

**VERIFICATION FOR THE CORRESPONDENCE
TO THE TRUTH OF THE LAWS
OF THERMAL RADIATION
OF GAS VOLUMES. PART I. EXAMPLES OF CALCULATIONS
ACCORDING TO THE LAWS OF QUANTUM THERMAL RADIATION
OF CYLINDRICAL GAS VOLUMES**

A.N. Makarov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Examples of calculations of heat exchange of gas volumes with heating surfaces according to the laws of thermal radiation of cylindrical gas volumes are given. Examples of calculations confirm the validity of the five laws of thermal radiation of gaseous volumes of electric arcs and torches. Researchers and readers are invited to check the truth of the laws of quantum thermal radiation of gas volumes on a computer using the Compass program.

Keywords: thermal radiation, laws, gas volumes, torch, electric arc, furnaces, combustion chambers.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Makarov A.N. Verification for the correspondence to the truth of the laws of thermal radiation of gas volumes. Part I. Examples of calculations according to the laws of thermal radiation of cylindrical gas volumes // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 4 (20), pp. 58–66.

УДК 44.31.03:45.43.00:53.07.00

**ПРОВЕРКА НА СООТВЕТСВИЕ ИСТИНЕ
ЗАКОНОВ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ.
ЧАСТЬ II. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ПО ЗАКОНАМ
ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
И СФЕРИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ**

А.Н. Макаров

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Макаров А.Н., 2023

Аннотация. Приведены примеры расчетов теплообмена газовых объемов электрических дуг и факелов с поверхностями нагрева по законам теплового излучения цилиндрических и сферических газовых объемов. Отмечено, что примеры расчетов

подтверждают истинность пяти законов теплового излучения газовых объемов. Указано, что газовый объем в топке парового котла заполняет всю топку и имеет форму прямоугольного параллелепипеда; при моделировании излучения газового объема в форме прямоугольного параллелепипеда излучением цилиндрического газового объема погрешность расчетов не превышает 3 %. Сделан вывод, что погрешность в расчетах при моделировании излучения газового объема в форме прямоугольного параллелепипеда излучением вписанных в параллелепипед нескольких сотен сферических газовых объемов составляет 0,9–0,4 %.

Ключевые слова: тепловое излучение, газовый объем, законы, факел, электрическая дуга, печи, топки, камеры сгорания.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-4-66-76

ВВЕДЕНИЕ

Открытые законы теплового излучения изохорных изотермических концентрических сферических и коаксиальных цилиндрических газовых объемов [1] позволяют исследователям, конструкторам рассчитать тепловые потоки, среднюю длину пути лучей, угловые коэффициенты излучения газовых объемов любой сложной объемной формы, вписывая в них сферические объемы вплоть до сферических объемов атомов.

В зависимости от сложности формы в газовые объемы могут быть вставлены десятки, сотни и миллионы сфер большого, среднего, малого или бесконечно малого диаметра. Концентрическими сферическими совместно с коаксиальными цилиндрическими газовыми объемами можно заполнить излучающие газовые объемы любой сложной объемной формы без остатка и рассчитать тепловое излучение газовых объемов на поверхности нагрева с высокой точностью [1–3].

Объемная расчетная модель атома представляет собой ядро в виде сферического объема и вращающихся по концентричным с ядром сферическим орбитам электронов. Поэтому сферическими газовыми объемами малого и бесконечно малого диаметра можно заполнить газовые объемы, факелы любой сложной формы и найти их тепловое излучение с высокой точностью. Газовый объем, образующийся при сгорании топлива в топке парового котла, заполняет всю топку и имеет форму прямоугольного параллелепипеда [4–12].

Выполним моделирование излучения части объема факела, представляющего изотермический объем в форме прямоугольного параллелепипеда, сферическими и цилиндрическими газовыми объемами.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВОГО ОБЪЕМА ТОПОК ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ И СФЕРИЧЕСКИМИ ГАЗОВЫМИ ОБЪЕМАМИ

Рассмотрим излучение части объема факела, представляющего изотермический газовый объем l в форме прямоугольного параллелепипеда с размером $a \times b \times h = 3 \times 3 \times 3$ м на расчетную площадку dF площадью $F = 0,5 \cdot 0,5 = 0,25$ м² (рис. 1).

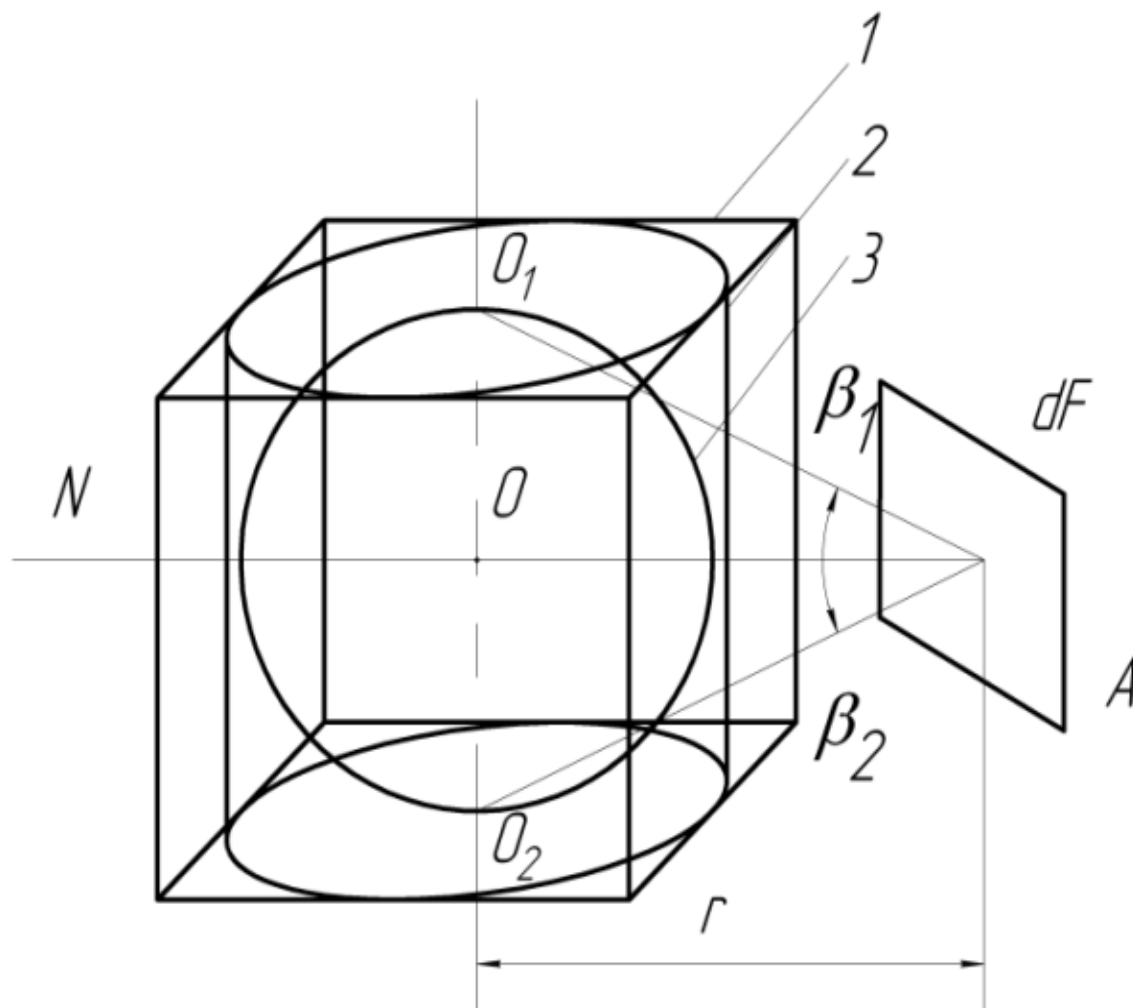


Рис. 1. Моделирование теплового излучения газового объема в форме прямоугольного параллелепипеда излучением цилиндрического и сферического объемов:

$$\angle O_1AO = \beta_1, \angle O_2AO = \beta_2, \beta_1 + \beta_2 = \beta$$

Впишем в прямоугольный параллелепипед 1 цилиндрический газовый объем 2, диаметром 3 м, высотой $l_2=3$ м и сферический газовый объем 3 диаметром 3 м. В каждом из газовых объемов одновременно излучают кванты тепла $15 \cdot 10^{25}$ атомов, равномерно заполняющих объемы. Перпендикуляр N в центр A площадки dF проходит через центр симметрии O объема 3 и ось симметрии цилиндрического газового объема 2 и делит ось симметрии O_1O_2 прямоугольного параллелепипеда 1 и цилиндра пополам между их верхним и нижним основаниями. Расстояние между точкой O и центром симметрии площадки $dF = 3$ м. В каждом из излучающих газовых объемов выделяется равная мощность излучения: $P_1 = P_2 = P_3 = 42$ МВт; коэффициент поглощения газовой среды принят $\kappa = 0,162$ [1].

Плотность падающего на расчетную площадку dF потока теплового излучения от излучающего цилиндрического газового объема 2 определяется по первому закону теплового излучения газовых объемов [1–3]:

$$q_{2dF} = \varphi_{2dF} P_2 F^{-1} e^{-kl_2} = \frac{FP_2 e^{-kl_2}}{F 2\pi^2 l_{\delta}} \left[\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 - \beta_2) \right] =$$

$$\frac{0,25 \cdot 42 \cdot 10^3 \cdot e^{-0,162 \cdot 3,11}}{0,25 \cdot 2 \cdot 3,14^2 \cdot 3 \cdot 3} \cdot \left[\frac{52}{57} + \sin 52^\circ \cos 0^\circ \right] = 217,1 \text{ кВт/м}^2.$$

(1)

Согласно первому закону теплового излучения газовых объемов выполнен расчет плотности падающего на расчетную площадку dF потока теплового излучения от сферического газового объема:

$$q_{3dF} = \varphi_{3dF} P_3 F^{-1} e^{-kl_3} = \frac{0,0022 \cdot 42 \cdot 10^3 \cdot e^{-0,162 \cdot 3}}{0,25} = 228,3 \text{ кВт/м}^2.$$

(2)

В процессе расчетов плотностей, падающих на расчетную площадку dF потоков тепловых излучений от цилиндрического и сферического газовых объемов, получили результаты, отличающиеся не более чем на 5 %. Отличие Δ в результатах расчетов определяем по выражению

$$\Delta = \left(1 - \frac{q_{2dF}}{q_{3dF}} \right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{217,1}{228,3} \right) \cdot 100 = 4,9 \%$$

Точность расчета плотности, падающего на расчетную площадку dF потока теплового излучения от газового объема в форме прямоугольного параллелепипеда, можно повысить, если вписать в него несколько десятков сферических газовых объемов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ СФЕРИЧЕСКИМИ ГАЗОВЫМИ ОБЪЕМАМИ МЕНЬШЕГО ДИАМЕТРА

Впишем равномерно в газовый объем в форме прямоугольного параллелепипеда сферические газовые объемы с диаметром 0,5 м, а именно по высоте параллелепипеда 6 рядов сфер по 36 в каждом, всего 216 сфер (рис. 2).

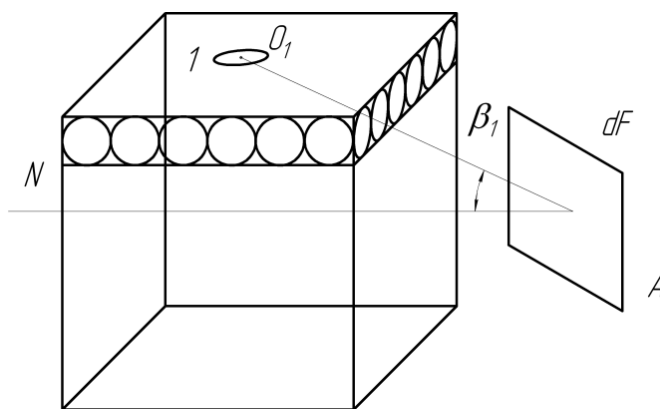


Рис. 2. Моделирование теплового излучения газового объема
216 сферическими газовыми объемами

В каждом из 216 сферических объемов выделяется равная мощность излучения:

$$P_1 = P_2 = P_3 = \dots = P_{216} = 42 \cdot 10^3 / 216 = 194,4 \text{ кВт.}$$

В [2] выведено обобщенное аналитическое выражение для расчета элементарного углового коэффициента излучения сферы малого диаметра на любую расчетную площадку, произвольно расположенную в пространстве. Например, формула для расчета элементарного углового коэффициента излучения сферического газового объема 1, расположенного в центре верхнего ряда вписанных в параллелепипед сфер на площадку (см. рис. 2), имеет вид [2]

$$\varphi_{1dF} = \frac{F \cos \beta_1}{4\pi l^2}, \quad (3)$$

где $\angle OAN = \beta_1$ – угол между перпендикуляром NA к площадке dF и лучом OA , соединяющим центры площадки и объема 1 ($AO = l$ – расстояние между центрами площадки dF и объема 1); F – площадь площадки dF .

Поскольку согласно второму закону теплового излучения локальные угловые коэффициенты излучения концентричных сферических газовых объемов равны, по выражению (3) можно рассчитать угловые коэффициенты излучения на расчетную площадку сферических источников излучения как бесконечно малого диаметра, так и гигантских размеров, например небесных светил, звезд. В будущем, во время дальних космических полетов, будет важно знать, на какое расстояние корабль может приблизиться к звезде без опасности термического разрушения. Открытые законы позволяют определить тепловые потоки, падающие на корпус корабля от звезды при любом расстоянии до нее и любом пространственном положении летательного аппарата [13–15].

Найдем локальный угловой коэффициент излучения сферического газового объема 1 на расчетную площадку dF (см. рис. 2):

$$\varphi_{1dF} = \frac{F \cos \beta_1}{4\pi l_1^2} = \frac{0,25 \cdot \cos 18^\circ}{4 \cdot 3,14 \cdot 3,2^2} = 0,0018.$$

Плотность потока теплового излучения, падающего на расчетную площадку dF от сферического газового объема 1, определяем по выражению

$$q_{1dF} = \varphi_{3dF} \rho_1 F^{-1} e^{-kl_1} = \frac{0,0018 \cdot 194,4}{0,25 \cdot e^{0,162 \cdot 3,2}} = 0,833 \text{ кВт/м}^2.$$

Аналогичным образом рассчитываем плотности падающих на расчетную площадку dF потоков тепловых излучений от каждого из 216 сферических газовых объемов, заполняющих прямоугольный параллелепипед. Для автоматизации расчетов используем программу расчета угловых коэффициентов излучений и плотностей потоков излучений на компьютере. Итоговая плотность потоков излучений $q_{\Sigma 216}$, падающих от 216 сферических газовых объемов на площадку dF , определяется суммированием плотностей потоков излучений от 216 сферических газовых объемов:

$$q_{\Sigma 216} = \sum_{i=1}^{216} q_{idF} = 212,2 \text{ кВт/м}^2. \quad (4)$$

Сравним результаты моделирования теплового излучения газового объема в форме прямоугольного параллелепипеда цилиндрическим (см. выражение (1)), сферическим (см. формулу (2)) газовыми объемами и 216 сферическими газовыми объемами (см. выражение (4)). Наиболее точный результат получен по выражению (4), так как вписанные сферические газовые объемы в количестве 216 шт. наиболее эффективно заполняют объем

прямоугольного параллелепипеда. Результаты расчета теплового излучения газового объема в форме прямоугольного параллелепипеда цилиндрическим газовым объемом обладают погрешностью $\Delta_{\text{ц}}$ не более 3 %:

$$\Delta_{\text{ц}} = (1 - 212,2 / 217,1) \cdot 100 = 2,3 \%$$

Результаты моделирования газового объема в форме прямоугольного параллелепипеда одним сферическим газовым объемом имеют погрешность

$$\Delta_1 = (1 - 212,2 / 228,3) \cdot 100 = 7,1 \%$$

Таким образом, тепловое излучение газового объема в форме прямоугольного параллелепипеда можно моделировать излучением вписанного в него цилиндрического газового объема, так как погрешность расчетов не превышает 3 %. Тепловое излучение газового объема в форме указанного параллелепипеда не рекомендуется моделировать вписанным в него одним сферическим газовым объемом, так как погрешность расчетов превышает 7 %. Наименьшая погрешность в результатах расчетов от действительного значения плотности потока теплового излучения газового объема в форме прямоугольного параллелепипеда на расчетную площадку достигается при моделировании излучения параллелепипеда вписанными в него несколькими десятками сферических газовых объемов. Увеличивать число вписываемых в прямоугольный параллелепипед сферических газовых объемов до нескольких сотен или тысяч сфер нецелесообразно, так как при этом растет количество вычислительных операций, а точность расчетов по сравнению с действительным значением потоков излучений – на десятые доли процента, а именно на 0,1–0,8 %. Вышесказанное подтверждают расчеты, данные ниже.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ МНОЖЕСТВОМ СФЕРИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ

Впишем в газовый объем в форме прямоугольного параллелепипеда 15 сферических газовых объемов с диаметром 1 м каждый, в три ряда (I–III) по высоте и по 5 сферических газовых объемов в каждом ряду (рис. 3).

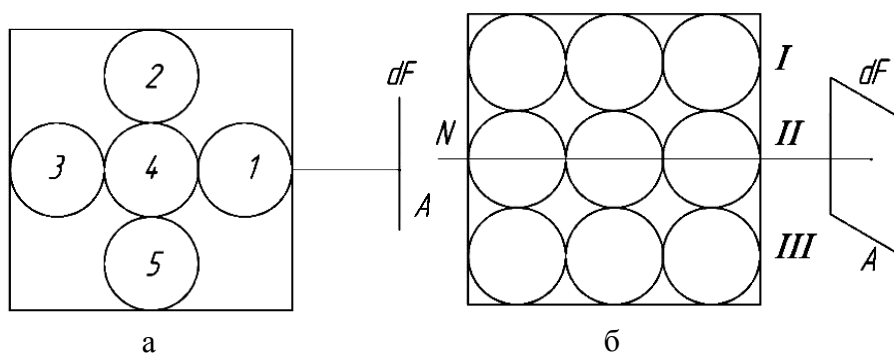


Рис. 3. Моделирование теплового излучения газового объема 15 сферическими газовыми объемами: вид сверху (а) и спереди (б); 1–5 – сферические газовые объемы первого ряда

В каждом из 15 сферических газовых объемов выделяется равная мощность излучения, а именно $P_1 = P_2 = P_3 = \dots = P_{15} = 42 \cdot 10^3 / 15 = 2,8$ МВт.

Рассчитаем плотности падающих на расчетную площадку dF потоков тепловых излучений от сферических газовых объемов 1–3 (см. рис.3):

$$q_{1dF} = \frac{P_1 \cos \beta_1}{4\pi l_1^2} e^{-ki_1} = \frac{2,8 \cdot 10^3 \cdot \cos 27^\circ}{4 \cdot 3,14 \cdot 2,2^2} e^{-0,162 \cdot 2,2} = 28,7 \text{ кВт/м}^2;$$

$$q_{2dF} = \frac{P_2 \cos \beta_2}{4\pi l_2^2} e^{-ki_2} = \frac{2,8 \cdot 10^3 \cdot \cos 40^\circ}{4 \cdot 3,14 \cdot 3,8^2} e^{-0,162 \cdot 3,8} = 6,4 \text{ кВт/м}^2;$$

$$q_{3dF} = \frac{P_3 \cos \beta_3}{4\pi l_3^2} e^{-ki_3} = \frac{2,8 \cdot 10^3 \cdot \cos 14^\circ}{4 \cdot 3,14 \cdot 4,2^2} e^{-0,162 \cdot 4,2} = 6,22 \text{ кВт/м}^2.$$

Аналогичным образом определяем плотности падающих на расчетную площадку dF потоков тепловых излучений от 4–15 сферических газовых объемов. Находим суммарную плотность потока излучений 1–15 указанных объемов на площадку dF :

$$q_{\Sigma 15} = \sum_{i=1}^{15} q_{idF} = 207,5 \text{ кВт/м}^2.$$

Рассчитаем погрешность вычислений при моделировании теплового излучения газового объема в форме прямоугольного параллелепипеда 15 сферическими газовыми объемами:

$$\Delta_{15} = (1 - 207,5 / 212,2) \cdot 100 = 2,2 \text{ \%}.$$

Аналогичным образом моделируем тепловое излучение прямоугольного параллелепипеда 108 и 432 сферическими газовыми объемами. В результате расчетов получили следующие значения суммарных плотностей потоков излучений сферических газовых объемов на расчетную площадку dF :

$$q_{\Sigma 108} = \sum_{i=1}^{108} q_{idF} = 210,3 \text{ кВт/м}^2;$$

$$q_{\Sigma 432} = \sum_{i=1}^{432} q_{idF} = 213,1 \text{ кВт/м}^2.$$

Погрешность вычислений при моделировании теплового излучения газовых объемов в форме параллелепипеда 108 и 432 сферическими газовыми объемами составляет $\Delta_{108} = (1 - 210,3 / 212,2) \cdot 100 = 0,9 \text{ \%}$ и $\Delta_{432} = (1 - 212,2 / 213,1) \cdot 100 = 0,4 \text{ \%}$ соответственно.

Таким образом, погрешность вычислений при моделировании теплового излучения газового объема в форме параллелепипеда одним цилиндрическим газовым объемом равна 2,3 %, одним сферическим газовым объемом – 7,1 %, 15 сферическими газовыми объемами – 2,2 %, 108 сферическими газовыми объемами – 0,9 %, 432 сферическими газовыми объемами – 0,4 %. Отсюда следует, что газовый объем в форме параллелепипеда можно моделировать одним цилиндрическим газовым объемом, а также одной-двумя сотнями сферических газовых объемов и получать результат расчетов, обладающий высокой точностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Топки паровых котлов электростанций часто представляют собой геометрические тела в виде прямоугольных параллелепипедов, поэтому, вписывая в топки цилиндрические газовые объемы, можно выполнить расчеты теплообмена с погрешностью, не превышающей 3–5 %. Факельные нагревательные печи также являются геометрическими

телами в виде прямоугольных параллелепипедов. В факелы, выступающие источниками энергии в печах и представляющие собой эллипсоиды вращения, вписываем при проведении расчетов цилиндрические газовые объемы. Продукты горения заполняют печь в виде прямоугольного параллелепипеда, в который вписываем цилиндрические газовые объемы и определяем тепловые потоки от продуктов горения. При этом, как показали вышеприведенные аналитические исследования, погрешность расчетов не превышает 3–5 %. Электрические дуги в электродуговых сталеплавильных печах представляют собой ионизированные газовые объемы в форме усеченных конусов, в которые вписываем цилиндрические газовые объемы и осуществляем расчеты теплообмена электрических дуг с поверхностями нагрева с высокой точностью.

Факел в камерах сгорания газотурбинных установок (ГТУ), газотурбинных двигателей (ГТД), жидкостных реактивных двигателей (ЖРД) имеет сложную форму, которая зависит от количества горелок, завихрителей, организации движения воздуха, топлива, продуктов горения [2]. В камере имеется несколько активных зон горения топлива, факелов сложной геометрической формы. Расчет потоков тепловых излучений факелов на жаровую трубу, горелки, завихрители – сложная научная задача. Обычно информацию о потоках тепловых излучений факелов на поверхности нагрева камеры сгорания получают в результате долгих (длящихся многие месяцы) дорогостоящих испытаний указанной камеры на испытательных стендах. Научное открытие законов излучения газовых объемов позволяет моделировать тепловое излучение факелов камер сгорания ГТУ, ГТД, ЖРД цилиндрическими и сферическими газовыми объемами. Математическое моделирование дает возможность рассчитать потоки нагрева и охлаждения камеры сгорания, на стадии конструирования организовать рациональный теплообмен в камере, уменьшить сроки создания и испытаний и затраты на создание и проведение испытаний камеры на стендах [1–3].

Моделирование факела топок паровых котлов цилиндрическими газовыми объемами позволяет найти распределение плотности потоков излучений по периметру стен топок, ранжировать экранные поверхности топок по количеству полученного тепла и выявить наиболее напряженные участки для определения регламента ремонтных работ, реконструировать топки с целью повышения их коэффициента полезного действия [1–3].

За последнее столетие использование конструкторами законов излучения твердых тел, законов Стефана – Больцмана, Планка, Вина при конструировании твердотопливных топок в конце XX столетия дало возможность увеличить коэффициент полезного использования энергии топлива в этих установках с 25–30 % в начале XX столетия до 70–90 % в конце указанного столетия. Аналогичные процессы ожидаются в XXI века с использованием при конструировании факельных печей законов теплового излучения газовых объемов. В настоящее время коэффициент полезного использования энергии топлива в факельных печах составляет 25–45 %. Применение при конструировании и расчетах законов излучения газовых объемов дает возможность увеличить коэффициент полезного использования энергии топлива в факельных печах с 25–45 до 55–65 %, сэкономить миллионы тонн топлива.

Впервые в мировой научной практике в хаотичном тепловом излучении множества атомов, сопровождающих факельное сжигание топлива, выявлены законы, организующие порядок в хаосе, позволяющие рассчитать теплообмен и учитывать излучение всех атомов вместе и каждого атома в отдельности на расчетные площадки в печах, топках, камерах сгорания.

Все фундаментальные законы физики (законы Ньютона, Гука, Фурье, Ома и др.) имеют относительно простое написание, в них мало расчетных параметров, но именно в этом состоят их фундаментальность, всеобщность и всеохватность, мультидисциплинарность, точность описания явлений природы. Как и во всех фундаментальных законах физики, в законах теплового излучения газовых объемов есть все необходимое для расчета, они относительно просты. Законы теплового излучения газовых объемов компактны, несложны, используются для обучения студентов университетов, сотрудниками металлургических компаний для расчета рациональных энергетических режимов работы дуговых сталеплавильных печей [1–3]. На открытие законов теплового излучения газовых объемов, разработку теории теплообмена излучением автор потратил более 30 лет интенсивного творческого научного труда. Диплом о научном открытии законов теплового излучения газовых объемов автор получил в 2011 году после 35 лет научных изысканий и подтверждения законов и всех теоретических данных, экспериментальными исследованиями в печах, топках, камерах сгорания. Фундаментальные законы физики, в том числе законы теплового излучения газовых объемов, подтверждают известную истину: «Все необходимое – просто, все сложное не нужно». Российская металлургия сократила за последние 20 лет электропотребление в дуговых сталеплавильных печах на 28–30%. Определенная заслуга в этом, наряду с персоналом металлургических компаний, научно-педагогическим составом металлургических кафедр, принадлежит автору научного открытия. Признанием этого факта является награждение автора научного открытия и его учебника [1], в котором изложены открытые законы и разработанная на их основе теория теплообмена в дуговых сталеплавильных и факельных печах, топках, камерах сгорания, серебряной медалью международной выставки «Металл-Экспо 2018» в номинации «Лучшее издание в металлургической промышленности». Золотую медаль получил научно-педагогический состав НИТУ МИСИС. В выставке приняли участие 550 российских и иностранных компаний, ряд руководителей российских компаний входили в наградной комитет. За разработку инновационных электродуговых и факельных печей, топков, камер сгорания автор научного открытия награжден серебряной медалью международной выставки изобретений EXPROPRIOTY 2013.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань. 2014. 384 с.
2. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых сталеплавильных и факельных нагревательных печах, топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установках. М. – Вологда: Инфра-Инженерия. 2022. 452 с.
3. Макаров А.Н. Методология научных исследований в университетах и промышленных компаниях. М. – Вологда: Инфра-Инженерия. 2023. 276 с.
4. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: справочник. М.: Энергоатомиздат. 1991. 432 с.
5. Блох А.Г. Тепловое излучение в котельных установках. Л.: Энергия. 1967. 326 с.
6. Makarov A.N., Okuneva V.V., Galicheva M.K. Influence of the Length of a Torch Tongue on Heat Flow in a Burner Device // *Power Technology and Engineering*. 2017. № 4. P. 445–450.
7. Матрюков Б.С. Теплотехнические расчеты промышленных печей: учебник. М.: Металлургия. 1972. 368 с.

8. Адрианов В.Н. Основы радиационного и сложного теплообмена. М.: Энергия, 1972. 463 с.
9. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир. 1975. 934 с.
10. Спэрроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением. Л.: Энергия. 1971. 294 с.
11. Глинков М.А., Глинков Г.М. Общая теория печей. М.: Metallurgy. 1978. 264 с.
12. Телегин А.С., Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г. Тепломассоперенос. М.: Metallurgy. 1995. 400 с.
13. Makarov A.N. Laws of Heat Radiation from Sunrtgees and Gas Volumes // *Word Journal of Engineering and Technology*. 2015. № 3. P. 260–270.
14. Makarov A.N. Calculations of Heat Transfer in Torch Furnaces by Gas Volume Radiation Laws // *Word Journal of Engineering and Technology*. 2016. № 4. P. 488–503.
15. Makarov A.N. Fundamental Laws of Physics and Calculation of Heat Transfer in Combustion Chambers of Gas-Turbine Plants // *Word Journal of Engineering and Technology*. 2017. № 5. P. 358–375.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Макаров А.Н. Проверка на соответствие истине законов теплового излучения газовых объемов. Часть II. Примеры расчетов по законам теплового излучения цилиндрических и сферических газовых объемов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 4 (20). С. 66–76.

CHECKING THE LAWS OF THERMAL RADIATION OF GAS VOLUMES FOR THE CORRESPONDENCE TO THE TRUTH. PART II. EXAMPLES OF CALCULATIONS ACCORDING TO THE LAWS OF THERMAL RADIATION OF CYLINDRICAL AND SPHERICAL GAS VOLUMES

A.N. Makarov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Examples of calculations of heat transfer of gas volumes of electric arcs and torches with heating surfaces according to the laws of thermal radiation of cylindrical and spherical gas volumes are given. It is noted that the examples of calculations confirm the truth of the five laws of thermal radiation of gas volumes. It is indicated that the gas volume in the furnace of a steam boiler fills the entire furnace and has the shape of a rectangular parallelepiped; when modeling the radiation of a gas volume in the form of a rectangular parallelepiped by radiation of a cylindrical gas volume, the calculation error does not exceed 3 %. It is concluded that the error in calculations when modeling the radiation of a gas volume in the form of a rectangular parallelepiped by the radiation of several hundred spherical gas volumes inscribed in a parallelepiped is 0,9–0,4 %.

Keywords: thermal radiation, gas volume, laws, torch, electric arc, furnaces, furnaces, combustion chambers.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Makarov A.N. Checking the laws of thermal radiation of gas volumes for the correspondence to the truth. Part II. Examples of calculations according to the laws of thermal radiation of cylindrical and spherical gas volumes // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 4 (20), pp. 66–76.

УДК 629.7.052

ТЕОРЕМА О ЦЕНТРЕ n -СИММЕТРИИ ВЫПУКЛОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО ТЕЛА

Ал.А. Шум¹, А.М. Ветошкин²

¹ *Тверской государственной технической университет (г. Тверь, Тверская область)*

² *Мытищинский филиал Московского государственного
технического университета им. Н.Э. Баумана
(г. Мытищи, Московская область)*

© Шум Ал.А., Ветошкин А.М., 2023

Аннотация. Рассмотрено понятие центра n -симметрии пространственного тела. Указано, что частными случаями этого общего понятия являются центр s -симметрии (центр 0-симметрии) и центр c -симметрии (центр 1-симметрии). Доказана следующая теорема: в любой выпуклой области пространства можно определить функцию плотности так, что центр n -симметрии полученного тела будет находиться в любой наперед заданной внутренней точке этого тела (ранее были известны частные случаи этой теоремы, соответствующие значениям $n = 0$ и $n = 1$).

Ключевые слова: симметрия, c -симметрия, s -симметрия, n -симметрия, центр симметрии, функция плотности, выпуклое тело, масса, центр масс, электрическая машина.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-4-76-82

ВВЕДЕНИЕ

Существует большое количество методов и технологий механической и физико-технической обработки деталей машин (эти методы и технологии представлены в работах [1–13]). Чтобы правильно выбрать те или иные конкретные методы и технологии, в