

# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПРИ ГОРЕНИИ МЕТАНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗВИТИЯ

С. А. Лисаков, А. И. Сидоренко, А. Н. Павлов, Е. В. Сыпин, Г. В. Леонов

*Бийский технологический институт*

*филиал Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова*

Поступила в редакцию 26.09.2016 г.

**Аннотация.** Проведено моделирование излучения пламени при горении метано-воздушных смесей на начальной стадии развития. Определены основные аналитические зависимости для моделирования при допущении, что горение является изотермическим по объему и имеет форму шара. Выполнен расчет спектральной энергетической светимости с поверхности огненного шара. Определена энергетическая освещенность на элементарной площадке в зависимости от расстояния до огненного шара без учета поглощения промежуточной среды. Адекватность модели была проверена на основе расчетных и экспериментальных данных других авторов. Максимумы спектральной энергетической светимости с поверхности огненного шара соответствуют длинам волн для углекислого газа – 1.34, 4.26, 7.45 мкм, для паров воды – 1.29, 1.87, 2.66, 2.74 и 6.27 мкм. Значения интегральной энергетической светимости находятся в диапазоне от 20 до 210 кВт/м<sup>2</sup> для огненных шаров с диаметрами от 0.1 до 5 м. Интегральная степень черноты огненного шара изменяется в диапазоне значений от 0.015 до 0.21 для значений диаметров от 0.1 до 10 м.

**Ключевые слова:** горение на начальной стадии, пламя, метано-воздушная смесь, моделирование, спектральная энергетическая светимость.

**Annotation.** Modeling of flame radiation at burning of methane-air mixtures at an initial stage of development is executed. The basic analytical dependences for modeling are defined at an assumption, that burning is isothermal on volume and has the sphere form. Calculation of spectral radiant exitance from a surface of fireball is executed. Irradiance on an elementary platform depending on distance to fireball without absorption of the intermediate environment is determined. Adequacy of model has been checked up on the basis of calculated and experimental data of other authors. Maximums of spectral radiant exitance from fireball surface correspond to lengths of waves for carbonic gas – 1.34, 4.26, 7.45 microns, for water steams – 1.29, 1.87, 2.66, 2.74 and 6.27 microns. Values of radiant exitance are in a range from 20 to 210 kW/m<sup>2</sup> for fireballs with diameters from 0.1 to 5 m. Emissivity of fireball changes in a range of values from 0.015 to 0.21 for values of diameters from 0.1 to 10 m.

**Keywords:** burning at an initial stage, flame, methane-air mixture, modeling, spectral radiant exitance.

## ВВЕДЕНИЕ

Аварии, связанные с воспламенением метана и угольной пыли в угольных шахтах, являются наиболее тяжелыми по своим последствиям и в большинстве случаев носят характер катастроф [1, 2, 3].

Для локализации взрывов на опасных производствах используются автоматические

системы взрывоподавления на основе оптико-электронных приборов [4–9].

В рамках выполнения проекта «Разработка научных основ построения системы предотвращения и локализации взрывов на потенциально опасных промышленных объектах» (грант РФФИ № 15-08-06719 а) одной из основных задач является определение характеристик оптического излучения в процессе развития горения метано-воздушных смесей.

© Лисаков С. А., Сидоренко А. И., Павлов А. Н., Сыпин Е. В., Леонов Г. В., 2016

На первом этапе работ была выполнена постановка задачи моделирования [10] и выполнено моделирование горения метано-воздушных смесей на начальной стадии развития [11]. В результате моделирования установлено, что фронт пламени на начальной стадии (от момента поджигания) развития имеет форму близкую к сферической. Под пламенем понимают зону горения в газовой фазе с видимым излучением. Таким образом, горение метановоздушной смеси происходит в режиме огненного шара, или в литературе также встречается формулировка о том, что пламя имеет конфигурацию в виде огненного шара. Горение происходит при давлении близком к атмосферному. При этом видимая скорость горения составляет 2.82 м/с, а нормальная скорость распространения пламени – 0.37 м/с. Значение температуры, полученной в результате моделирования равно 1933 °С, что хорошо согласуется с теоретической температурой горения метано-воздушной смеси, а также расчетными и экспериментальными данными (без учета тепловых потерь излучением), приведенными в литературе.

Для ламинарного горения стехиометрической метано-воздушной смеси ширина зоны горения составляет 1 мм. Поскольку радиус рассматриваемого огненного шара велик по сравнению с шириной зоны горения, то последней величиной пренебрегают, и волна реакции горения рассматривается как тепловой скачок (рис. 1).

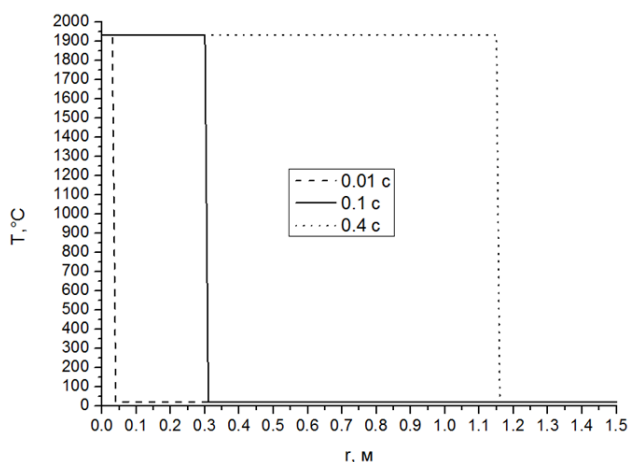


Рис. 1. Распределение температуры вдоль радиуса огненного шара в различные моменты времени

При выполнении моделирования в работе [11] не учитывался характер оптического излучения огненного шара, который будет рассматриваться в данной работе. Данные моделирования [11] о зависимости радиуса огненного шара от времени (рис. 2) и распределении температуры вдоль радиуса, позволят в дальнейшем определить характеристики оптического излучения огненного шара: спектральную энергетическую светимость, интегральную (по оптическому спектру) степень черноты, интегральную (по оптическому спектру) энергетическую освещенность на заданной площадке. Особенностью работы является то, что моделирование оптического излучения (с учетом его спектральных характеристик) выполняется для огненных шаров на начальной стадии развития (малые диаметры шаров).

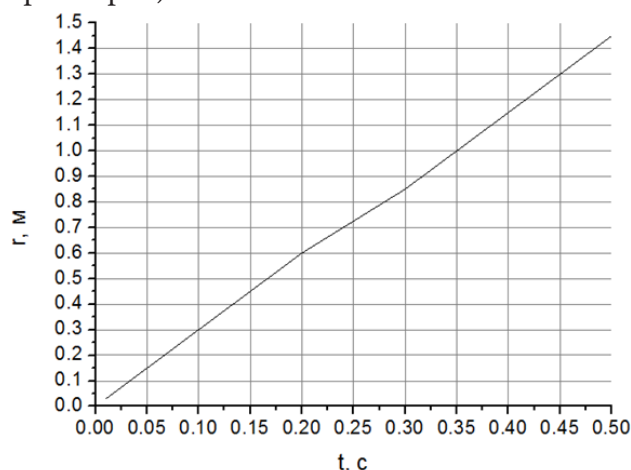


Рис. 2. Зависимость радиуса огненного шара от времени

В связи с вышеизложенным была сформулирована цель: выполнить моделирование оптического излучения пламени при горении метано-воздушных смесей на начальной стадии развития.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить основные аналитические зависимости для моделирования спектральной энергетической светимости пламени;
- выполнить расчет спектральной энергетической светимости пламени;
- рассчитать интегральную степень черноты огненного шара в зависимости от диаметра огненного шара;

– определить интегральную энергетическую освещенность в зависимости от расстояния до огненного шара без учета поглощения промежуточной среды;

– проверить адекватность модели на основе расчетных и экспериментальных данных других авторов.

### АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СВЕТИМОСТИ ПЛАМЕНИ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗВИТИЯ

Определим аналитические зависимости для расчета спектральной энергетической светимости огненного шара, интегральной степени черноты излучения огненного шара и интегральной энергетической освещенности.

При расчете оптического излучения принимается допущение о том, что горение является изотермическим по объему и имеет форму шара (огненный шар). Это предположение основывается на результатах предыдущих исследований [11] – горение метановоздушной смеси происходит в режиме огненного шара, и волна реакции горения рассматривается как тепловой скачок.

Уравнение переноса для спектральной энергетической яркости излучения  $\overline{L_e}(\lambda)$  в заданном направлении  $S$  для изотермического газа при постоянном коэффициенте поглощения газа по объему шара  $k(\lambda)$  имеет вид [12]:

$$\overline{L_e}(\lambda) = \overline{L_{e0}}(\lambda)e^{-k(\lambda)S} + \overline{L_{eb}}(\lambda)(1 - e^{-k(\lambda)S}),$$

где  $\overline{L_e}(\lambda)$  – спектральная энергетическая яркость излучения на выходе из однородной газовой среды с толщиной  $S$ , Вт/(м<sup>2</sup>·ср);  $\overline{L_{e0}}(\lambda)$  – спектральная энергетическая яркость излучения падающего в направлении  $S$  на однородную газовую среду Вт/(м<sup>2</sup>·ср);  $\overline{L_{eb}}(\lambda)(1 - e^{-k(\lambda)S})$  – спектральная энергетическая яркость излучения в направлении  $S$ , характеризующая собственное излучение однородной газовой среды Вт/(м<sup>2</sup>·ср);  $k(\lambda)$  – спектральный коэффициент поглощения газа, м<sup>-1</sup>;  $\lambda$  – длина волны, м.

В выражении (1)  $\overline{L_{eb}}(\lambda)$  – спектральная энергетическая яркость излучения абсолют-

но черного тела в направлении  $S$  (излучение распространяется внутри малого телесного угла  $d\Omega$ ), которая вычисляется по формуле Планка:

$$\overline{L_{eb}}(\lambda) = \frac{2C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)},$$

где  $T$  – температура, К;  $C_1 = 0,59544 \cdot 10^{-16}$ , Вт·м<sup>2</sup>;  $C_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$  м·К.

Излучение окружающей среды (метановоздушная смесь при нормальной температуре) не вносит существенный вклад в результирующее излучение, поэтому не рассматривается. Следовательно, в данной задаче рассматривается только излучение пламени (собственное излучение газовой среды), а падающее на газовую среду излучение не учитывается  $\overline{L_{e0}}(\lambda) = 0$ .

Таким образом, для изотермического шара с радиусом  $r$  спектральная энергетическая яркость излучения с поверхности  $\overline{L_{есф}}(\lambda)$  имеет вид [12, 13]:

$$\overline{L_{есф}}(\lambda) = \overline{L_{eb}}(\lambda) [1 - e^{-2k(\lambda)r \cos \beta}],$$

где  $\beta$  – угол между направлением распространения излучения и нормалью к поверхности шара  $\vec{n}$  (рис. 3).

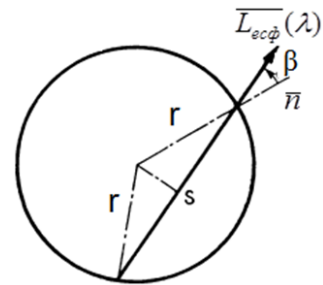


Рис. 3. К определению спектральной энергетической яркости излучения с поверхности огненного шара

Спектральная энергетическая светимость с поверхности огненного шара связана со спектральной энергетической яркостью соотношением [13]:

$$M_{есф}(\lambda) = \int \overline{L_{есф}}(\lambda) \vec{n} d\Omega.$$

Спектральная энергетическая светимость  $M_{есф}(\lambda)$  (Вт/м<sup>2</sup>), рассчитанная путем интегрирования энергетической яркости по телесному углу  $\Omega$ , описывается выражением [13]:

$$M_{\text{есф}}(\lambda) = M_{\text{еб}}(\lambda) \left[ 1 + \frac{2}{Dk(\lambda)} e^{-Dk(\lambda)} - \frac{2}{(Dk(\lambda))^2} (1 - e^{-Dk(\lambda)}) \right], \quad (1)$$

где  $D$  – диаметр огненного шара, м.

Спектральная энергетическая светимость (полусферическая) абсолютно черного тела  $M_{\text{еб}}(\lambda)$  рассчитывается по формуле Планка:

$$M_{\text{еб}}(\lambda) = \frac{2\pi C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)}. \quad (2)$$

Интегральная энергетическая светимость с поверхности шара, рассчитывается по формуле:

$$M_{\text{есф}} = \int_0^{\infty} M_{\text{есф}}(\lambda) d\lambda. \quad (3)$$

Интегральная степень черноты излучающего шара определяется как отношение рассчитанной энергетической светимости к энергетической светимости от абсолютно черного тела [12, 13]:

$$\varepsilon_{\text{сф}} = \frac{1}{\sigma T^4} \int_0^{\infty} M_{\text{еб}}(\lambda) \left[ 1 + \frac{2}{Dk(\lambda)} e^{-Dk(\lambda)} - \frac{2}{(Dk(\lambda))^2} (1 - e^{-Dk(\lambda)}) \right] d\lambda, \quad (4)$$

где  $\sigma = 5,6693 \cdot 10^{-8}$  – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Спектральный коэффициент поглощения  $k(\lambda)$  вычисляется с помощью информационной системы «Спектроскопия атмосферных газов». Система предоставляет доступ через Интернет к информации о спектрах поглощения атмосферных газов [14]. Основу базы данных системы составляют широко распространенные банки данных HITRAN [15] и GEISA-97 [16] для спектрального диапазона от микроволнового до ультрафиолетового.

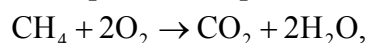
В основу расчета спектрального коэффициента поглощения  $k(\lambda)$  положен метод полинейного счета спектрального контура поглощения (распределение интенсивности поглощения в спектральной линии) веществ в газовой фазе, который представляет собой суммирование стандартных контуров поглощения изолированных спектральных линий (поглощение в изолированных линиях связа-

но с поглощением фотонов строго определенной длины волны).

Линии представляют собой колебательно-вращательные переходы молекул газа (поглощение фотона излучения происходит за счет дискретного перехода из некоторого энергетического состояния молекулы в состояние с большей энергией), сгруппированные в отдельные колебательные полосы (полосы с определенным интервалом длин волн соответствующие колебательному изменению энергии молекул).

Информационная система «Спектроскопия атмосферных газов» предоставляет спектры поглощения, верифицированные по экспериментальным данным, приведенным в литературе [14].

Расчет коэффициента поглощения выполнялся с учетом реакции горения вида:



при дозрывной концентрации метана в воздухе 9,5 %, в которой один объем метана взаимодействует с двумя объемами кислорода. В этом случае объемные доли продуктов горения  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  составляют в воздухе 9,5 и 19 % соответственно [3].

Спектральный коэффициент поглощения продуктов горения метана при температуре  $T = 2206$  К (1933 °С) и атмосферном давлении 101 КПа в диапазоне длин волн от 0.5 до 10 мкм, показан на рис. 4.

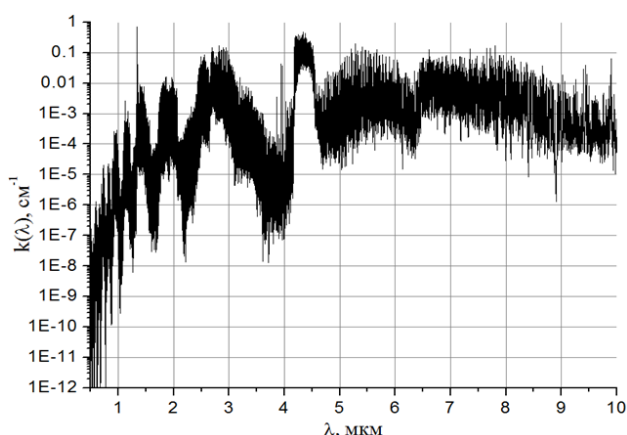


Рис. 4. Спектральный коэффициент поглощения продуктов горения метана при температуре  $T = 2206$  К и атмосферном давлении 101 КПа в диапазоне длин волн от 0.5 до 10 мкм

При выполнении моделирования необходимо выполнить расчет энергетической освещенности на элементарной площадке. Энергетическая освещенность определяется излучением пламени, пропусканием атмосферы на пути от пламени к элементарной освещаемой площадке и взаимным расположением площадки и огненного шара. Интегральная энергетическая освещенность  $E_{эпн}$  (Вт/м<sup>2</sup>) рассчитывается по формуле [12]:

$$E_{эпн} = M_{эсф} \tau_c F, \quad (5)$$

где  $M_{эсф}$  – интегральная энергетическая светимость на сферической поверхности огненного шара, Вт/м<sup>2</sup>;  $\tau_c$  – интегральный коэффициент пропускания промежуточной среды;  $F$  – угловой коэффициент, определяющий освещенность элементарной площадки излучением со сферической поверхности огненного шара.

При расчетах энергетической освещенности ослабление излучения атмосферой не учитывалось  $\tau_c = 1$ . Такое допущение возможно, поскольку предполагается, что промежуточная среда представляет собой сухой воздух и значения коэффициента пропускания для толщины слоя 100 м составляет не менее  $\tau_c = 0.95$  [13]. Однако в дальнейшей работе предполагается выполнить расчет с учетом ослабления излучения промежуточной средой с параметрами характерными для атмосферы выработки угольной шахты.

Угловой коэффициент  $F$  определяется для элементарной площадки  $dA$  и излучающей сферы радиусом  $r$  (рис. 5). Угол  $\alpha$  – угол между нормалью  $\bar{n}$  к площадке  $dA$  и прямой, соединяющей центр площадки  $dA$  с центром сферы;  $h$  – расстояние от площадки  $dA$  до центра сферы [17].

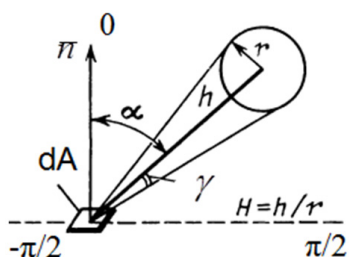


Рис. 5. Определение углового коэффициента  $F$  для элементарной площадки  $dA$  и сферы радиусом  $r$

При условии  $-\pi/2 \leq (\alpha + \gamma) \leq \pi/2$ , угловой коэффициент рассчитывается согласно формуле [17]:

$$F = \frac{\cos \alpha}{H^2}, \quad (6)$$

где  $H = h/r$  – безразмерный параметр [17].

Зависимость углового коэффициента  $F$  от безразмерного параметра  $H$  для  $0 \leq \alpha \leq \pi/2$  показана на рис. 6.

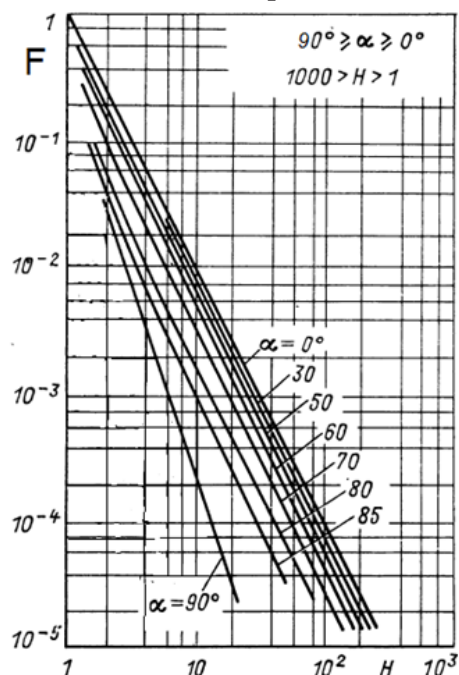


Рис. 6. Зависимость углового коэффициента  $F$  от безразмерного параметра  $H$

На основе приведенных выше аналитических зависимостей (1)–(6) была разработана программа для ЭВМ и проведено моделирование оптического излучения пламени на ранней стадии развития.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАМЕНИ

Спектральная энергетическая светимость огненного шара с диаметрами 0,2, 1 и 3 м, полученная в результате моделирования, представлена на рис. 7.

Излучение огненного шара сосредоточено в полосах поглощения паров воды и двуокиси углерода. Максимумы энергии излучения соответствуют следующим длинам волн для углекислого газа – 1,34, 4,26, 7,45 мкм, для паров воды – 1,29, 1,87, 2,66, 2,74 и 6,27 мкм.

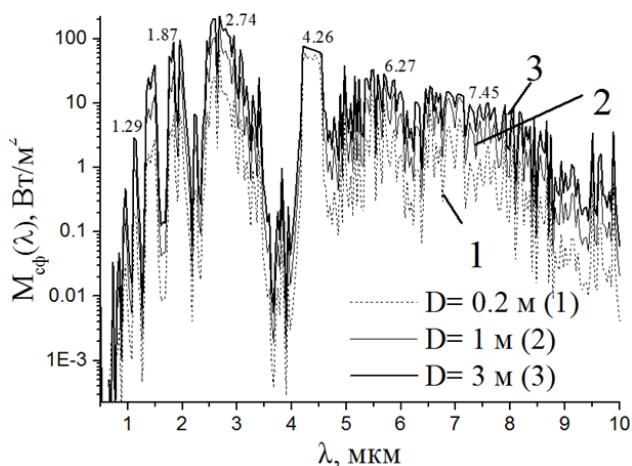


Рис. 7. Спектральная энергетическая светимость огненного шара с диаметрами 0,2, 1 и 3 м

Спектральные диапазоны, в которых находятся полосы излучения продуктов горения, определяются полосами спектрального коэффициента поглощения, данные о котором приняты в качестве исходных для моделирования [18].

С увеличением диаметра характер распределения спектральной энергетической светимости огненного шара по длинам волн остается практически неизменным.

Интегральная энергетическая светимость огненного шара в зависимости от диаметра, полученная в результате моделирования представлена на рис. 8. На рис. 8 также приведены экспериментальные данные других авторов об интегральной энергетической светимости для огненных шаров с различными диаметрами.

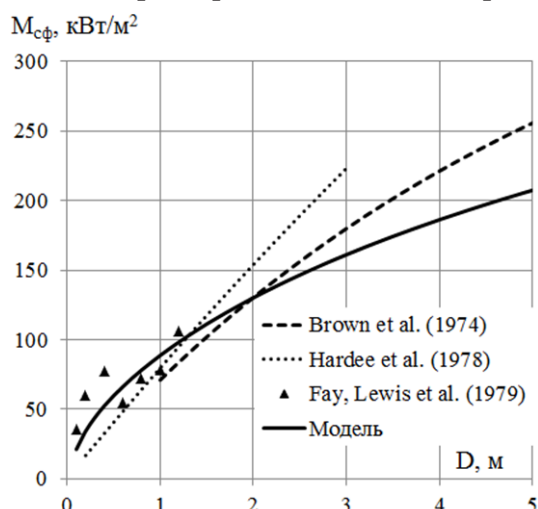


Рис. 8. Интегральная энергетическая светимость огненного шара в зависимости от диаметра

Из данных, представленных на рис. 8 видно, что значения интегральной энергетической светимости находятся в диапазоне от 20 до 210 кВт/м<sup>2</sup> для огненных шаров с диаметрами от 0.1 до 5 м и хорошо согласуется с данными других исследователей. Зависимость интегральной энергетической светимости от диаметра огненного шара имеет экспоненциальный характер.

Интегральная степень черноты в зависимости от диаметра огненного шара приведена на рис. 9.

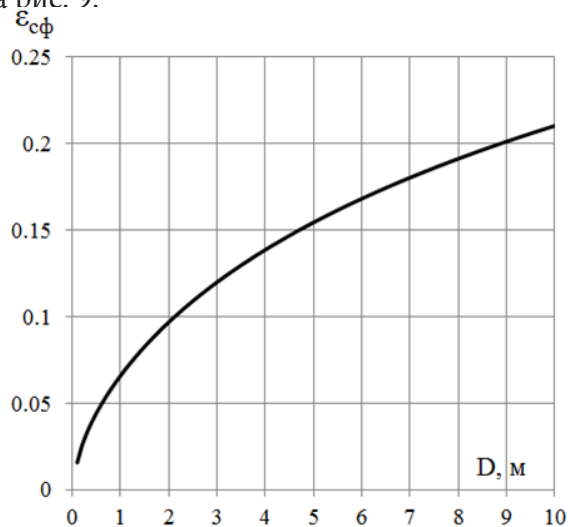


Рис. 9. Интегральная степень черноты огненного шара в зависимости от диаметра очага

Интегральная степень черноты огненного шара изменяется в диапазоне значений от 0.015 до 0.21 для значений диаметров шаров от 0.1 до 10 м. Степень черноты экспоненциально возрастает с увеличением диаметра огненного шара.

Энергетическая освещенность  $E_{ен}$  в зависимости от расстояния до огненного шара и угла  $\alpha$  для  $D$  равного 0,2, 1 и 3 м приведена рис. 10.

Значения энергетической светимости, а также энергетической освещенности могут быть использованы для проведения энергетического расчета приборов контроля возникновения пламени на ранней стадии развития.

Адекватность моделирования излучения горения проверяется при сравнении с интегральными характеристиками излучения горения огненных шаров, которые рассчи-

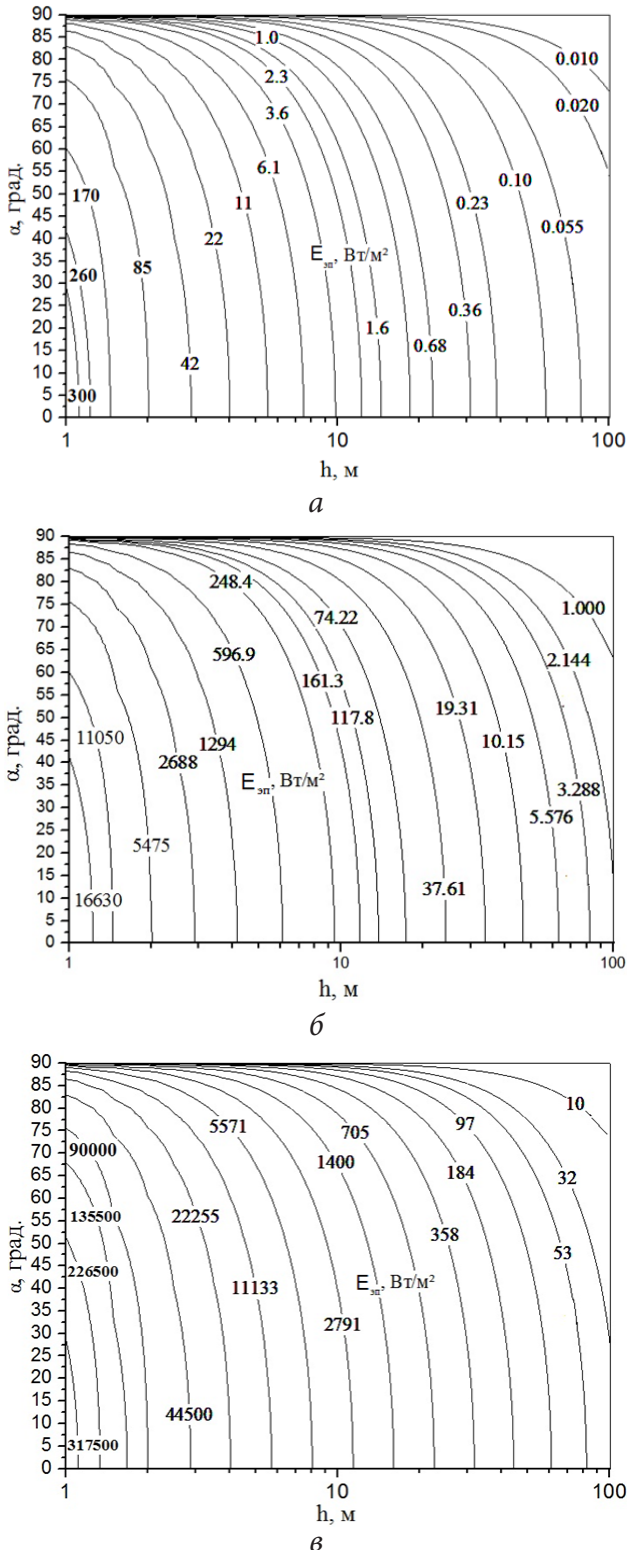


Рис. 10. Энергетическая освещенность  $E_{\text{эсп}}$ , Вт/м<sup>2</sup> в зависимости от расстояния до огненного шара и угла  $\alpha$  для  $D$  равного 0.2 (а), 1 (б) и 3 (в) м

тываются по методам, приведенным в государственных стандартах, а также с литературными данными.

Было проведено сопоставление данных моделирования с данными, приведёнными в нормативной документации [19, 20]. Энергетическая светимость с поверхности пламени пожара пролива сжиженного природного газа для диаметра огненного шара 10 м составляет 220 кВт/м<sup>2</sup>, при этом указывается, что для крупномасштабных огненных шаров (более 10 м) энергетическая светимость определяется на основе экспериментальных данных или принимается равной 350 кВт/м<sup>2</sup>. Согласно данным моделирования для огненного шара диаметром 10 м энергетическая светимость составила 283 кВт/м<sup>2</sup>. Таким образом, расчетное значение является сопоставимым со значением для пожара пролива. Значение энергетической светимости для огненных шаров 350 кВт/м<sup>2</sup> превышает расчетное 283 кВт/м<sup>2</sup>, поскольку приведено для диаметров превышающих 10 м, что подтверждается экспериментальными данными Джонсон [21].

В источниках [22, 23, 24] приводится эмпирическая зависимость для расчета энергетической светимости с поверхности огненных шаров горения метано-воздушных смесей основанная на законе Бугера:

$$M_{\text{сф}} = M_b(1 - e^{-kD}),$$

где  $M_b = \sigma T^4$  – максимальная энергетическая светимость с поверхности рассчитываемый по закону Стефана-Больцмана, Вт/м<sup>2</sup>,  $D$  – диаметр огненного шара;  $k$  – интегральный коэффициент поглощения, м<sup>-1</sup>.

В работе Брауна [22] для расчета энергетической светимости принимается интегральный коэффициент поглощения равный  $k = 0.18$  м<sup>-1</sup> и значение максимальной энергетической светимости излучения равно  $Mb = 431$  кВт/м<sup>2</sup>.

В работе Харди [23] для расчета энергетической светимости принимается интегральный коэффициент поглощения равный  $k = 0.07$  м<sup>-1</sup>, а значение температуры огненного шара  $T = 2148$  К.

В работе Фей [24] для малых огненных шаров (20–70 см) интегральный коэффициент поглощения находится в пределах  $k = 0.1...0.3$  м<sup>-1</sup>, а значение температуры огненного шара составляет  $T = 2000$  К.

Эмпирические зависимости для расчета энергетической светимости в зависимости от диаметра огненного шара сопоставлены с результатами моделирования (рис. 8). Результаты моделирования для малых огненных шаров (0,1–1,2 м) хорошо согласуются с данными Фей, Льюис [24].

Данные моделирования хорошо согласуются с данными Харди [23] для диаметров от 0,5 до 2 м, поскольку эмпирическая зависимость была получена измерением энергетической светимости огненных шаров с диаметрами 1,5 и 2,2 м.

Для диаметров более 2,5 м данные моделирования лучшим образом согласуются с данными Браун [22], поскольку они были получены для огненных шаров с диаметрами от 2 до 6 м.

Данные об интегральной степени черноты огненных шаров, образующихся при горении метана, представлены в источниках [13, 23, 24]. Степень черноты возрастает с увеличением оптической толщины  $k \cdot D$  огненного шара, и ее значение стремится к единице [13, 24]. Это характерно как для результатов получаемых расчетным путем, так и для экспериментальных данных. Значения степени черноты, полученные при моделировании, хорошо согласуются с экспериментальными результатами, приведёнными в литературе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы проведено моделирование излучения пламени при горении метано-воздушных смесей на начальной стадии развития.

Решены следующие задачи:

- определены основные аналитические зависимости для моделирования спектральной энергетической светимости пламени;
- выполнен расчет спектральной энергетической светимости пламени;
- рассчитана интегральная степень черноты огненного шара в зависимости от диаметра огненного шара;
- определена интегральная энергетическую освещенность в зависимости от расстоя-

ния до огненного шара без учета поглощения промежуточной среды;

- проверена адекватность модели на основе расчетных и экспериментальных данных других авторов;

Максимумы спектральной энергетической светимости излучения пламени соответствуют длинам волн для углекислого газа – 1.34, 4.26, 7.45 мкм, для паров воды – 1.29, 1.87, 2.66, 2.74 и 6.27 мкм.

Значения интегральной энергетической светимости находятся в диапазоне от 20 до 210 кВт/м<sup>2</sup> для огненных шаров с диаметрами от 0.1 до 5 м и согласуются с экспериментальными данными других авторов.

Интегральная степень черноты огненного шара изменяется в диапазоне значений от 0.015 до 0.21 для значений диаметров очагов от 0.1 до 10 м.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-08-06719 а.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костеренко В. Н. Факторы, оказывающие влияние на возникновение взрывов газа метана и угольной пыли в шахтах / В. Н. Костеренко, А. Н. Тимченко // Горный информационно-аналитический бюллетень. № 7. – 2011. С. 368-377.
2. Аварии в угольной промышленности // Промышленная безопасность. 30.07.2015. – Режим доступа: <http://prom-nadzor.ru/content/avarii-v-ugolnoy-promyshlennosti>.
3. Айруни А. Т. Взрывоопасность угольных шахт / А. Т. Айруни, Ф. С. Клебанов, О. В. Смирнов. – М. : Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 264 с.
4. Pavlov A. N. Optoelectronic system for determination of ignition center three-dimensional coordinates at initial stage / A. N. Pavlov, E. V. Sypin // 9th International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM'2010: Conference proceedings. – Novosibirsk : NSTU, 2010, P. 417–419.



5. Пирометрический датчик с оптическими затворами для определения двухмерных координат очага взрыва / А. И. Сидоренко [и др.] // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2013. – № 1.1. – С. 98–104.
6. Применение численного моделирования для решения задачи определения пространственных координат очага возгорания многоточечной оптико-электронной системой / С. А. Лисаков, М. Н. Зырянова, Е. В. Сыпин, А. Н. Павлов // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2015. – № 1. – С. 43–50.
7. Программно-аппаратный комплекс для управления многоточечной системой определения координат очага возгорания / С. А. Лисаков, А. В. Кураев, А. Н. Павлов, Е. В. Сыпин // Ползуновский вестник. – 2014. – № 2. – С. 179–182.
8. Лабораторный образец быстродействующего многопорогового прибора контроля аварийных и предаварийных ситуаций во взрывоопасной атмосфере / Е. С. Повернов [и др.] // Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – С. 172–178.
9. *Tupikina N. Y.* Development of the Testing Technique of Main Parameters for Two Spectral Ratios Optical-Electronic Device / N. Y. Tupikina, E. V. Sypin, S. A. Lisakov, A. N. Pavlov, G. V. Leonov // 16th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2015: Conference proceedings. – Novosibirsk : NSTU, 2015. – P. 325–329.
10. Прикладное моделирование горения углеводородных смесей / А. И. Сидоренко, С. А. Лисаков, А. Н. Павлов, Е. В. Сыпин, Г. В. Леонов // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – №1. – С. 93–99.
11. Компьютерное моделирование горения метано-воздушных смесей на начальной стадии развития / С. А. Лисаков, А. И. Сидоренко, А. Н. Павлов, Е. В. Сыпин, Г. В. Леонов // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. (Принято в печать).
12. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. – М. : Мир, 1975.
13. Баротермическое действие взрыва: ударная волна и термическое поражение / Д. О. Морозов, К. Л. Степанов // Горение и плазмохимия. – 2013. – том 11. – № 1. – С. 57–70.
14. *Михайленко С. Н.* Информационно-вычислительная система «Спектроскопия атмосферных газов». Структура и основные функции / С. Н. Михайленко, Ю. Л. Бабилов, В. Ф. Головкин // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 18, № 09. – С. 765–776.
15. *Rothman L. S., et al.* The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer., 110, 533–572 (2009).
16. *Jacquinet-Husson N., Arie E, Ballard J., Barbe et al.* The 1997 spectroscopic GEISA databank, JQSRT, 62, 205-254 (1999).
17. *Блох А. Г.* Теплообмен излучением: Справочник / А. Г. Блох, Ю. А. Журавлев, Л. Н. Рыжков. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
18. Handbook of Infrared Radiation from Combustion Gases // Coulard J. A., B. Thompson etc. NASA S-3080. Washington: 1973.
19. ГОСТ Р 12.3.047-2012. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. – Введ. 2014-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 86 с.
20. Сборник методик по прогнозированию возможных аварий, катастроф, стихийных бедствий в РСЧС (книги 1 и 2). – М. : МЧС России, 1994.
21. *Johnson D. M., Pritchard M. J.* Large-scale experimental study of boiling liquid expanding vapour explosions (BLEVEs). 14th Int. LNG/LPG Conference & Exhibition, Gastech, 1990, pp. 1–30.
22. *Brown L. E., Wesson H. R. and Welker J. R.* (1974). Predict LNG fire radiation. Hydrocarbon Processing. pp. 141–143.
23. *Hardee H. C., Lee D. O., Benedick W. B.* Thermal hazards from LNG fireballs. Comb. Sci. and Techn., 1978. – v. 17. – pp. 189–197.
24. *Fay J. A., Desgroseilliers G. J., Lewis D. H.* Radiation from burning hydrocarbon clouds. Comb. Sci. and Techn., 1979. – v. 20. – pp. 141–151.

25. Якуш С. Е. Гидродинамика и горение газовых и двухфазных выбросов в открытой атмосфере дис. ... доктора физико-математических наук / С. Е. Якуш. – Москва, 2000. – 336 с.

**Лисаков С. А.** – инженер кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И. И. Ползунова.  
Тел.: (3854) 432450  
E-mail: foxlsa@mail.ru

**Сидоренко А. И.** – канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И. И. Ползунова.  
Тел.: (3854) 432450  
E-mail: sai@bti.secna.ru

**Павлов А. Н.** – канд. техн. наук, доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И. И. Ползунова.  
Тел.: (3854)432450  
E-mail: pan@bti.secna.ru

**Сыпин Е. В.** – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И. И. Ползунова.  
Тел.: (3854)432450  
E-mail: sev@bti.secna.ru

**Леонов Г. В.** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И. И. Ползунова.  
Тел.: (3854)432450  
E-mail: leonov@bti.secna.ru

**Lisakov S. A.** – engineer at the Chair of Methods and Means of Measurement and Automation of Biysk technological institute.  
Tel.: 8(3854)43-24-50  
E-mail: foxlsa@mail.ru

**Sidorenko A. I.** – candidate of Technical Science, associate professor at the Char of Methods and Means of Measurement and Automation of Biysk technological institute.  
Tel.: 8(3854)43-24-50  
E-mail: sai@bti.secna.ru

**Pavlov A. N.** – assistant professor at the Char of Methods and Means of Measurement and Automation of Biysk technological institute.  
Tel.: (3854)432450  
E-mail: pan@bti.secna.ru

**Sypin E. V.** – candidate of Technical Science, associate professor, professor at the Chair of Methods and Means of Measurement and Automation of Biysk technological institute.  
Tel.: 8(3854)43-24-50  
E-mail: sev@bti.secna.ru

**Leonov G. V.** – professor, Biysk Technological Institute.  
Tel.: (3854)432450  
E-mail: leonov@bti.secna.ru