Q]; \\ m &= \frac{4\pi}{3} \rho R^3; \\ \frac{\rho_{\text{возд}}}{\rho} &= \frac{T}{T_{\text{возд}}} \left[1 + \frac{m_0}{m} \left(\frac{\mu_{\text{возд}}}{\mu_{\text{CH}_4}} - 1 \right) \right]; \\ \epsilon &= \begin{cases} 0 & \text{при } T < 300; \\ -0,075 + 1,41 \cdot 10^{-4} T + 2 \cdot 10^{-7} T^2 - 6,2 \cdot 10^{-11} T^3 + 5,23 \cdot 10^{-15} T^4 & \text{при } 300 \leq T < 4000; \\ 0,942 & \text{при } T \geq 4000; \end{cases} \quad (2) \\ x &= \begin{cases} 0,105 \frac{\mu_{\text{CH}_4}}{\mu_{\text{возд}}} \left(\frac{m}{m_0} - 1 \right) & \text{при } \frac{m}{m_0} \leq 1 + \frac{1}{0,105} \frac{\mu_{\text{CH}_4}}{\mu_{\text{возд}}}; \\ 1 & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \end{aligned}$$

где m_0 – масса метана при выбросе; $\rho_{\text{возд}}$, $T_{\text{возд}}$, $c_{\text{возд}}$, $\mu_{\text{возд}}$ – плотность (изменяется с высотой по распределению изотермической атмосферы), температура (в дальнейшем принимается равной 273 К), удельная теплоемкость и молекулярный вес окружающего ОШ воздуха соответственно; c_{CH_4} и μ_{CH_4} – удельная теплоемкость и молекулярный вес метана; Δc_p и Q – изменение теплоемкости и выделившееся тепло в ходе сгорания единицы массы метана; m , u и h , R , T , ρ , ΔE , x – осредненные характеристики ОШ в порядке перечисления: масса, скорость и высота подъема центра масс, радиус, температура, плотность, избыточная энтальпия газа в ОШ при температуре T

по сравнению с энтальпией того же газа при температуре $T_{\text{возд}}$, массовая доля сгоревшего метана; $\lambda = 0,3$ – коэффициент захвата облаком воздуха; $k = 0,5$ – коэффициент присоединенной массы; g – ускорение силы тяжести; σ – постоянная Стефана – Больцмана; ε – коэффициент серости ОШ.

Система (1), (2) дополняется начальными условиями для четырех переменных, полностью (с учетом уравнений связи) характеризующих состояние ОШ. В качестве таковых целесообразно выбрать m , u , h , T . Начальные значения указанных переменных (обозначены индексом n) при диффузионном горении облака неперемешанного газа имеют вид:

$$m_n = m_0; u_n = 0; h_n = 0; T_n = T_{\text{возд}}. \quad (3)$$

В случае всплывания облака продуктов мгновенного сгорания стехиометрической смеси начальные значения переменных задаются следующим образом:

$$m_n = m_0 \left(1 + \frac{1}{0,105} \frac{\mu_{\text{CH}_4}}{\mu_{\text{возд}}} \right); u_n = 0; h_n = 0;$$

$$T_n = T_{\text{возд}} + Q \left(\frac{c_{\text{возд}}}{0,105} \frac{\mu_{\text{CH}_4}}{\mu_{\text{возд}}} + c_{\text{CH}_4} - \Delta c_p \right)^{-1}. \quad (4)$$

Численное интегрирование дифференциальных уравнений (1) при начальных условиях (3) или (4) с использованием уравнений

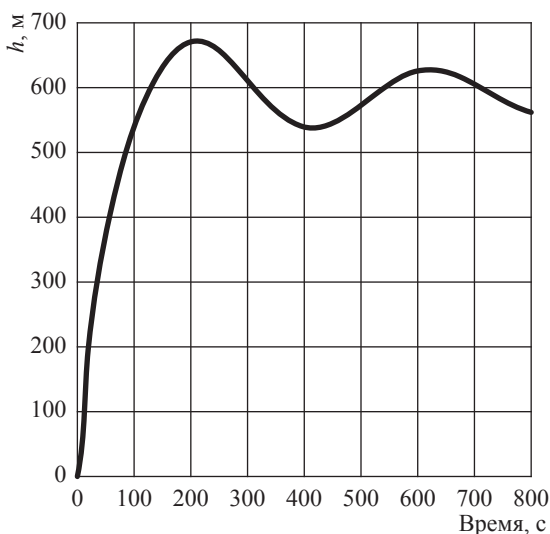


Рис. 1. Динамика подъема в изотермической атмосфере центра ОШ при диффузионном сгорании 1 т метана

связи (2) позволяет описать эволюцию ОШ вплоть до его колебаний на высоте зависания (рис. 1). Последние происходят на временных интервалах порядка десятка минут.

Для целей текущего исследования, состоящего в оценочном сравнении излучения ОШ различного происхождения, достаточно ограничиться временным интервалом в минуту. На рис. 2 и 3 представлены подтверждающие

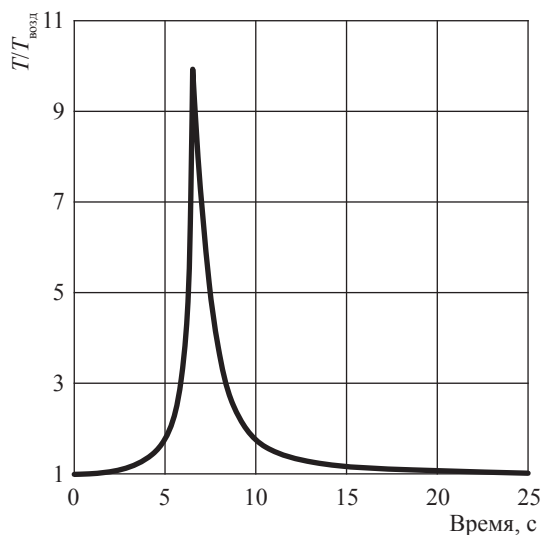


Рис. 2. Временная зависимость для относительной средней температуры ОШ при диффузионном горении облака неперемешанного газа массой 1 т

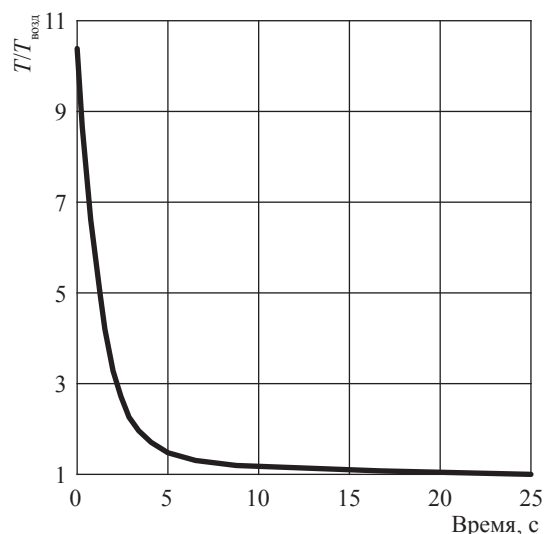


Рис. 3. Временная зависимость для относительной средней температуры облака продуктов мгновенного сгорания стехиометрической метановоздушной смеси массой 1 т

данный тезис характерные профили осредненной температуры в облаках, образованных соответственно при диффузионном сгорании неперемешанного с воздухом метана и мгновенном сгорании стехиометрической метано-воздушной смеси.

Расчеты при различных m_0 позволили установить и оценить по аппроксимирующим

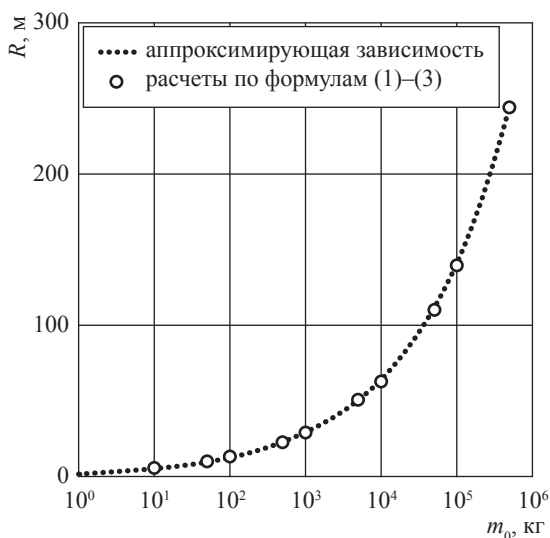


Рис. 4. Аппроксимация зависимости среднеарифметического радиуса ОШ во время излучения от массы выброса при диффузионном горении облака неперемешанного газа

зависимостям влияние на основные характеристики излучающего ОШ массы выброса. Результаты некоторых расчетов и аппроксимации представлены на рис. 4–9, а данные по всем аппроксимациям сведены в таблицу.

Из представленных выше данных следует, что с точки зрения излучающей способности облако продуктов мгновенного сгорания

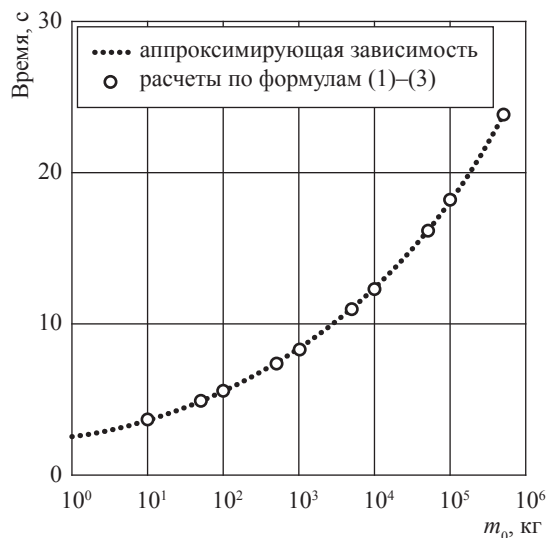


Рис. 5. Аппроксимация зависимости длительности излучения ОШ от массы выброса при диффузионном горении облака неперемешанного газа

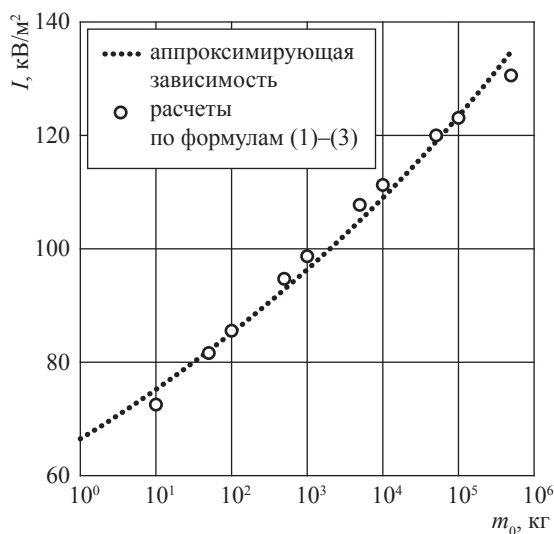


Рис. 6. Аппроксимация зависимости усредненной по времени среднеповерхностной интенсивности теплового излучения ОШ (I) от массы выброса при диффузионном горении облака неперемешанного газа

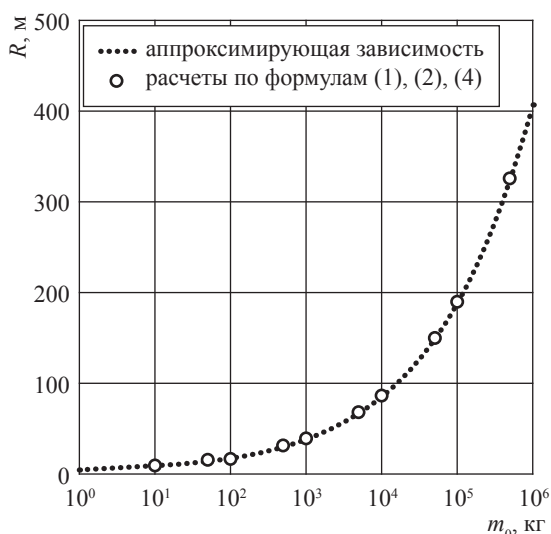


Рис. 7. Аппроксимация зависимости среднеарифметического радиуса ОШ во время излучения от массы выброса для облака продуктов мгновенного сгорания стехиометрической метано-воздушной смеси

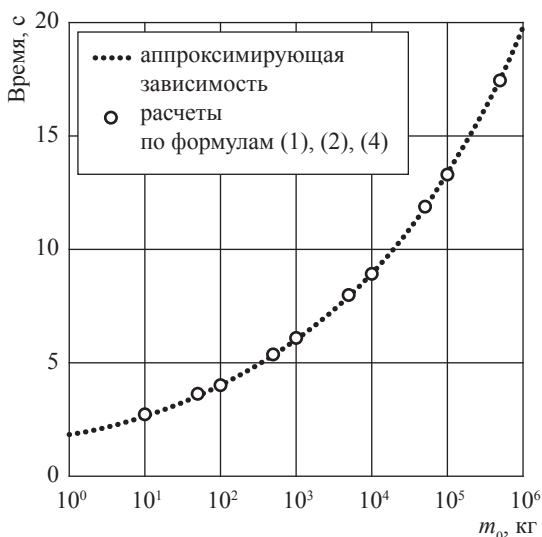


Рис. 8. Аппроксимация зависимости длительности излучения ОШ от массы выброса для облака продуктов мгновенного сгорания стехиометрической метановоздушной смеси

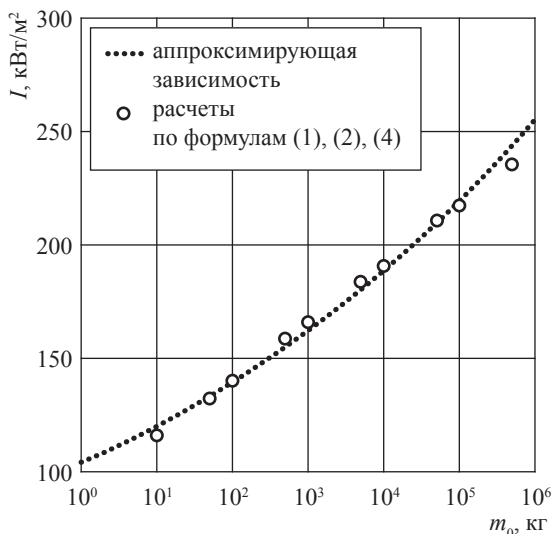


Рис. 9. Аппроксимация зависимости усредненной по времени среднеповерхностной интенсивности теплового излучения ОШ от массы выброса для облака продуктов мгновенного сгорания стехиометрической метановоздушной смеси

Аппроксимация зависимостей физических характеристик ОШ от массы выброса метана при различных режимах его сгорания

Физическая характеристика	Значение коэффициентов зависимости $Z = am_0^b$	
	<i>a</i>	<i>b</i>
<i>ОШ при диффузионном горении облака неперемешанного газа</i>		
1. Значение <i>R</i> на момент начала эффективного излучения, м	1,177	0,332
2. Значение <i>h</i> на момент начала эффективного излучения, м	1,492	0,333
3. Значение <i>R</i> на момент окончания эффективного излучения, м	4,384	0,343
4. Значение <i>h</i> на момент окончания эффективного излучения, м	11,393	0,342
5. Среднеарифметическое значение <i>R</i> во время излучения, м	2,779	0,341
6. Среднеарифметическое значение <i>h</i> во время излучения, м	6,443	0,341
7. Значение <i>R</i> в момент достижения максимального значения <i>I</i> , м	3,212	0,336
8. Значение <i>h</i> в момент достижения максимального значения <i>I</i> , м	3,099	0,334
9. Время начала эффективного излучения, с	1,245	0,167
10. Время окончания эффективного излучения, с	3,785	0,17
11. Время достижения максимального значения <i>I</i> , с	2,071	0,167
12. Длительность излучения ОШ, с	2,542	0,171
13. Удельная (по поверхности) излучаемая тепловая энергия за время существования ОШ (<i>E</i>), кДж/м ²	168,342	0,226
14. <i>I</i> , кВт/м ²	66,287	0,054
<i>ОШ продуктов мгновенного сгорания стехиометрической смеси</i>		
1. Значение <i>R</i> в начальный момент, м	3,32	0,333
2. Значение <i>R</i> на момент окончания эффективного излучения, м	4,259	0,344
3. Значение <i>h</i> на момент окончания эффективного излучения, м	7,909	0,347
4. Среднеарифметическое значение <i>R</i> во время излучения, м	3,789	0,339
5. Среднеарифметическое значение <i>h</i> во время излучения, м	3,955	0,347
6. Время окончания эффективного излучения (длительность излучения ОШ), с	1,835	0,172
7. <i>E</i> , кДж/м ²	190,376	0,237
8. <i>I</i> , кВт/м ²	103,752	0,065

стехиометрической смеси метана представляет бóльшую опасность, нежели ОШ, образовавшийся в результате диффузионного сгорания неперемешанного газа той же массы, так как при $m_0 \in [10^2; 5 \cdot 10^5]$

$$\frac{I_1}{I_2} \in [0,553; 0,607] < 1;$$

$$\frac{E_1}{E_2} \in [0,765; 0,84] < 1,$$

где I_1, I_2 – усредненные по времени среднеповерхностные интенсивности теплового излучения, а E_1, E_2 – удельные (по поверхности) излучаемые тепловые энергии за время существования ОШ соответственно при диффузионном горении неперемешанного газа и при мгновенном сгорании стехиометрической смеси.

Отдельный интерес представляет сопоставление полученных характеристик с нормативно-методической базой¹. Анализ представленных на рис. 10, 11 данных позволяет говорить о согласии различных методик в вопросе оценки размеров ОШ, однако обнаружено существенное различие при оценке времени их жизни: в ГОСТ Р 12.3.047-2012 и Методике определения расчетных величин пожарного риска параметр b (см. таблицу) составляет 0,26, в ГОСТ Р 12.3.047-98 – 0,303. Последний факт, по-видимому, объясняется исходным источником и способом обработки положенных в основу моделей¹ экспериментальных данных

(данные по взрывам ракетных топлив [4]). При этом следует отметить, что существуют как теоретические [5], так и экспериментальные [6] исследования ОШ, образующихся при взрывах пропана, пентана и октана в воздухе, согласно которым параметр b составляет соответственно 0,167 и 0,181 (что близко к полученным по модели (1)–(4) результатам).

При реальных залповых выбросах топливовоздушная смесь всегда является частично перемешанной. Поэтому некоторая доля горючего газа сгорает во взрывном режиме, а оставшаяся догорает в диффузионном в процессе всплытия ОШ, а значит, с ослаблением эффективного теплового потока на поверхности земли. На момент окончания горения подъем центра масс облака может составлять по аппроксимирующим зависимостям (см. таблицу) несколько радиусов. Причем для облака неперемешанного газа указанный эффект больше. В таких условиях консервативно импульсное термическое излучение целесообразно оценивать по характеристикам облака продуктов мгновенного сгорания стехиометрической смеси для условно неподвижного ОШ. При этом (см. рис. 9) в значимом диапазоне изменения массы выброса метана усредненное по времени значение I не будет превышать для природного газа 250 кВт/м² (для остальных углеводородных газов в силу меньшего эффективного коэффициента захвата воздуха,

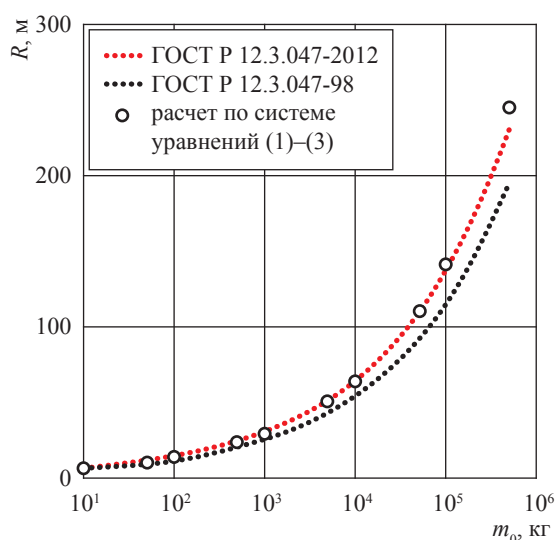


Рис. 10. Зависимости радиуса ОШ от массы выброса метана, полученные по различным методикам

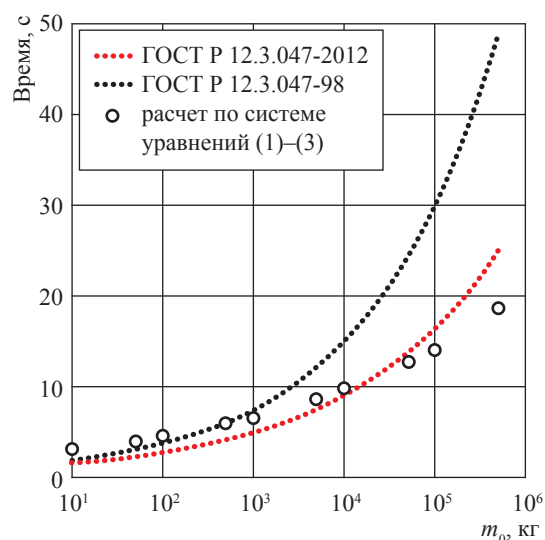


Рис. 11. Зависимости времени существования ОШ от массы выброса метана, полученные по различным методикам

а значит, более слабой интенсивности диффузионного горения указанное значение будет ниже), а не 350 кВт/м^2 , как рекомендовано ГОСТ Р 12.3.047-2012 и методикой определения расчетных величин пожарного риска¹.

Таким образом, проведенные на основе нольмерной модели излучающего ОШ расчеты и их аппроксимация степенными зависимостями от массы выброса позволяют эффективно

описать закономерности излучения при различных режимах сгорания облаков углеводородных газов. Для консервативных оценок рекомендовано считать ОШ неподвижным и сформировавшимся в результате мгновенного сгорания стехиометрической смеси. В качестве верхнего предела средней по поверхности интенсивности импульсного теплового излучения можно принять значение 250 кВт/м^2 .

Список литературы

1. Действие ядерного оружия / пер. с англ. В.П. Дмитриева. – 2-е изд. – М.: Воениздат, 1965. – 680 с.
2. Гостинцев Ю.А. Образование окиси азота при воздушных ядерных взрывах / Ю.А. Гостинцев, Ю.В. Гамера, А.А. Шурка. – Черноголовка: Институт химической физики АН СССР, 1990. – 73 с.
3. Гостинцев Ю.А. Генерация окислов азота при мощных воздушных взрывах. Взаимодействие NO_x с озоновым слоем / Ю.А. Гостинцев, Ю.В. Гамера // Химическая физика. – 1994. – Т. 13. – № 2. – С. 109–131.
4. High R.W. The Saturn fireball / R.W. High // Annals of the New York Academy of Science. – 1968. – Т. 152. – № 1. – С. 441–451.
5. Bader B.E. Liquid-propellant rocket abort fire model / B.E. Bader, A.B. Donaldson, H.C. Hardy // Journal of Spacecraft and Rockets. – 1971. – Т. 8. – № 12. – С. 1216–1219. – <https://doi.org/10.2514/3.30365>
6. Hasegawa K. Experimental investigation of the unconfined vapor-cloud explosions of hydrocarbons / K. Hasegawa, K. Sato // Technical memorandum of Fire Research Institute. – Japan: Fire Research Institute: Fire Agency, 1978. – № 12.

On radiation of fireballs originated during combustion of discharged hydrocarbon gases

Yu.V. Gamera^{1*}, Yu.Yu. Petrova¹, S.V. Ovcharov¹, L.V. Yagupova¹

¹ Gazprom VNIIGAZ LLC, Bld. 1, Estate 15, Projektiruemyy proezd no. 5537, Razvilka village, Leninskiy district, Moscow Region, 142717, Russian Federation

* E-mail: Y_Gamera@vniigaz.gazprom.ru

Abstract. This paper presents a zero-dimensional model of a radiating fireball consisting of reacting gases. The model is verified according to emissions of a cloud of the nuclear explosion products. Following this model authors calculated the radiation dependencies for not-mixed and stoichiometric clouds of a natural gas (methane) being oxidized with the infinite velocity and floating up in an isothermal atmosphere. The numerical calculations of the main physical characteristics of the fireball are approximated by the exponential dependencies on the value of a discharged mass during either a fire flash, or the diffusive burning. In case of conservative assessment of heat injury by the fireball, this fireball is recommended to be considered immobile and being formed in course of the immediate burn-up of a stoichiometric mixture. It is also recommended to take 250 kW/m^2 as an upper limit for the average (over the surface) intensity of the fireball thermal radiation.

Keywords: intensity of infrared radiation, fireball, fire flash, natural gas, modes of fire, combustion behavior.

References

1. *The effects of nuclear weapons* [Deystviye yadernogo oruzhiya]. Translated from English by V.P. DMITRIYEV. 2nd ed. Moscow: Voenizdat, 1965. (Russ.).
2. GOSTINTSEV, Yu.A., Yu.V. GAMERA, A.A. SHURKA. *Generation of nitric oxide during nuclear air bursts* [Obrazovaniye okisi azota pri vozdushnykh yadernykh vzryvakh]. Chernogolovka, Russia: Institute for Chemical Physics of the USSR Academy of Science, 1990. (Russ.).

3. GOSTINTSEV, Yu.A., Yu.V. GAMERA. Generation of nitrogen oxides at huge air explosions. Interaction of NO_x and ozone screen [Generatsiya okislov azota pri moshnykh vozdushnykh vzryvakh. Vzaimodeystviye NO_x s ozonovym sloyem]. *Khimicheskaya Fizika*, 1994, vol. 13, no. 2, pp. 109–131. ISSN 0207-401X. (Russ.).
4. HIGH, R.W. The Saturn fireball. *Annals of the New York Academy of Science*, 1968, vol. 152, no. 1, pp. 441–451. ISSN 0077-8923.
5. BADER, B.E., B. DONALDSON, H.C. HARDY. Liquid-propellant rocket abort fire model. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1971, vol. 8, no. 12, pp. 1216–1219. ISSN 0022-4650. Available from: <https://doi.org/10.2514/3.30365>
6. HASEGAWA, K., K. SATO. Experimental investigation of the unconfined vapor-cloud explosions of hydrocarbons. *Technical memorandum of Fire Research Institute*. Japan: Fire Research Institute, Fire Agency, 1978, no. 12.