

УДК 536.3:66.011:662.9

ЗГУРСКИЙ В.А.

Институт газа НАН Украины

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕНА ИЗЛУЧЕНИЕМ*

Кутові коефіцієнти взаємного обміну є базовими величинами будь-яких розрахунків радіаційного теплообміну. Розроблено програмний продукт для розрахунку кутових коефіцієнтів та променевого теплообміну. Порівняно розрахункові значення кутових коефіцієнтів з аналітичними рішеннями, які представлені в літературних джерелах у вигляді номограм та розрахункових формул. Порівняння виконано для різних геометричних конфігурацій тіл та їх взаємного розташування.

Угловые коэффициенты взаимного обмена являются базовыми величинами любых расчетов радиационного теплообмена. Разработан программный продукт для расчета угловых коэффициентов и лучистого теплообмена. Сопоставлены рассчитанные значения угловых коэффициентов с аналитическими решениями, которые представлены в литературных источниках в виде номограмм и расчетных формул. Сравнение выполнено для различных геометрических конфигураций тел и их взаимного расположения.

View factors of interchangement are base values of any calculations of radiating heat transfer. The software product for calculation of view factors and radiant heat exchange is developed. The calculated values of view factors are compared to analytical methods which are submitted in references as nomograms and design equations. Comparison is carried out for various geometrical configurations of bodies and their relative positioning.

q – тепловой поток, Вт/м²;

T – температура, К;

T_g – температура продуктов сгорания, К;

w – стенка;

φ – угловой коэффициент;

ε – степень черноты;

МК – Монте-Карло.

Индексы:

w – стенка;

Введение

Угловые коэффициенты являются базовыми величинами любых расчетов радиационного теплообмена. Разработан программный продукт для расчета обыкновенных (геометрических) угловых коэффициентов в диатермических средах, и обобщенных угловых коэффициентов в поглощающих средах, а также расчета значения лучистых тепловых потоков на поверхности тел.

Цели и методы исследования

Для проверки адекватности используемой методики и разработанной программы было проведено сопоставление. Значения угловых коэффициентов φ_{12} , φ_{21} , рассчитанных методом МК, сопоставлены со значениями, полученными с помощью аналитических решений, представленными в литературных источниках [1-6]. Основные положения применяемой модификации метода МК, а также ее отличие от других подходов были представлены в наших работах [7, 8].

Сравнение выполнено для различных геометрических конфигураций тел и их взаимного расположения:

- тела конечных размеров. Схемы (рис. 1), состоящие из двух прямоугольников, в том числе 1 – расположенные параллельно, 2 – с общим ребром, включая случаи перпендикулярного расположения или размещения под произвольным углом; 3 – два диска, расположенные параллельно, 4 – цилиндр и плоскость, 5 – два коаксиальных цилиндра;

- тела бесконечных размеров. При реализации процедуры МК оперировали с телами конечных размеров. При этом один из линейных размеров был значительно больше остальных: 6 – бесконечная полоса и цилиндр, 7 – два бесконечных цилиндра, расположенные на некотором расстоянии друг от друга.

Из числа проверенных методик, рекомендованных зависимостей, графиков и номограмм неверные значения дают следующие источники: парал-

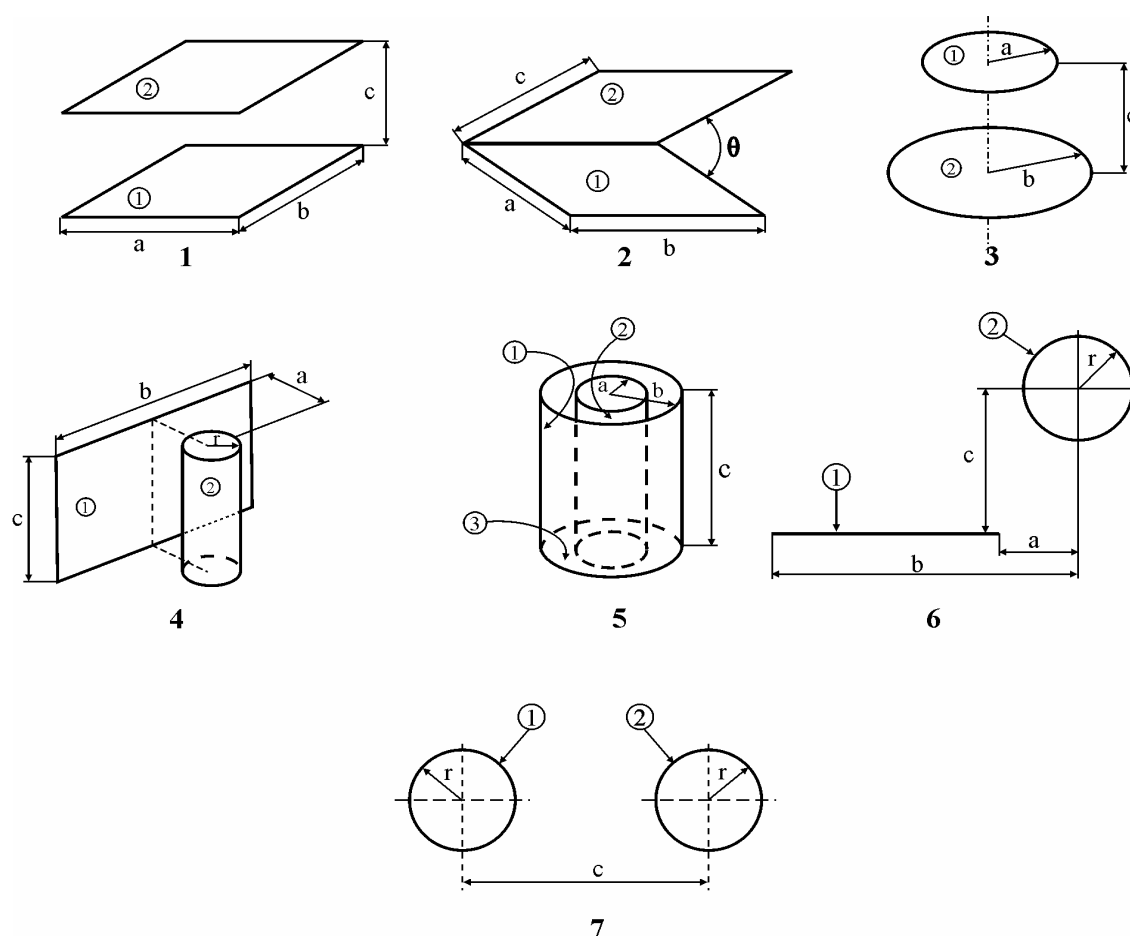


Рис.1. Схемы взаимного расположения поверхностей и тел, подвергнутые сопоставлению по расчетным процедурам определения взаимных угловых коэффициентов.

тельные цилиндры бесконечной длины [1], пластина и параллельный цилиндр конечной длины - [5], пластины, расположенные под углом 90° - [6].

Разработана модификация программы для расчета теплообмена излучением в топках котлов. Проведен расчет теплообмена излучением в топках котлов: ТВГ-8, ГМ-50, БКЗ-75, ДКВР-10, ДКВР-6. Тепловые расчеты были выполнены методом Монте-Карло для радиационного теплообмена и без учета конвективной составляющей. Задача решалась в фундаментальной постановке при задании начальных температурных распределений газов в топочном пространстве. При этом неизвестными величинами являются результирующие тепловые потоки, которые поглощаются охлаждаемыми поверхностями (трубчатыми секциями) одновременно с распределением температуры на огнеупорной подине (в случае наличия послед-

ней). За исключением случаев, где это специально оговорено, расчеты проводили для серого излучения поверхностей труб и огнеупоров со степенью черноты $\varepsilon_w = \varepsilon_h = 1$. Топки имеют форму прямоугольного параллелепипеда.

Обсуждение результатов

Котлы типа ДКВР типоразмеров 6.5/13 и 10/13

Котлы газовые, типа ДКВР имеют горячую подину и водо/паротрубные секции, расположенные на четырех боковых стенках котла и в верхней горизонтальной плоскости. Давление пара 13 бар при температуре кипения 463 К. Было рассмотрено линейное уменьшение температуры газов снизу вверх от $T_{g,max} = 1850$ К до $T_{g,min} = 1380$ К при постоянной температуре в горизонтальном сечении.

Принята центральная симметрия топки. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что поля результирующих тепловых потоков в анализируемых котлах существенно изменяются, прежде всего, по высоте топки и имеют максимальное значение возле подины топки и минимальное – в области сечения отвода продуктов сгорания. Соответствующее отличие составляет 2.5...3 раз – для котла ДКВР 6.5/13 (от 170 до 70...60 кВт/м²) и 2.7...3.1 раза – для котла ДКВР-10/13 (от 190 до 70...60 кВт/м²). На каждом горизонтальном уровне разница достигает 20...25%. В верхнем сечении разность составляет до 50...60%. Для подины максимум температуры: в центре, минимум – в углах. Разность температур составляет 110...120 К, абсолютное значение температуры даже в центре основы – 1290 К (ДКВР – 6.5/13) и 1320 К (ДКВР – 10/13) т.е. меньше минимальной температура газов $T_{g,min} = 1380$ К.

Для сравнения выполнены расчеты теплообмена при условии поддержания равномерной температуры газов в топке ($T_g = 1325$ °С). Такой ситуации можно достичь за счет обеспечения крупномасштабной циркуляции газов в топке, направленной на уменьшение образования NO_x при сжигании природного газа. В этом случае минимальные тепловые потоки возрастают на ~30% (в верхней части топки): от 60 кВт/м² до 80...85 кВт/м² – и уменьшаются максимальные потоки (в нижней части топки): от 170...190 кВт/м² до 130 кВт/м². Изолинии, характеризующие поля тепловых потоков, в условиях изотермической газовой среды в топке вытягиваются в вертикальном направлении. На рис. 2 изображены полученные изолинии тепловых потоков на стенке.

Котел ГМ-50

Характеризуется расположением горелок на расстоянии свыше 2,5 м от охлаждаемой подины. Благодаря указанной локализации, области максимальных температур (1970 К) соответствуют расположению секции с максимальным теплоприемом (удельное значение ~280 кВт/м²), что приблизительно в 1.75 раза больше потоков воспринятых нижней приемной поверхностью, и в 3 раза больше потоков воспринятых верхними охлаждаемыми секциями. В границах горизонтально расположенных секций локальные тепловые потоки различаются между собою в 1.5 раза

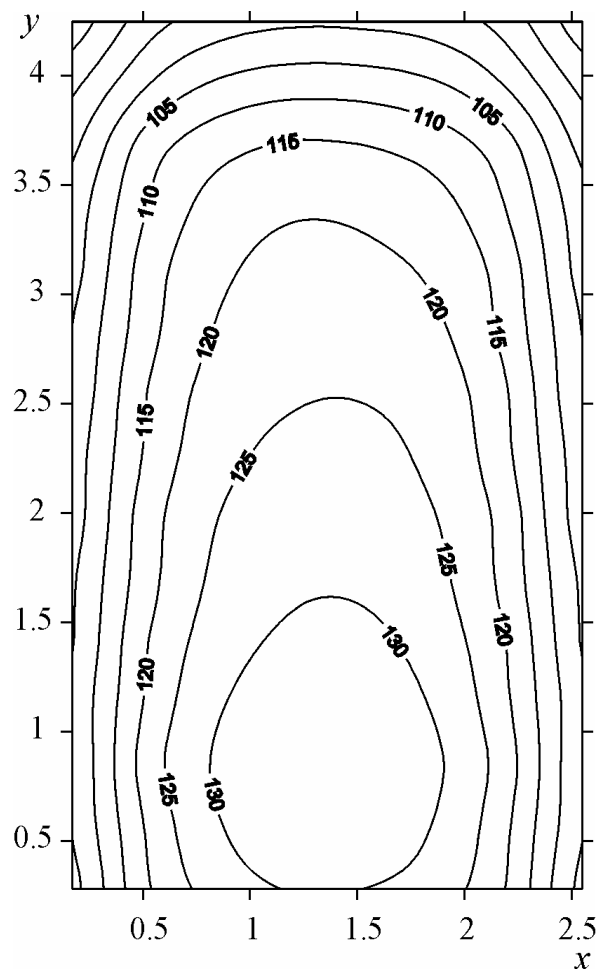


Рис. 2. Тепловые потоки q_w , кВт/м², эпюра изолиний на вертикальной стенке котла ДКВР-6.5/13 при условии постоянной температуры продуктов сгорания котла ($T_g = 1598$ К) и фиксированной температуре теплопринимающей поверхности водопаровых труб ($T_w = 490$ К).

(верхние приемочные секции), и в 1.7 раза (нижние приемочные секции). В основном на обеих горизонтальных поверхностях отклонения от максимальных значений q_w не превышают 30 %.

Котел БКЗ-75

Характеризуется наличием водоохлаждаемой подины и небольшим расстоянием плоскости расположения горелок от подины. При моделировании температурный профиль по высоте котла принят линейным с постепенным снижением температуры. Проведены сравнения формирования результирующего тепловосприятия трубчатыми секциями со случаем “горячей” адиабатной поди-

ны вместо нижней приемочной поверхности. В результате такого сопоставления выявлено, что характер теплового состояния нижней поверхности (адиабатная или охлаждаемая) существенно (до 25 %) влияет на распределение тепловых потоков в нижней половине топочного пространства. В верхней половине влияние незначительно (максимально 5...7 %). На адиабатной подине уровень температур достигает 1450 К в центральной части, а в углах уменьшается на 100 К. На большей части подины, за исключением периферии, уровень температур достаточно однородный (отклонение) составляет ± 20 К.

Котел ТВГ- 8

Характеризуется развитой теплоприемной поверхностью благодаря введению в топочное пространство двухсветных водогрейных экранов. В результате отличительной особенностью такого котла являются относительно небольшие эффективные длины лучей, что приводит к уменьшенным значениям результирующих тепловых потоков q_w , которые воспринимают экранные трубы (30...130 кВт/м² – на боковых стенках).

Выполнен расчет влияния степени черноты ограждающих поверхностей: трубчатых секций ε_w и адиабатных огнеупорных поверхностей ε_h на q_w . Для сопоставления с базовым вариантом ($\varepsilon_w = \varepsilon_h = 1,0$) проведен расчет при $\varepsilon_w = \varepsilon_h = 0,8$. В результате сопоставления доказано, что уменьшение степени черноты ограждающих поверхностей с 1,0 до 0,8 приводит к уменьшению q_w на 15...10 % (до 25...115 кВт/м²) на боковых приемных поверхностях.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что применяемая модификация метода МК пригодна для расчета теплообмена излучением в котле. При этом можно получать локальные распределения тепловых потоков на поверхностях тел.

* Выполнено под руководством д.т.н., проф. Б.С. Сороки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sparrow E.M., Cess R.D. Radiation Heat Transfer. Augmented edition. Washington. McGraw-Hill Book Company. 1978 –366 p.
2. Siegel R., Howell J. Thermal Radiation Heat Transfer. New York McGraw-Hill Book Company. - 1972 –814 p.
3. Телегин А.С., Швидкий В.С., Ярошенко Ю.Г. Термодинамика и тепло- массообмен. М.: Металлургия.- 1980. –264 с.
4. Невский А.С. Лучистый теплообмен в печах и топках. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: Металлургия, 1971 –439 с.
5. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: Справочник.- М.: Энергоатомиздат, 1991.– 432 с.
6. Мучник Г.Ф., Рубашев И.Б. Методы теории теплообмена. Тепловое излучение/ Учебное пособие для втузов.- М.: Высш. школа, 1974.- 272 с.
7. B. Soroka, K. Pyanykh, V. Zgursky, M. Khinkis, H. Abbasi, J. Rabovitser. Mathematical modeling of low-emission combustion processes basing upon Monte-Carlo procedures // Preprints of 5th European conference on industrial furnaces and boilers (11-14 April 2000).-Espinho-Porto (Portugal)– Vol. II.– P.12.
8. Сорока Б.С., Пьяных К.Е., Згурский В.А., Хинкис М., Аббаси Х., Рабовицер И. Теплообменные процессы в низкоэмиссионных по NOx котельных топках в условиях двухступенчатого горения газа и рециркуляции продуктов реакции // IV Минский международный форум «Тепло-массообмен ММФ-2000» (22-26 мая 2000 г.).– АНК «Институт тепло- и массо-обмена им. А.В. Лыкова» НАНБ: Минск, 2000.– Т.10.– С. 436-445.

Получено 27.09.2004 г.