

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.93>

УДК 614.841.334.2:517.3

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОБЛУЧЕННОСТИ ПРИ РАСЧЕТЕ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ РАЗРЫВОВ МЕЖДУ ЗДАНИЯМИ С ДВУСКАТНЫМИ КРОВЛЯМИ, ВЫПОЛНЕННЫМИ ИЗ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Пастухов С.М., Платонов А.С., Тетерюков А.В., Дробыш А.С.

Цель. Разработать математическую модель оценки углового коэффициента облученности, учитывающую треугольную форму излучающей поверхности и взаимное расположение относительно принимающей поверхности.

Методы. Разработка уравнений для определения углового коэффициента облученности опиралась на результаты анализа экспериментальных исследований и существующих подходов к определению величины противопожарных разрывов между зданиями и сооружениями, закон Ламберта для определения количества энергии, передаваемой от излучающей к принимающей поверхности.

Результаты. Для параллельных излучающей и принимающей поверхностей, размещенных произвольно относительно друг друга, получено аналитическое выражение, позволяющее определить угловой коэффициент облученности элемента принимающей поверхности излучающей поверхностью, имеющей форму произвольного многоугольника.

Область применения исследований. Определение величины противопожарных разрывов между зданиями и сооружениями с учетом индивидуальных особенностей рассчитываемых объектов – двускатные кровли, выполненные из горючих материалов.

Ключевые слова: противопожарный разрыв, геометрические параметры пламени, угловой коэффициент облученности, горючие кровельные материалы.

(Поступила в редакцию 26 января 2021 г.)

Введение

Наибольшую сложность при расчете лучистого теплообмена между двумя поверхностями представляет нахождение углового коэффициента облученности φ . Данный коэффициент показывает отношение потока излучения от поверхности одного тела на поверхность другого тела к полному потоку собственного излучения, выходящему со всей поверхности первого тела по возможным направлениям в пределах полусферического телесного угла, данный угол является частью пространства, ограниченного некоторой конической поверхностью. В качестве частных случаев телесного угла рассматривают трехгранные и многогранные углы [1; 2].

Таким образом, угловой коэффициент облученности φ представляет собой геометрический параметр, который зависит от формы и размера поверхностей, при этом данный коэффициент рассчитывают для приведенных поверхностей, у которых контур и геометрические размеры близки к реальным размерам пламени. Угловой коэффициент также зависит от взаимного расположения поверхностей в пространстве относительно друг друга (рис. 1) [3].

Из схемы, представленной на рисунке 1, следует, что принимающая F_1 и излучающая F_2 поверхности лежат на произвольно расположенных плоскостях, на расстоянии S между геометрическими центрами поверхностей, под углами β_1 и β_2 между отрезком, соединяющим эти центры, и нормальными n_1 и n_2 к поверхностям. При этом элемент dF_2 поверхности F_2 из геометрического центра элемента dF_1 поверхности F_1 виден под телесным углом $d\omega_1$ (рис. 1) [4].

Сложность определения углового коэффициента облученности заключается в том, что излучающая поверхность по отношению к принимающей поверхности может располагаться под любым углом наклона и на любом расстоянии. В общем случае угловой коэффициент облученности элемента поверхности dF_1 поверхностью F_2 определяется по формуле [5–7]:

$$\varphi = \int_{F_2} \frac{\cos \beta_1 \cdot \cos \beta_2}{\pi S^2} dF_2. \quad (1)$$

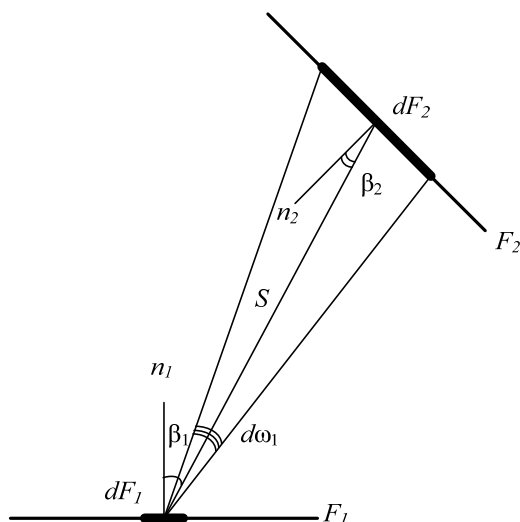
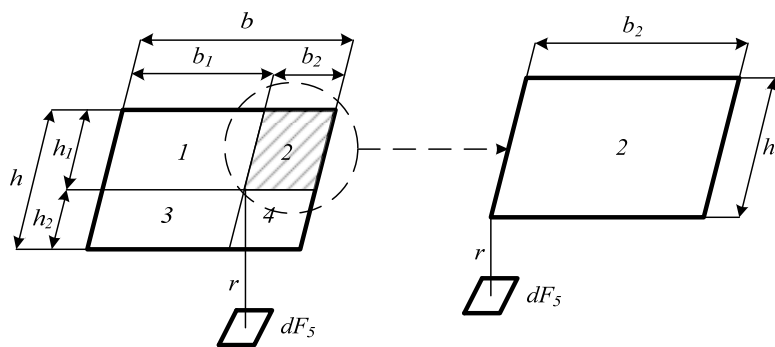


Рисунок 1. – Схема лучистого теплообмена между поверхностями dF_1 и dF_2

Задача определения величины углового коэффициента облученности значительно упрощается, если телесный угол, под которым элемент dF_1 видит излучающую поверхность, в пересечении с параллельной элементу dF_2 поверхностью образует фигуру, состоящую из прямоугольников [8]. Принимая излучающую поверхность в виде прямоугольника, ряд методик [9–12] по определению противопожарных разрывов между зданиями упрощает расчет по определению углового коэффициента облученности. Однако тем самым они не учитывают индивидуальных особенностей зданий, что приводит к получению неточных значений, влияющих на суммарную плотность теплового потока. Таким образом, актуальной задачей является разработка математической модели определения углового коэффициента облученности, учитывающей различные формы излучающей поверхности и взаимное расположение объектов относительно друг друга.

Анализ методик. В существующих методиках по определению противопожарных разрывов присутствуют ограничения по выбору формы и размеров излучающей поверхности, что напрямую влияет на величину углового коэффициента облученности. В общем случае методики ТКП EN 1991-1-2¹, СТБ 11.05.03-2010², М.Я. Ройтмана [9], D. Drysdale [6], В. Karlsson и G.J. Quintiere [10], E. Carlsson [11] и В.Ф. Кудаленкина [12] рассматривают излучающую поверхность как прямоугольник (рис. 2), т.к. форма и размеры пламени в реальных условиях не являются постоянными величинами.



a – суммарный угловой коэффициент облученности от излучающей поверхности

б – частный случай углового коэффициента облученности от части излучающей поверхности

Рисунок 2. – Схема к определению углового коэффициента облученности от излучающей поверхности в виде прямоугольника

¹ Еврокод 1. Воздействие на конструкции. Часть 1-2. Общие воздействия. Воздействия для определения огнестойкости: ТКП EN 1991-1-2-2009. Введ. 01.01.10. – Минск: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2010. – 48 с.

² Система стандартов пожарной безопасности. Пожарная безопасность технологических процессов. Методы оценки и анализа пожарной опасности. Общие требования: СТБ 11.05.03-2010. – Введ. 28.04.10. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2010. – 76 с.

Таким образом, излучающая поверхность разбивается на 4 прямоугольника [1], в зависимости от расположения геометрического центра принимающей поверхности, после чего определяется угловой коэффициент облученности от каждого прямоугольника (рис. 2б) на принимающую поверхность по формуле 2:

$$\varphi_{2-5} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{b_2}{\sqrt{r^2 + b_2^2}} \arctg \frac{h_1}{\sqrt{r^2 + b_2^2}} + \frac{h_1}{\sqrt{r^2 + h_1^2}} \arctg \frac{b_2}{\sqrt{r^2 + h_1^2}} \right), \quad (2)$$

где b_2 – ширина второго прямоугольника (рис. 2б), м; h_1 – высота прямоугольника, м; r – расстояние между излучающей и принимающей поверхностями, м.

Суммарный угловой коэффициент облученности (рис. 2а) определяется по формуле 3 [9]:

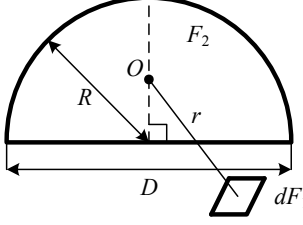
$$\varphi = \varphi_{1-5} + \varphi_{2-5} + \varphi_{3-5} + \varphi_{4-5}. \quad (3)$$

Анализ методик по определению плотности теплового потока при лучистом теплообмене показал, что в расчетах используют различные формы излучающей поверхности. Методики В. Karlsson и G.J. Quintiere [10] и В.Ф. Кудаленкина [12] позволяют рассчитывать угловой коэффициент облученности от излучающих площадок следующих форм: треугольник, трапеция, сектор, полукруг и круг. В таблице 1 приведен анализ форм и расчетные схемы по определению углового коэффициента облученности согласно существующим методикам [9–12].

Таблица 1. – Приведенные формы излучающих поверхностей

№ п/п	Форма и размещение излучающей поверхности	Описание и формула по определению углового коэффициента облученности
1		Излучающая F_2 и принимающая dF_1 поверхности параллельны и удалены на расстояние r (м) друг от друга. F_2 – равнобедренный треугольник с основанием D (м) и высотой h (м). Проекция геометрического центра принимающей поверхности dF_1 расположена посередине основания D (точка O) [12]. $\varphi_{2-1} = \frac{hD}{\pi a} \left(\arctg \frac{2h^2}{a} + \arctg \frac{D^2}{2a} \right), \quad \text{где } a = \sqrt{4h^2r^2 + D^2r^2 + h^2D^2} \quad (4)$
2		Излучающая F_2 и принимающая dF_1 поверхности параллельны и удалены на расстояние r (м) друг от друга. F_2 – равнобедренный треугольник с основанием D (м) и высотой h (м). Проекция геометрического центра принимающей поверхности dF_1 расположена в геометрическом центре излучающей поверхности (точка O) [12]. $\varphi_{2-1} = \frac{2hD}{\pi a} \left(\arctg \frac{4h^2}{a} + \arctg \frac{3D^2 + 4h^2}{2a} \right) + \frac{h}{\pi\sqrt{9r^2 + h^2}} \arctg \frac{3D}{2\sqrt{9r^2 + h^2}}, \quad (5)$ где $a = \sqrt{36r^2h^2 + 9r^2D^2 + 4h^2D^2}$
3		Излучающая F_2 и принимающая dF_1 поверхности параллельны и удалены на расстояние r (м) друг от друга. F_2 – равнобедренная трапеция с нижним основанием D (м) и высотой h (м). Боковая сторона и нижнее основание трапеции образуют угол α . Проекция геометрического центра принимающей поверхности dF_1 расположена посередине основания D (точка O) [12]. $\varphi_{1-2} = \frac{h}{\pi a} \arctg \frac{D \operatorname{tg} \alpha - 2h}{a} + \frac{D \sin \alpha}{\pi b} \left(\arctg \frac{2h - D \sin \alpha \cos \alpha}{b \sin \alpha} + \arctg \frac{D \cos \alpha}{b} \right), \quad (6)$ где $a = \sqrt{r^2 + h^2}$, $b = \sqrt{4r^2 + D^2 \sin^2 \alpha}$

Продолжение таблицы 1

№ п/п	Форма и размещение излучающей поверхности	Описание и формула по определению углового коэффициента облученности
4		<p>Излучающая F_2 и принимающая dF_1 поверхности параллельны и удалены на расстояние r (м) друг от друга. F_2 – сектор с центром точке O и центральным углом α (рад), ограниченный двумя радиусами R (м). Проекция геометрического центра принимающей поверхности dF_1 расположена в точке O [12].</p> $\varphi_{1-2} = \frac{R^2 \alpha}{2\pi(r^2 + R^2)} \quad (7)$
5		<p>Излучающая F_2 и принимающая dF_1 поверхности параллельны и удалены на расстояние r (м) друг от друга. F_2 – полукруг с хордой D (м), равной двум радиусам R (м). Проекция геометрического центра принимающей поверхности dF_1 расположена в центре тяжести полукруга F_2 (точка O) [10].</p> $\varphi_{1-2} = \frac{0,738R^2}{r^2 + 1,18R^2} + \frac{0,135R}{a} \arctg \frac{R}{a}, \quad \text{где } a = \sqrt{r^2 + 0,181R^2} \quad (8)$
6		<p>Излучающая F_2 и принимающая dF_1 поверхности параллельны и удалены на расстояние r (м) друг от друга. F_2 – круг с диаметром D, м. Проекция геометрического центра принимающей поверхности dF_1 расположена в центре круга F_2 (точка O) [11].</p> $\varphi_{1-2} = \frac{D^2}{4r^2 + D^2} \quad (9)$

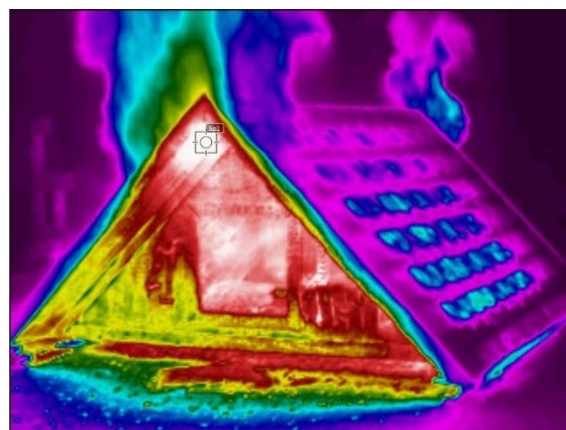
Анализ приведенных в таблице 1 форм излучающих поверхностей и зависимостей по определению углового коэффициента облученности показал следующие недостатки существующих методик [9–12]: рассматриваются только частные случаи, при условии, что проекция принимающей поверхности точно определена по отношению к излучающей поверхности; случаи, представленные в таблице 1, крайне редко встречаются ввиду индивидуальных особенностей каждого здания или сооружения [3].

Поскольку угловой коэффициент облученности является геометрическим параметром, при наличии универсальной математической модели от соответствующей формы излучающей поверхности становится возможным использовать данную модель в любой методике по определению противопожарных разрывов между зданиями и сооружениями.

Одним из проблемных вопросов при расчете противопожарных разрывов между индивидуальными жилыми домами является определение углового коэффициента облученности от двускатной кровли, выполненной из горючих материалов. Существующие методики [9–12] позволяют определять данный параметр, принимая излучающую поверхность только в качестве прямоугольника, при этом ширина пламени принимается равной длине фасада, а высота – как геометрическая высота здания до конька крыши. Указанное допущение значительно увеличивает расчетную площадь излучающей поверхности.

С целью уточнения форм и размеров излучающей поверхности были проведены натурные экспериментальные исследования в соответствии с методикой [13]. При горении экспериментального фрагмента двускатной кровли, выполненного из горючих материалов, посредством тепловизионной съемки было установлено, что излучающая поверхность от фронтона двускатной кровли с размером в плане $1,5 \times 3$ м имеет форму треугольника, однако геометрические размеры излучающей поверхности, в частности высота, превышает значение высоты фронтона экспериментального фрагмента (рис. 3).

Для проведения сравнительного анализа величины углового коэффициента облученности и площади излучающей поверхности определялись по существующим методикам [9; 12], т.к. они позволяют рассчитывать критическую плотность теплового потока от кровель, выполненных из горючих материалов. Результаты расчетов приведены в таблице 2.



a – фото излучающей поверхности

б – тепловизионная съемка излучающей поверхности

Рисунок 3. – Фрагмент двускатной кровли на 17-й мин натурального эксперимента по определению геометрических параметров излучающей поверхности

Таблица 2. – Результаты расчета углового коэффициента облученности

№ п/п	Автор методики	Геометрические параметры излучающей поверхности	Площадь излучающей поверхности, S , м ²	Угловой коэффициент облученности, φ
1	М.Я. Ройтман [9]	Форма пламени приводится к прямоугольной форме (рис. 2): $b = 3$ м; $h = 1,5$ м. Расчет осуществляется по формуле (2)	4,5 м ²	0,080
2	В.Ф. Кудаленкин [12]	Форма пламени приводится к треугольной форме (поз. 2 табл. 1), $b = 3$ м; $h = 1,5$ м. Расчет осуществляется по формуле (5)	2,25 м ²	0,076

После обработки экспериментальных данных, полученных посредством тепловизионной съемки фронтона экспериментального образца, выяснилось, что максимальная фактическая площадь излучающей поверхности была достигнута на 17-й мин экспериментального исследования и составила 4,12 м² (рис. 4).

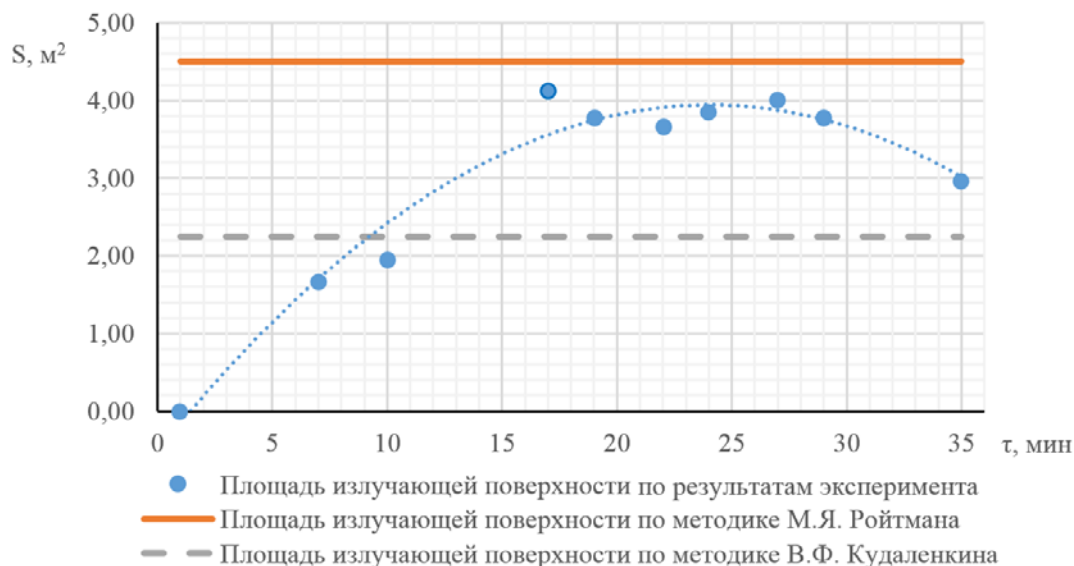


Рисунок 4. – Изменение площади излучающей поверхности при проведении экспериментальных исследований

При анализе полученных значений установлено, что при расчете по методике М.Я. Ройтмана [9] геометрические параметры излучающей поверхности и, как следствие, ее площадь (4,5 м²) превышают реальные значения, полученные при проведении эксперимен-

тальных исследований ($4,12 \text{ м}^2$). Определение размеров излучающей поверхности по методике В.Ф. Кудаленкина [12] для зданий и сооружений с кровлями, выполненными из горючих материалов, происходит по аналогичным условиям, описанным ранее. Вместе с тем методика [12] позволяет определять угловой коэффициент облученности от излучающей поверхности в форме равнобедренного треугольника (поз. 1–2 табл. 1), однако в данной методике не предусмотрена вариативность взаимного расположения с принимающей поверхностью, а площадь излучающей поверхности принимается равной площади фасада ($2,25 \text{ м}^2$), что приводит к заниженным значениям по сравнению с экспериментальными данными ($4,12 \text{ м}^2$).

На основании вышеизложенного подтверждается актуальность разработки математической модели по определению углового коэффициента облученности, которая позволит рассчитывать излучающие поверхности различных форм с учетом их взаимного расположения относительно друг друга.

Построение модели. Для решения поставленной задачи были приняты следующие допущения:

- проекция принимающей поверхности на излучающую может располагаться не только в вершинах или геометрических центрах рассматриваемых фигур;
- излучающая поверхность может иметь различную форму, включая произвольный треугольник и трапецию.

Таким образом, была разработана универсальная схема взаимного расположения излучающей и принимающей поверхностей, ограниченная шестью линиями, которая позволяет рассчитать угловой коэффициент облученности от любого многоугольника (рис. 5).

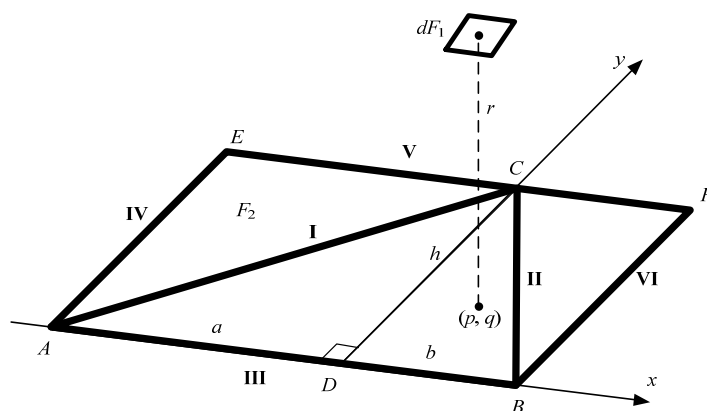


Рисунок 5. – Схема взаимного расположения излучающей и принимающей поверхностей

На примере произвольной треугольной излучающей поверхности рассмотрим вывод формулы по определению углового коэффициента облученности. В соответствии с принятыми допущениями имеем: излучающая поверхность – треугольник ACB , с основанием AB , высотой $CD = h$, проекциями боковых сторон на основание $AD = a$ и $DB = b$; центр проекции принимающей поверхности лежит в точке с координатами (p, q) ; начало координат совпадает с точкой D . Таким образом, отрезки I–III задаются формулами:

$$\text{I (AC): } y = h + \frac{h}{a}x, \text{ где } x \text{ изменяется от } -a \text{ до } 0; \quad (10)$$

$$\text{II (CB): } y = h - \frac{h}{b}x, \text{ где } x \text{ изменяется от } 0 \text{ до } b; \quad (11)$$

$$\text{III (BA): } y = 0, \text{ где } x \text{ изменяется от } b \text{ до } -a. \quad (12)$$

При этом точки имеют следующие координаты: $A(-a; 0)$, $B(b; 0)$, $C(0; h)$. После переноса начала координат в центр проекции принимающей поверхности с координатами (p, q) (рис. 6) формулы (10)–(13) примут вид:

$$\text{I (AC): } Y = h - q + \frac{h}{a} \cdot p + \frac{h}{a} \cdot X, \text{ где } X \text{ изменяется от } -a-p \text{ до } -p; \quad (13)$$

$$\text{II (CB): } Y = h - q - \frac{h}{b} \cdot p - \frac{h}{b} \cdot X, \text{ где } X \text{ изменяется от } -p \text{ до } b-p; \quad (14)$$

$$\text{III (BA): } Y = -q, \text{ где } X \text{ изменяется от } b-p \text{ до } -a-p. \quad (15)$$

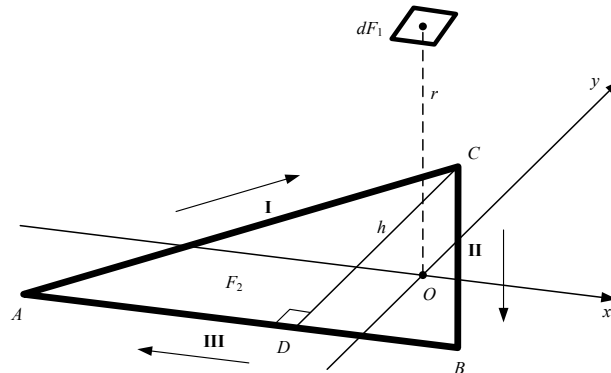


Рисунок 6. – Схема взаимного расположения излучающей и принимающей поверхностей при переносе точки начала координат

Для изображенного на рисунке 6 случая формула (1) переписывается в виде:

$$\varphi = \int_{F_1} \frac{\cos^2 \beta}{\pi S^2} dF_1 = \frac{1}{2\pi} \oint_L \frac{ydx - xdy}{S^2} = \left[S^2 = x^2 + y^2 + r^2 \right] = \frac{1}{2\pi} \oint_{I, II, III} \frac{ydx - xdy}{x^2 + y^2 + r^2}. \quad (16)$$

Подставив (13)–(15) в (16), путем несложных вычислений получим выражения для криволинейных интегралов на каждом из участков I–III:

$$\varphi_I = \frac{1}{2\pi} \frac{(a+p)h - aq}{D_I} \left(\arctg \frac{h^2 - qh - ap}{D_I} + \arctg \frac{a^2 - pa - qh}{D_I} \right), \quad (17)$$

$$\text{где } D_I = \sqrt{[(a+p)h - aq]^2 + (h^2 + a^2)r^2};$$

$$\varphi_{II} = \frac{1}{2\pi} \frac{(b-p)h - bq}{D_{II}} \left(\arctg \frac{h^2 - qh + bp}{D_{II}} + \arctg \frac{b^2 - pb + hq}{D_{II}} \right), \quad (18)$$

$$\text{где } D_{II} = \sqrt{[(b-p)h - bq]^2 + (h^2 + b^2)r^2};$$

$$\varphi_{III} = \frac{q}{2\pi\sqrt{q^2 + r^2}} \left(\arctg \frac{a+p}{\sqrt{q^2 + r^2}} + \arctg \frac{b-p}{\sqrt{q^2 + r^2}} \right). \quad (19)$$

Таким образом, для представленного на рисунке 6 случая угловой коэффициент облученности может быть вычислен по формуле:

$$\varphi = \varphi_I + \varphi_{II} + \varphi_{III}. \quad (21)$$

Рассмотрим теперь более общий случай, когда центр проекции принимающей поверхности расположен произвольно относительно излучающей поверхности.

Будем двигать вправо границы многоугольника так, чтобы многоугольник всегда оставался справа (рис. 6). Будем считать, что участок границы излучающего многоугольника имеет положительную (отрицательную) ориентацию, если при таком движении проекция принимающей поверхности остается справа (слева). Тогда угловой коэффициент облученности элемента принимающей поверхности от излучающей поверхности в виде треугольника ACB (рис. 6) вычисляется по формуле:

$$\varphi = k_{\text{оп}}^{(I)} \varphi_I + k_{\text{оп}}^{(II)} \varphi_{II} + k_{\text{оп}}^{(III)} \varphi_{III}, \quad (22)$$

где $k_{\text{оп}}^{(l)}$ – коэффициент ориентации участка l , определяемый следующим образом:

$$k_{\text{оп}}^{(l)} = \begin{cases} 1, & \text{если } l \text{ имеет положительную ориентацию,} \\ 0, & \text{если проекция центра элемента принимающей} \\ & \text{поверхности лежит на прямой, содержащей } l, \\ -1, & \text{если } l \text{ имеет отрицательную ориентацию.} \end{cases} \quad (23)$$

Границу произвольного многоугольника можно представить в виде последовательно отрезков, которые по расположению к оси абсцисс можно разбить на 4 типа: пересекающие ось под острым углом (T_I), пересекающие ось под тупым углом (T_{II}), параллельные оси (T_{III}), перпендикулярные оси (T_{IV}). Рассуждая как и при вычислении криволинейных интегралов вдоль отрезков типа T_I – T_{III} (формулы (17)–(19)), для отрезков типа T_{IV} легко получить аналогичные выражения. Например, для отрезка AE (рис. 6), определяемого уравнением $x = -a$, где y изменяется от 0 до h (в новой системе координат $X = -a - p$, где Y изменяется от $-q$ до $h - q$), будем иметь:

$$\varphi_{IV} = \frac{a + p}{2\pi\sqrt{(a + p)^2 + r^2}} \left(\arctg \frac{h - q}{\sqrt{(a + p)^2 + r^2}} + \arctg \frac{q}{\sqrt{(a + p)^2 + r^2}} \right). \quad (24)$$

Таким образом, для параллельных излучающей и принимающей поверхностей, размещенных произвольно относительно друг друга, угловой коэффициент облученности элемента принимающей поверхности от излучающей поверхности, представленной произвольным многоугольником, определяется по формуле:

$$\varphi = \sum_l k_{\text{оп}}^{(L_l)} \varphi_{L_l}, \quad (25)$$

где $\cup L_l$ – граница излучающей поверхности, а φ_{L_l} вычисляются по формулам (17)–(19), (24). При использовании формул (17)–(19), (24) следует учитывать, что на каждом из участков L_l границы излучающей поверхности величины a, b, h, p, q могут оказаться различными, т.к. отрезки L_l являются сторонами треугольников с различными геометрическими параметрами, и выражения для φ – φ_{IV} получены для случая, когда начало координат и рассматриваемый треугольник расположены в конфигурации рисунка 5.

Для оценки разработанной математической модели проведен сравнительный анализ с существующими методиками [9; 12]. В качестве исходных данных принято горение фронтона двускатной кровли с размерами в плане $2,75 \times 3$ м, излучающая поверхность в форме равнобедренного треугольника. Рассмотрим три варианта расположения центра проекции принимающей поверхности относительно излучающей:

- 1) в центре основания излучающей поверхности;
- 2) геометрическом центре излучающей поверхности;
- 3) точке с координатами (0, 2) (рис. 6).

Результаты расчетов приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Результаты расчета углового коэффициента облученности и плотности теплового потока

№ п/п	Наименование методики	Угловой коэффициент облученности, φ			Расчетная плотность теплового потока, q , кВт/м ²		
		1	2	3	1	2	3
1	Методика М.Я. Ройтмана [9]	0,138	0,118	0,135	16,19	13,90	15,92
2	Методика В.Ф. Кудаленкина [12]	0,075	0,069	–	8,81	8,08	–
3	Разработанная математическая модель	0,075	0,069	0,066	8,81	8,08	7,77

На основании расчетных значений видно, что методика [9] в 2 раза завышает значения углового коэффициента облученности и, соответственно, плотности теплового потока по сравнению с разработанной математической моделью. Методика [9] приводит излучающую поверхность к форме прямоугольника, что значительно увеличивает площадь излучающей поверхности ($8,25 \text{ м}^2$) в отличие от фактической ($4,12 \text{ м}^2$).

При сопоставлении полученных значений с методикой [12] очевидно, что значения в первом и во втором случае одинаковы, т.к. рассматриваются идентичная форма пламени и расположение относительно друг друга. Однако методика [12], в отличие от полученных

выражений, не позволяет рассчитать параметры варианта 3, рассматривающего произвольное расположение элемента принимающей поверхности.

Заключение

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что полученные выражения позволяют рассчитывать угловой коэффициент облученности, учитывая взаимное расположение излучающей и принимающей поверхностей. В отличие от существующих методик [9; 13] полученные формулы позволяют спроецировать центр принимающей поверхности в произвольную точку на плоскости излучающей поверхности, что обеспечит получение более точных значений углового коэффициента облученности, а следовательно, и расчетных значений плотности теплового потока. При этом в качестве излучающей поверхности может выступать любой многоугольник. Предложенная математическая модель определения углового коэффициента облученности позволит уточнить методику расчета величины противопожарных разрывов между зданиями и сооружениями с учетом индивидуальных особенностей рассматриваемых объектов.

Экспериментальные исследования по определению геометрических параметров излучающей поверхности от фронтона при горении двускатной кровли получены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект T20M-051).

ЛИТЕРАТУРА

1. Хрусталеv, Б.М. Тепло- и массообмен: учеб. пособие: в 2 ч. / Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск: БНТУ, 2007. – Ч. 1. – 606 с.
2. Modest, M.F. Radiative Heat Transfer / M.F. Modest. – Oxford: Elsevier, 2013. – 897 p.
3. Пастухов, С.М. Анализ подходов по оценке минимально допустимых расстояний между зданиями при воздействии пожара / С.М. Пастухов, С.М. Жамойдик, А.В. Тетерюков // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2014. – № 2 (20). – С. 23–31.
4. Шацков, А.О. Расчет угловых коэффициентов излучения при решении задач лучистого теплообмена в помещениях с инфракрасным отоплением / А.О. Шацков, Г.А. Кононыхин, С.И. Монах // Вестн. Донбас. нац. академ. строит. и архитект. – 2014. – Т. 107, № 3. – С. 41–46.
5. Hankinson, G. A Method for calculating the configuration factor between a flame and a receiving target for a wide range of flame geometries relevant to large scale fires / G. Hankinson // Fire Saf. Sci. – 1986. – Vol. 1. – P. 197–206.
6. Drysdale, D. An Introduction to Fire Dynamics / D. Drysdale. – Chichester: University of Edinburgh, 1999. – 470 p.
7. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
8. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К.Ф. Фокин. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.
9. Ройтман, М.Я. Противопожарное нормирование в строительстве / М.Я. Ройтман. – М.: Стройиздат, 1985. – 590 с.
10. Karlsson, B. Enclosure Fire Dynamics / B. Karlsson, J.G. Quintiere. – Boca Raton: CRC Press, 2000. – 316 p.
11. Carlsson, E. External fire spread to adjoining buildings – A review of fire safety design guidance and related research / E. Carlsson. – Lund: Department of Fire Safety Engineering Lund University, 1999. – 125 p.
12. Пожарная профилактика в строительстве: учебник / Б.В. Грушевский [и др.]; под ред. В.Ф. Кудаленкина. – М., 1985. – 454 с.
13. Пастухов, С.М. Методика проведения экспериментальных исследований по определению геометрических параметров пламени при горении кровельных материалов / С.М. Пастухов, А.В. Тетерюков // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 2. – С. 176–185. DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-2.176.

Математическая модель определения углового коэффициента облученности при расчете противопожарных разрывов между зданиями с двускатными кровлями, выполненными из горючих материалов

Mathematical model for determining the configuration factor when calculating fire risks between buildings with double roofs made of combustible materials

Пастухов Сергей Михайлович

кандидат технических наук, доцент
Министерство по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь, отдел науки
и инновационного развития, начальник отдела
Адрес: ул. Революционная, 5,
220030, г. Минск, Беларусь
e-mail: plamennyj98@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1437-1913

Sergey M. Pastukhov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Ministry for Emergency Situations of the Republic
of Belarus, Department of Scientific
and Innovation Activity, Head of the Department
Address: Revolyutsionnaya str., 5,
220030, Minsk, Belarus
e-mail: plamennyj98@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1437-1913

Платонов Александр Сергеевич

кандидат физико-математических наук,
доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», отдел науки
и инновационного развития, ведущий
научный сотрудник
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: alexpltn@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5463-6029

Aleksandr S. Platonov

PhD in Physics and Mathematics Sciences,
Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Department of scientific and Innovation Activity,
Leading Researcher
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: alexpltn@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5463-6029

Тетерюков Алексей Васильевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
пожарной безопасности, преподаватель
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: teter9212@gmail.com
ORCID: 0000-0001-7405-5774

Aleksey V. Teteryukov

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Fire Safety, Lecturer
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: teter9212@gmail.com
ORCID: 0000-0001-7405-5774

Дробыш Антон Сергеевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», факультет подготовки
научных кадров, начальник лаборатории
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: aantox@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9528-3108

Anton S. Drobysch

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Faculty of Postgraduate Scientific,
Head of Laboratory
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: aantox@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9528-3108

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.93>

MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING THE CONFIGURATION FACTOR WHEN CALCULATING FIRE RISKS BETWEEN BUILDINGS WITH DOUBLE ROOFS MADE OF COMBUSTIBLE MATERIALS

Pastukhov S.M., Platonov A.S., Teteryukov A.V., Drobysch A.S.

Purpose. To develop a mathematical model for estimating the configuration factor, which takes into account the triangular shape of the radiating surface and the mutual positional relationship relative to the receiving surface.

Methods. The development of equations for determining the configuration factor was based on the results of the analysis of experimental studies and existing approaches to determining the magnitude of fire gaps between buildings and structures, and Lambert's law for determining the amount of energy transmitted from the radiation to the receiving surface.

Findings. For parallel radiating and receiving surfaces, located arbitrarily relative to each other, the analytical expression is obtained that allows determining the configuration factor of an element of receiving surface by emitting surface which have the shape of an arbitrary convex polygon.

Application field of research. Determination of the fire breaks between buildings, taking into account the individual characteristics of the objects calculated – gabled roof made of combustible materials.

Keywords: fire-break, flame's geometrical parameters, configuration factor, combustible roofing materials.

(The date of submitting: January 26, 2020)

REFERENCES

1. Khrustalev B.M. *Teplo- i massoobmen* [Heat and mass transfer]: tutorial in 2 parts. Minsk: BNTU, 2007. Part 1. 606 p. (rus)
2. Modest M.F. *Radiative Heat Transfer*. Oxford: Elsevier, 2013. 897 p.
3. Pastukhov S.M., Zhamoydik S.M., Teteryukov A.V. Analiz podkhodov po otsenke minimal'no dopustimyykh rasstoyaniy mezhdru zdaniyami pri vozdeystvii pozhara [Analysis approaches for assessment minimum distance between the buildings at the case of fire exposure]. *Vestnik Komandno-inzhener'nogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2014. No. 2 (20). Pp. 23–31. (rus)
4. Shatskov A.O., Kononykhin G.A., Monakh S.I. Raschet uglovykh koeffitsientov izlucheniya pri reshenii zadach luchistogo teploobmena v pomeshcheniyakh s infrakrasnym otopeniem [Calculation of the configuration factor when solving problems of radiant heat transfer in rooms with infrared heating]. *Journal of Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2014. Vol. 107, No. 3. Pp. 41–46. (rus)
5. Hankinson G.A Method for calculating the configuration factor between a flame and a receiving target for a wide range of flame geometries relevant to large scale fires. *Fire Safety Science*, 1986. Vol. 1. Pp. 197–206.
6. Drysdale D. *An Introduction to Fire Dynamics*. Chichester: University of Edinburgh, 1999. 470 p.
7. Mikheev M.A. *Osnovy teploperedachi* [Heat transfer basics]. Moscow: Energiya, 1977. 344 p. (rus)
8. Fokin K.F. *Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastey zdaniy* [Construction heat engineering of envelope building]. Moscow: Stroyizdat, 1973. 287 p. (rus)
9. Roytman M.Y. *Protivopozharnoe normirovanie v stroitel'stve* [Fire safety regulation in construction]. Moscow: Stroyizdat, 1985. 590 p. (rus)
10. Karlsson B., Quintiere J. G. *Enclosure Fire Dynamics*. Boca Raton: CRC Press, 2000. 316 p.
11. Carlsson, E. External fire spread to adjoining buildings – A review of fire safety design guidance and related research. Lund: Department of Fire Safety Engineering Lund University, 1999. 125 p.
12. Grushevskiy B.V., Yakovlev A.I., Krivosheev I.N., Shurin E.T., Klimushin N.G. *Pozharnaya profilaktika v stroitel'stve* [Fire prevention in construction]: textbook. Ed. by V.F. Kudalenkin. Moscow, 1985. 454 p. (rus)
13. Pastukhov S.M., Teteryukov A.V. Metodika provedeniya eksperimental'nykh issledovaniy po opredeleniyu geometricheskikh parametrov plameni pri gorenii krovel'nykh materialov [The method of experimental researches to determine the geometric parameters of the flame during combustion of roofing materials]. *Journal of Civil Protection*, 2018. Vol. 2, No. 2. Pp. 176–185. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-2.176.