

## Алгоритм расчета систем лучистого отопления помещений

Бухмиров В.В., Крупенников С.А., доктора техн. наук, Солнышкова Ю.С., асп.

**Предложен алгоритм расчета систем отопления с газовыми и электрическими инфракрасными излучателями. Приведен пример записи системы резольвентно-зональных уравнений, описывающих процесс радиационно-конвективного переноса энергии.**

*Ключевые слова:* параметры микроклимата, математическая модель системы радиационного отопления, инфракрасные излучатели, методы размещения излучателей в помещении.

## Algorithm for Solution of Radiant Heating Premises Systems

V.V. Bukhmirov, S.A. Krupennikov, Doctors of Engineering, Y.S. Solnyshkova, Post Graduate Student.

**The algorithm for calculation of heating systems with gas and electric infra-red radiators is developed. The example of record of system resolve-zoned equations describing process of radiative and convective heat exchange is given.**

*Key words:* microclimate parameters, mathematical model of radiation heating system, infrared projectors, methods of projectors placements.

В настоящее время в связи с выходом закона №261 – ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...» актуальным стало использование систем, позволяющих снизить затраты на отопление помещений. Особенно важен вопрос правильного выбора системы отопления для промышленных предприятий, а также для складов, ангаров, спортивных площадок и т.п., для которых применение традиционных систем отопления требует весьма сложного технического решения или вообще невозможно. По оценкам экспертов, на сегодняшний день на большинстве предприятий установлены системы водяного (парового) или воздушного отопления. Работа данных систем основана на законах конвективного переноса. Однако у систем водяного и воздушного отопления существует ряд недостатков, например [7]:

- неэффективность использования в зданиях большой высоты;
- необходимость нагрева большого количества воздуха в системах воздушного отопления;
- возникновение электрохимической коррозии в системах водяного отопления;
- громоздкость систем водяного (парового) и воздушного отопления.

Поэтому при выборе системы отопления производственных помещений предпочтение рекомендуется отдавать системам лучистого (инфракрасного) отопления. Преимущества работы инфракрасных излучателей подробно описаны в [6, 7]. Однако нельзя не отметить важной особенностью систем лучистого отопления – возможности создания требуемых параметров микроклимата (температуры воздуха в помещении и радиационной температуры) в отдельных рабочих зонах.

Классификация и краткая характеристика излучателей приведена в стандарте АВОК [8]. Существуют три типа систем лучистого ото-

пления: со «светлыми», «темными» и «супер-темными» излучателями, которые могут быть газовыми или электрическими.

Для эффективной работы системы отопления, т. е. для создания требуемых параметров микроклимата воздуха рабочей зоны при минимальных затратах энергии, необходимо решить следующие задачи:

- рассчитать количество и мощность излучателей, необходимых для отопления помещения;
- определить тип излучателей в зависимости от особенностей объекта и назначения системы отопления (основная или дополнительная);
- выбрать места установки излучателей в помещении.

Задачи, поставленные выше, экспериментально решить весьма трудоемко и проблематично, а для вновь проектируемых объектов – невозможно. Поэтому исследование эффективности применения систем радиационного отопления предпочтительнее проводить расчетными методами.

Рассмотрим математическую модель системы радиационного отопления (рис. 1), основанную на резольвентно-зональном методе расчета [1].

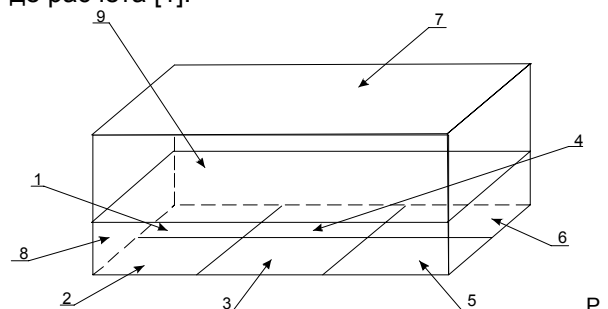


Рис. 1. Пример разбиения помещения на объемные и поверхностные зоны: 1–7 – поверхностные зоны; 8, 9 – объемные зоны

На первом этапе расчета необходимо найти количество излучателей и их мощность.

Для этого необходимо рассчитать количество тепловой энергии на отопление помещения по формуле

$$Q_h^y = [Q_h - (Q_{int} - Q_s) \nu \zeta] \beta_h, \quad (1)$$

где  $Q_h$  – общие тепловые потери помещения через наружные ограждающие конструкции, кВт;  $Q_{int}$  – бытовые тепlopоступления, кВт;  $Q_s$  – тепловые поступления через окна и фонари от солнечной радиации, кВт;  $\nu$  – коэффициент снижения тепlopоступлений за счет тепловой инерции ограждающих конструкций;  $\zeta$  – коэффициент эффективности авторегулирования подачи теплоты в системах отопления (выбирается по СНиПу [3] в зависимости от системы отопления и типа авторегулирования);  $\beta_h$  – коэффициент, учитывающий дополнительное тепlopотребление системы отопления.

Тепловые потери помещения включают в себя:

- потери теплоты теплопередачей через наружные ограждающие конструкции;
- затраты теплоты на нагрев наружного воздуха, поступающего за счет инфильтрации;
- затраты теплоты на нагрев наружного воздуха при использовании в помещениях систем кондиционирования или механической вентиляции.

Поступления тепловой энергии в помещение включают в себя поступления теплоты:

- от солнечной радиации;
- получаемых технологических продуктов;
- нагретого технологического оборудования;
- оборудования с электроприводом;
- бытовой техники;
- искусственного освещения;
- коммуникаций, например трубопроводов системы отопления;
- нагретых материалов и сырья;
- людей;
- прочих источников.

На втором этапе по найденному значению количества тепла на отопление помещения подбирают инфракрасные нагреватели с учетом требований СанПиНа [5]. При этом количество нагревателей выбирают исходя из их единичной мощности, учитывая ограничение на их расположение.

Размещение излучателей в помещении возможно выполнить двумя методами: инженерным или методом математического моделирования. При инженерном подходе на продольном разрезе помещения графически определяют места установки излучателей из условия перекрытия лучей отопительных приборов на высоте рабочей зоны (рис. 2).

При применении зональных методов расчета помещение разбивают на объемные и поверхностные зоны таким образом, чтобы в пределах каждой зоны тепlopфизические и ра-

диационные характеристики среды можно было считать постоянными.

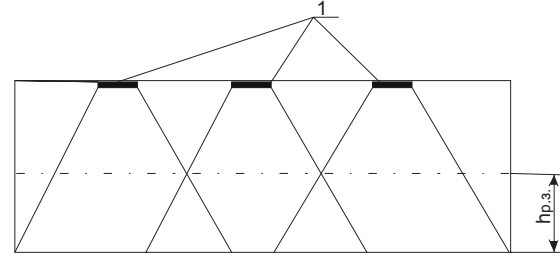


Рис. 2. Продольный разрез помещения: 1 – инфракрасные нагреватели;  $h_{p.z.}$  – высота рабочей зоны помещения

Для поверхностных зон неизменными считают поглотительную способность  $A_i$ , степень черноты  $\varepsilon_i$ , температуру  $T_i$  и плотность потока падающего излучения  $q_i^{пад}$ . Для объемных зон постоянны температура среды  $T_i$  и другие факторы, оказывающие влияние на интенсивность теплообмена (например, содержание излучающе-поглощающих компонентов).

Разобьем помещение, показанное на рис. 1, на семь поверхностных зоны, из которых зона 7 – нагреватель и две объемные зоны. Система резольвентно-зональных уравнений для зон имеет следующий вид:

$$\tilde{Q}_i^p = \sum_k (a_{ki} T_k^4 + g_{ki} T_k) + g_i^o, i = 1, \dots, l_1; \quad (2)$$

$$\sum_k (a_{ki} T_k^4 + g_{ki} T_k) + g_i^o - \tilde{Q}_i^p = 0, i = l_1 + 1, \dots, l, \quad (3)$$

где  $a_{ki} = \varepsilon_k \sigma_0 F_k (\Psi_{ki} \varepsilon_i - \delta_{ki})$  – коэффициенты радиационного обмена, Вт/К<sup>4</sup>;  $g_{ki}$  – коэффициенты конвективного обмена, Вт/К;  $g_i^o$  – слагаемые, не зависящие от зональных температур;  $T_k$  – температура  $k$ -й зоны, К;  $\tilde{Q}_i^p$  – поток результирующего излучения  $i$ -й зоны, Вт;  $\varepsilon_k$  – интегральная степень черноты  $k$ -й зоны;  $\sigma_0$  – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $F_k$  – площадь  $k$ -й зоны, м<sup>2</sup>;  $\Psi_{ki}$  – обобщенные разрешающие угловые коэффициенты;  $\delta_{ki}$  – символ Кронекера;  $l_1$  – число зон I рода;  $l$  – общее число зон.

Обобщенные разрешающие угловые коэффициенты, входящие в коэффициенты радиационного обмена, определяют по формуле

$$\Psi_{ki} = \varphi_{ki} + \sum_j \varphi_{kj} R_j \Psi_{ji}, \quad (4)$$

где  $\varphi_{ki}$  – угловой коэффициент с  $k$ -й зоны на  $i$ -ю;  $R_j$  – отражательная способность  $j$ -й зоны.

Коэффициенты конвективного обмена для объемных зон определяются по формуле

$$g_{ki} = C_{p,j'} G_{ji}, \quad (5)$$

где  $C_{p,j'}$  – средняя удельная массовая теплоемкость  $j$ -й объемной зоны, Дж/(кг·К);  $G_{ji}$  – поток массы воздуха, передаваемый  $i$ -й зоне со стороны  $j$ -й зоны.

Для поверхностных зон, смежных с объемными зонами, коэффициенты конвективного обмена рассчитываются по формуле

$$g_{ki} = \alpha_j F_j, \quad (6)$$

где  $\alpha_j$  – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F_j$  – площадь  $j$ -й поверхностной зоны, м<sup>2</sup>.

Для системы, показанной на рис. 1, запишем 9 зональных уравнений:

$$(a_{11} T_1^4 + a_{21} T_2^4 + a_{31} T_3^4 + a_{41} T_4^4 + a_{51} T_5^4 + a_{61} T_6^4 + a_{71} T_7^4 + a_{81} T_8^4 + g_{81} T_8 + a_{91} T_9^4) + g_1^0 - \tilde{Q}_1 = 0, \quad (7)$$

$$(a_{12} T_1^4 + a_{22} T_2^4 + a_{32} T_3^4 + a_{42} T_4^4 + a_{52} T_5^4 + a_{62} T_6^4 + a_{72} T_7^4 + a_{82} T_8^4 + g_{82} T_8 + a_{92} T_9^4) + g_2^0 - \tilde{Q}_2 = 0, \quad (8)$$

$$(a_{13} T_1^4 + a_{23} T_2^4 + a_{33} T_3^4 + a_{43} T_4^4 + a_{53} T_5^4 + a_{63} T_6^4 + a_{73} T_7^4 + a_{83} T_8^4 + g_{83} T_8 + a_{93} T_9^4 + g_{93} T_9) + g_3^0 - \tilde{Q}_3 = 0, \quad (9)$$

$$(a_{14} T_1^4 + a_{24} T_2^4 + a_{34} T_3^4 + a_{44} T_4^4 + a_{54} T_5^4 + a_{64} T_6^4 + a_{74} T_7^4 + a_{84} T_8^4 + g_{84} T_8 + a_{94} T_9^4) + g_4^0 - \tilde{Q}_4 = 0, \quad (10)$$

$$(a_{15} T_1^4 + a_{25} T_2^4 + a_{35} T_3^4 + a_{45} T_4^4 + a_{55} T_5^4 + a_{65} T_6^4 + a_{75} T_7^4 + a_{85} T_8^4 + g_{85} T_8 + a_{95} T_9^4) + g_5^0 - \tilde{Q}_5 = 0, \quad (11)$$

$$(a_{16} T_1^4 + a_{26} T_2^4 + a_{36} T_3^4 + a_{46} T_4^4 + a_{56} T_5^4 + a_{66} T_6^4 + a_{76} T_7^4 + a_{86} T_8^4 + g_{86} T_8 + a_{96} T_9^4) + g_6^0 - \tilde{Q}_6 = 0, \quad (12)$$

$$(a_{17} T_1^4 + a_{27} T_2^4 + a_{37} T_3^4 + a_{47} T_4^4 + a_{57} T_5^4 + a_{67} T_6^4 + a_{77} T_7^4 + a_{87} T_8^4 + a_{97} T_9^4 + g_{97} T_9) + g_7^0 - \tilde{Q}_7 = 0, \quad (13)$$

$$\tilde{Q}_8^p = (a_{18} T_1^4 + g_{18} T_1 + a_{28} T_2^4 + g_{28} T_2 + a_{38} T_3^4 + g_{38} T_3 + a_{48} T_4^4 + g_{48} T_4 + a_{58} T_5^4 + g_{58} T_5 + a_{68} T_6^4 + g_{68} T_6 + a_{78} T_7^4 + a_{98} T_9^4 + g_{98} T_9) + g_8^0, \quad (14)$$

$$\tilde{Q}_9^p = (a_{19} T_1^4 + a_{29} T_2^4 + a_{39} T_3^4 + a_{49} T_4^4 + a_{59} T_5^4 + a_{69} T_6^4 + a_{79} T_7^4 + g_{79} T_7 + a_{89} T_8^4 + g_{89} T_8) + g_9^0. \quad (15)$$

Систему уравнений (7)–(15) решают итерационными методами. Расчет конвективных

перетоков теплоты можно выполнить при помощи дифференциальных методов, на которых основана работа САЕ-систем (например, Phoenix, Fluent и др.). В результате решения задачи получают значения температуры воздуха в «рабочей» зоне помещения и в оставшейся части помещения, а также значения температуры ограждающих конструкций помещения. Данный алгоритм позволяет осуществлять не только расстановку инфракрасных излучателей, но и выбирать их мощность.

## Заключение

Разработанный алгоритм расчета систем отопления с электрическими и газовыми инфракрасными излучателями включает в себя:

- расчет тепловой энергии на отопление помещения на основе [5, 6];
- инженерный метод выбора расстановки излучателей;
- метод математического моделирования радиационно-конвективного теплообмена в помещении.

## Список литературы

1. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: учебник для вузов. – М.: Metallurgy, 1990.
2. Повышение эффективности зональных методов расчета радиационного и сложного теплообмена / В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников, Д.В. Ракутина, Ю.С. Солнышкова // Тез. докл. VI Минского междунар. форума по тепло- и массообмену, 19–23 мая 2008 г. – Минск, 2008. – С. 193–194.
3. СНиП 23.02.2003. Тепловая защита зданий. – М.: Госстрой России, 2003.
4. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий. – М.: Госстрой России, 2004.
5. СанПин 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – М.: Госкомсанэпиднадзор РФ, 1996.
6. <http://www.framoss.ru>
7. Рекламный проспект компании «Эколайн».
8. Стандарт АВОК. Системы отопления и обогрева с газовыми инфракрасными излучателями. – М.: НП «АВОК», РАМН, 2006.

*Бухмиров Вячеслав Викторович,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой теоретических основ теплотехники,  
e-mail: buhmirov@tot.ispu.ru

*Крупенников Сергей Алексеевич,*

Московский институт стали и сплавов,  
доктор технических наук, профессор,  
e-mail: buhmirov@tot.ispu.ru

*Солнышкова Юлия Сергеевна,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры теоретических основ теплотехники,  
e-mail: umc\_rier@ispu.ru