УДК 697.1

А. О. ШАЦКОВ, Г. А. КОНОНЫХИН, С. И. МОНАХ
Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

РАСЧЕТ УГЛОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ЛУЧИСТОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПОМЕЩЕНИЯХ С ИНФРАКРАСНЫМ ОТОПЛЕНИЕМ

Одним из факторов, препятствующим широкому распространению лучистого отоплению в качестве основного источника теплоты в жилых и общественных зданиях, является отсутствие методики расчета теплообмена излучением. Задача такого расчета сводится к определению угловых коэффициентов излучения. На основании закона Ламберта в данной работе получены выражения для определения угловых коэффициентов излучения через геометрические параметры излучателя и размеров поверхностей помещения. Приведен пример расчета угловых коэффициентов излучения, выполненного с помощью предложенных в работе аналитический выражений.

лучистый теплообмен, угловой коэффициент, закон Ламберта, взаимная поверхность облучения

Основной проблемой использования лучистых отопительных приборов для обогрева жилых помещения является отсутствие методики расчета лучистого теплообмена [1]. Сложность представляет вычисление углового коэффициента, или коэффициента облучённости, - геометрического параметра, зависящего исключительно от формы, размеров тел и их взаимного расположения.

Целью данной работы является получение аналитического выражения, которое бы позволило вычислить значение угловых коэффициентов излучения через геометрические параметры излучателя и поверхностей отапливаемого помещения.

Пусть два тела, участвующие в процессе лучистого теплообмена, расположены в пространстве относительно друг друга произвольно. В этом случае на поверхности каждого тела можно выделить несколько характерных элементов и рассмотреть тепловое взаимодействие между ними (рис. 1).

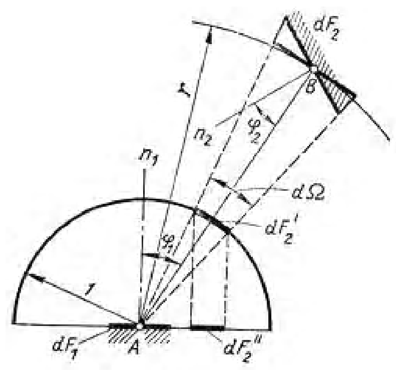

Рисунок 1 – Для выведения формулы взаимной поверхности облучения.

Пусть dF_1 и dF_2 – произвольно расположенные в пространстве элементы поверхности с температурами соответственно T_1 и T_2, поглощательная способность этих элементов A_1 и A_2, коэффициенты излучения $C_1 = e_1C_0 = A_1C_0$ и $C_2 = e_2C_0 = A_2C_0$. Обозначим через r расстояние между центрами элементов, а углы между r и нормалями к поверхностям – φ_1 и φ_2 соответственно.

Тогда телесный угол, под которым видна площадка dF_2 из dF_1:

$$d\omega = dF_2 \frac{cos\varphi_2}{r^2}; \quad (1)$$

Диффузное излучение энергии элементом dF_1 на dF_2 можно определить, используя закон Ламберта [2]:

$$dQ_1 = \frac{E_1}{\pi} dF_1 d\omega_1 cos\varphi_1; \quad (2)$$

Или

$$dQ_1 = C_1 \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 \frac{cos\varphi_1 cos\varphi_2}{\pi r^2} dF_1 dF_2; \quad (3)$$

Энергия, поглощённая вторым элементом:

$$dQ_{2-1} = A_2 dQ_1 = \frac{C_1 C_2}{C_0} \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 \frac{cos\varphi_1 cos\varphi_2}{\pi r^2} dF_1 dF_2; \quad (4)$$

Считая, что степень черноты элементов поверхности высокая, энергию излучения второго тела на первое, поглощённое им, определим так:

$$dQ_{1-2} = \frac{C_1 C_2}{C_0} \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \frac{cos\varphi_1 cos\varphi_2}{\pi r^2} dF_1 dF_2; \quad (5)$$

Таким образом, количество теплоты, которой обмениваются элементы поверхности:

$$dQ = dQ_{2-1} - dQ_{1-2}; \quad (6)$$

или

$$dQ = \frac{C_1 C_2}{C_0} \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] \frac{cos\varphi_1 cos\varphi_2}{\pi r^2} dF_1 dF_2; \quad (7)$$

Проинтегрируем выражение (7) по F_1 и F_2:

$$Q = \frac{C_1 C_2}{C_0} \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] \int_{F_1} dF_1 \int_{F_2} \frac{cos\varphi_1 cos\varphi_2}{\pi r^2} dF_2; \quad (8)$$

Наибольшую сложность при решении этого уравнения представляет определение интеграла:

$$H_{12} = \int_{F_1} dF_1 \int_{F_2} \frac{cos\varphi_1 cos\varphi_2}{\pi r^2} dF_2; \quad (9)$$

Эта величина имеет размерность площади и называется взаимной поверхностью излучения [3]. Таким образом, задача расчета лучистого теплообмена между двумя телами, произвольно расположенными в пространстве, по своей сути сводится к определению значения взаимной поверхности излучения F_{12}.

Рассмотрим особенность вычисления взаимной поверхности облучения в случае лучистого теплообмена между поверхностями помещения. Излучатель и поверхности помещения друг относительно друга могут располагаться либо в перпендикулярных, либо в параллельных плоскостях. Соответствующие схемы изображены на рис. 2 и рис. 3.

На первой схеме векторы нормали к поверхностям 1 и 2 $\overline{n_1} = (0;1;0)$ и $\overline{n_2} = (0;0;1)$. Обозначим координаты точки A $(x_A;0;z_A)$ и точки B $(x_B;y_B;0)$. Тогда $\overline{AB} = (x_B - x_A; y_B; -z_A)$. Учитывая, что из постановки задачи углы φ_1 и φ_2 – острые, то:

$$cos\varphi_1 = \frac{\overline{AB} \cdot \overline{n_1}}{\left|\overline{AB}\right| \cdot \left|\overline{n_1}\right|} = \frac{y_B}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + y_B{}^2 + z_A{}^2}}, \quad (10)$$

$$cos\varphi_2 = \frac{\overline{BA} \cdot \overline{n_2}}{\left|\overline{BA}\right| \cdot \left|\overline{n_2}\right|} = \frac{z_A}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + y_B{}^2 + z_A{}^2}}. \quad (11)$$

С учетом того, что $r = AB$, выражение (9) для двух поверхностей, расположенных в перпендикулярных плоскостях, можно представить следующим образом:

$$H_{12} = \frac{1}{\pi} \int_{a_1}^{a_2} dx_a \int_{x_1}^{x_2} dx_b \int_{b_1}^{b_2} dz_A \int_{y_1}^{y_2} \frac{y_B z_A dy_B}{\left[(x_B - x_A)^2 + y_B{}^2 + z_A{}^2\right]^2}. \quad (12)$$

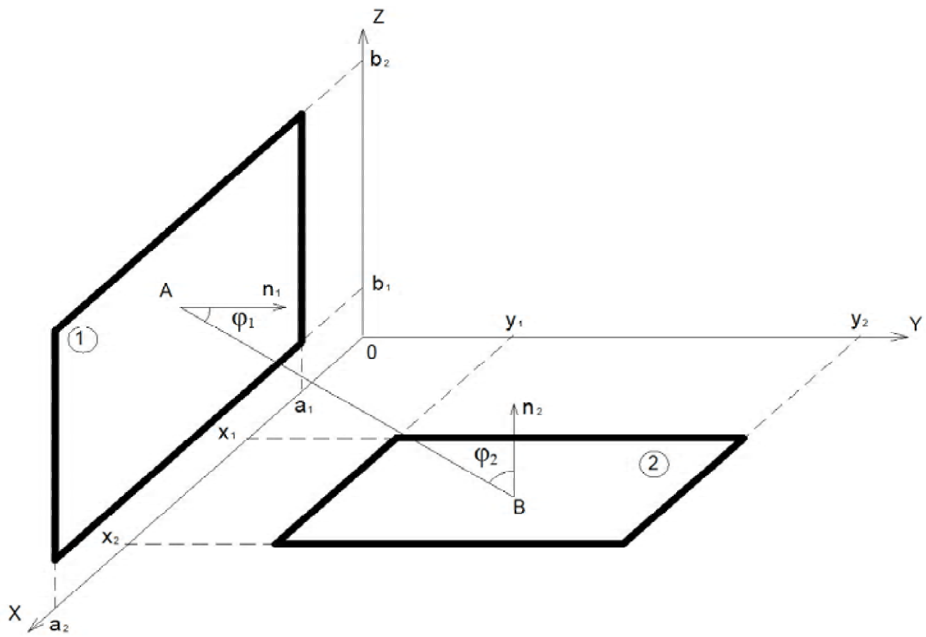

Рисунок 2 – Схема к расчету взаимной поверхности облучения в случае, когда излучатель и поверхность помещения расположены в перпендикулярных плоскостях.

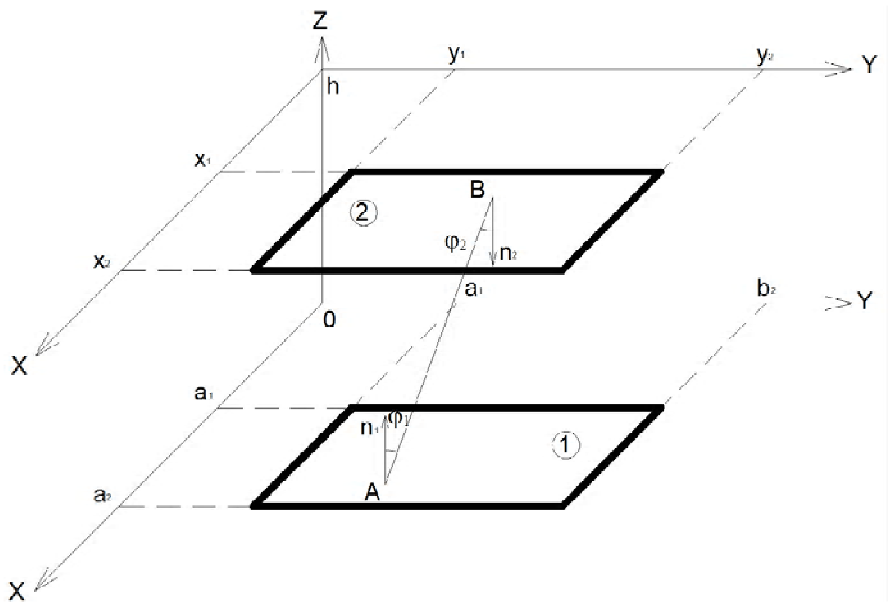

Рисунок 3 – Схема к расчету взаимной поверхности облучения в случае, когда излучатель и поверхность помещения расположены в параллельных плоскостях.

В результате интегрирования получено следующее аналитическое выражение:

$$H_{12}=H_{21}=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=1}^{2}\sum_{l=1}^{2}\frac{(-1)^{i+j+k+l}}{\pi}\left\{\begin{array}{c}\frac{1}{8}\left[\left(x_k-a_l\right)^2-y_i^2-b_j^2\right]\cdot ln\left[\left(x_k-a_l\right)^2+y_i^2+b_j^2\right]+\\ +\frac{1}{2}\left(x_k-a_l\right)\sqrt{y_i^2+b_j^2}\,arctg\,\frac{x_k-a_l}{\sqrt{y_i^2+b_j^2}}\end{array}\right\}. \qquad (13)$$

На второй схеме векторы нормали к поверхностям 1 и 2 $\overline{n_1}=(0;0;1)$ и $\overline{n_2}=(0;0;-1)$.

Обозначим координаты точки $A\ (x_A;\ y_A;\ 0)$ и точки $B\ (x_B;\ y_B;\ h)$, где h – расстояние между плоскостями. Тогда $\overline{AB}=(x_B-x_A;\ y_B-x_A;\ h)$. Учитывая, что из постановки задачи углы φ_1 и φ_2 – острые, то:

$$cos\varphi_1 = \frac{\overline{AB}\cdot\overline{n_1}}{\left|\overline{AB}\right|\cdot\left|\overline{n_1}\right|} = \frac{h}{\sqrt{(x_B-x_A)^2+(y_B-y_A)^2+h^2}}, \tag{14}$$

$$cos\varphi_2 = \frac{\overline{BA}\cdot\overline{n_2}}{\left|\overline{BA}\right|\cdot\left|\overline{n_2}\right|} = \frac{h}{\sqrt{(x_B-x_A)^2+(y_B-y_A)^2+h^2}}. \tag{15}$$

С учетом того, что $r = AB$, выражение (9) для двух поверхностей, расположенных в параллельных плоскостях, можно представить следующим образом:

$$H_{12} = \frac{h^2}{\pi}\int_{x_1}^{x_2}dx_B\int_{a_1}^{a_2}dx_A\int_{y_1}^{y_2}dy_B\int_{b_1}^{b_2}\frac{dy_A}{\left[\left(x_B-x_A\right)^2+(y_B-y_A)^2+h^2\right]^2}. \tag{16}$$

После интегрирования получено следующее выражение:

$$H_{12} = H_{21} = \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=1}^{2}\sum_{l=1}^{2}\frac{(-1)^{i+j+k+l}}{2\pi}\left\{\begin{array}{l}(b_k-y_l)\sqrt{\left(x_j-a_i\right)^2+h^2}\cdot arctg\dfrac{b_k-y_l}{\left(x_j-a_i\right)^2+h^2}+\\ +\left(x_j-a_i\right)\sqrt{\left(b_k-y_l\right)^2+h^2}\cdot arctg\dfrac{x_j-a_i}{\sqrt{\left(b_k-y_l\right)^2+h^2}}-\\ -\dfrac{h^2}{2}ln\left[\left(b_k-y_l\right)^2+\left(x_j-a_i\right)^2+h^2\right]\end{array}\right\}. \tag{17}$$

На основании полученных выражений вычисляется угловой коэффициент, или коэффициент облучённости, $\varphi_{1\text{-}2}$:

$$\varphi_{12} = \frac{H_{12}}{F_1};\varphi_{2-1} = \frac{H_{21}}{F_2}. \tag{18}$$

Для помещения, указанного на рис. 4, был проведен расчет угловых коэффициентов для инфракрасного обогревателя. Результаты расчета сведены в таблицу.

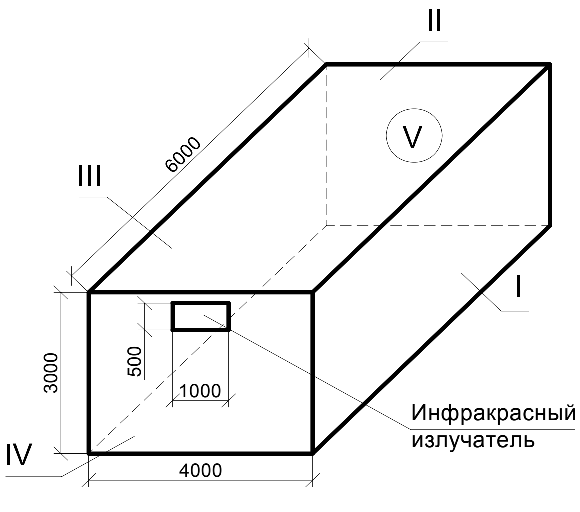

Рисунок 4 – Схема помещения, оборудованного инфракрасным излучателем.

Поскольку рассматриваемая система тел является замкнутой, то для неё должно выполняться свойство замкнутости угловых коэффициентов[4]:

$$\sum_{j=1}^{N}\varphi_{ij} = 1. \tag{19}$$

Таблица – Результаты расчета угловых коэффициентов

	Поверхности помещения					
	I	II	III	IV	V	Сумма
ИЧ обогреватель	0,161	0,405	0,161	0,181	0,092	1,0

Как видно из результатов вычисление, условие выполняется.

Таким образом, полученные в результате интегрирования аналитические выражения (13) и (17) представляют собой удобные формулы для вычисления взаимных площадей облучения, и, как следствие, угловых коэффициентов.

Похожие результаты также были получены в [5] при решении задачи математического моделирования лучистого теплообмена в помещении, оборудованном конвективным отопительным прибором.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шацков А.О. Перспективи і проблеми впровадження інфрачервоного опалення в Україні [Електронний ресурс] / А. О. Шацков, С. І. Монах // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2013. – Вип. 3(101). – С. 141–145. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vdnaba_2013_3_38.pdf.
2. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача [Текст] / В. В. Нащокин. – М. : Высшая школа, 1975. – 496 с.
3. Кутателадзе, С. С. Основы теории теплообмена [Текст] / С. С. Кутателадзе. – Новосибирск : Наука, 1970. – 659 с.
4. Блох, А. Г. Теплообмен излучением [Текст] : Справочник / А. Г. Блох, Ю. А. Журавлев, Л. Н. Рыжков. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 432 с. – ISBN 5-283-00118-0.
5. Табунщиков, Ю. А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности здания [Текст] / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач. – Москва : АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с. – ISBN 5-94533-002-7.

Получено 17.03.2014

А. О. ШАЦКОВ, Г. А. КОНОНИХІН, С. І. МОНАХ

РОЗРАХУНОК КУТОВИХ КОЕФІЦІЄНТІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПРИ РОЗВ'ЯЗАННІ ЗАДАЧ ПРОМЕНИСТОГО ТЕПЛООБМІНУ В ПРИМІЩЕННЯХ З ІНФРАЧЕРВОНИМ ОПАЛЕННЯМ

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

Одним з факторів, що перешкоджає широкому поширенню променистого опалення як основного джерела теплоти в житлових і громадських будівлях, є відсутність методики розрахунку теплообміну випромінюванням. Задача такого розрахунку зводиться до визначення кутових коефіцієнтів випромінювання. На основі закону Ламберта в роботі отримані вирази для визначення кутових коефіцієнтів випромінювання через геометричні параметри випромінювача та розмірів поверхонь приміщення. Наведено приклад розрахунку кутових коефіцієнтів випромінювання, виконаного за допомогою наведених в роботі аналітичних виразів.

променистий теплообмін, кутовий коефіцієнт, закон Ламберта, взаємна поверхня опромінення

ARTEM SHATSKOV, GENNADY KONONIKHIN, SVETLANA MONAH

CALCULATION OF VIEW FACTORIN SOLVING PROBLEMS OF RADIOACTIVE HEAT EXCHANGE IN INFRARED HEATED ROOMS

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

One of the factors block in gas widespread of radiant heat in gas the main heat source in residential and public buildings is lack of the procedure of calculating radiative heat exchange. Problem of the calculation reduces to determining of the view factors. Using Lambert's cosine law we have obtained the equations for determining the view factors by the geometric parameters of an infrared heater and dimensions of the room surfaces. An example of calculating transfer factors using the proposed analytical equations is given in the article.

radiative heat transfer, view factor, Lambert's cosine law, configuration factor

Шацков Артем Олегович – асистент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання і вентиляції Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: енергоресурсозбереження в системах теплопостачання шляхом впровадження електричного променистого опалення.

Кононихін Геннадій Анатолійович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри вищої та прикладної математики і інформатики Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: динаміка систем зв'язаних твердих тіл у полі сили тяжіння.

Монах Світлана Ігорівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання і вентиляції Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: енергоощадження.

Шацков Артем Олегович – ассистент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах теплоснабжения путем внедрения электрического лучистого отопления.

Кононыхин Геннадий Анатолиевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей и прикладной математики и информатики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: динамика систем связанных твердых тел в поле силы тяжести.

Монах Светлана Игоревна – кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: энергоресурсосбережение.

Shatskov Artem – an Assistant, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: storage of energy and resources in the systems of heat supply by the introduction of electric infrared heating.

Kononikhin Gennady – PhD (Physical and Mathematical Sciences), Associate Professor, Higher Mathematics and Computer Science Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: dynamics of system of connected bodies in the gravity field.

Monakh Svetlana – PhD (Eng.), Associate Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: energy resource saving.