

УДК 44.31.03:45.43.00:53.07.00

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА ЗАКОНОВ
КВАНТОВОГО ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ.
ЧАСТЬ I. ЗАКОНЫ КВАНТОВОГО ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ**

*А.Н. Макаров**Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Макаров А.Н., 2023

Аннотация. Приведено описание первого закона квантового теплового излучения ионизированных и неионизированных газовых объемов любой формы и величины. Дано математическое описание вывода второго-пятого законов квантового теплового излучения цилиндрических газовых объемов. Указано, что цилиндрическими газовыми объемами можно моделировать тепловое излучение электрических дуг электродуговых сталеплавильных, факельных нагревательных печей, топков паровых котлов электростанций, факелов камер сгорания газотурбинных установок электростанций, газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: квант, законы, тепловое излучение, газовые объемы, факел, электрическая дуга, печи, топки, камеры сгорания.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-2-44-54**ВВЕДЕНИЕ**

С 1940–1950-х гг. по настоящее время широкое распространение получило факельное сжигание газообразного, жидкого, пылевидного топлива в топках паровых котлов электростанций, камерах сгорания газотурбинных установок электростанций, газотурбинных двигателей в авиации. При факельном сжигании топлива образуются излучающие газовые объемы, причем 92–95% мощности факелов при сгорании топлива преобразуется в поток теплового излучения газовых объемов, а на долю конвекции и теплопроводности приходится 5–10% мощности факелов. Процесс горения топлива сопровождается переходом атомов, участвующих в реакции горения веществ, из одного стационарного состояния в другое с испусканием кванта теплового излучения. Испускание кванта указанного излучения происходит при переходе электрона с более удаленной от ядра орбиты на более близкую (см. второй постулат Бора). Для факельного сжигания топлива характерно трехмерное объемное квантовое излучение. В факеле, газовом объеме излучают кванты квадриллионы (10^{15} – 10^{45}) атомов. Излучение кванта каждого атома на расчетную площадку необходимо учесть, что является сверхсложной задачей. Для расчета теплового излучения на расчетную площадку квантов всех атомов, составляющих газовой объем, необходимо решение трехкратных интегральных уравнений. В XX–XXI вв. в мире не были решены вышеназванные уравнения для определения средней длины пути квантов от излучающих атомов газовых объемов, угловых коэффициентов излучения, потоков излучения газовых объемов на указанные площадки. В XX столетии законы теплового излучения газовых объемов не были открыты.

В 1996–2001 гг. автором настоящей статьи были открыты законы теплового квантового излучения газовых объемов, а именно первый закон теплового квантового излучения газовых объемов любой формы и величины, второй-пятый законы теплового квантового излучения цилиндрических и сферических газовых объемов. Цилиндрическими и сферическими газовыми объемами различных размеров, вплоть до сфер атомов, можно моделировать квантовое тепловое излучение электрических дуг и факелов любых размеров и форм, вписывая обозначенные объемы в электрические дуги электродуговых сталеплавильных печей и факелы печей, топков, камер сгорания. С открытием автором законов квантового теплового излучения газовых объемов появилась возможность получить полную картину теплообмена в электродуговых сталеплавильных и факельных нагревательных печах, топках, камерах сгорания, организовать в печах, топках, камерах сгорания рациональный теплообмен, снизить расход топлива и электроэнергии.

ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕПЛООВОГО КВАНТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ

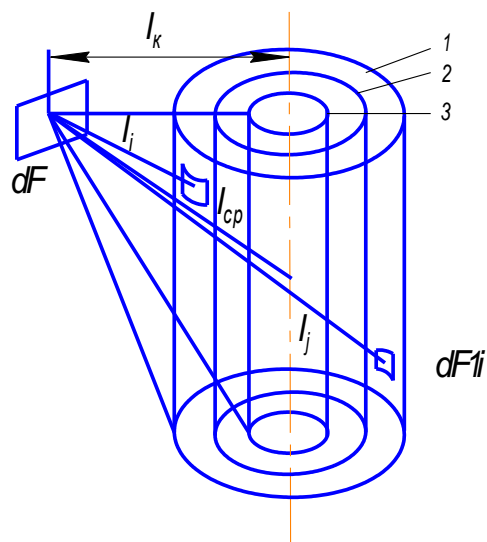
Сущность открытия заключается в следующем. Факел, создаваемый одиночной горелкой в печах и камерах сгорания, представляет собой эллипсоид вращения, в объеме которого происходит реакция горения топлива, а продукты сгорания вытесняются из эллипсоида новыми порциями топлива и окислителя. В эллипсоид вращения вписываются излучающие и поглощающие цилиндрические газовые объемы, которыми моделируется факел [1]. В топках паровых котлов факел представляет собой эллиптический газовый цилиндр, в который вписываются несколько десятков прямых круговых цилиндрических газовых объемов [2].

Рассмотрим топку парового котла энергоблока 300 МВт ТГМП-314, которая представляет собой прямоугольный параллелепипед высотой $H_T = 35$ м, шириной $a = 14$ м, глубиной $b = 7$ м. Факел и продукты горения занимают все пространство камеры топки. Форма факела по всей высоте топки – это эллиптический цилиндрический газовый объем, в который могут быть вписаны два или несколько (то есть более двух) круговых цилиндрических газовых объема. Изотермы делят круговые цилиндрические газовые объемы по высоте на несколько изотермических круговых цилиндрических или десятков изотермических круговых цилиндрических газовых объемов. Опишем излучение одного изотермического кругового цилиндрического газового объема, множеством которых моделируется факел, на элементарную площадку dF размером $0,5 \times 0,5$ м (рисунок).

Допустим, что при сгорании топлива образуется изотермическое цилиндрическое газовое тело высотой 10 м, диаметром 4,9 м. Объем этого тела равен $180,9$ м³. За 1 ч выделяется 700 МВт · ч энергии, которая равномерно распределяется по всему газовому объему цилиндра. Разделим изотермический цилиндрический излучающий и поглощающий газовый объем на три равных по объему цилиндрических тела, слоя 1–3 (рисунок). Радиус третьего цилиндра 1,39 м, второго 1,96, первого 2,4 м. Объем каждого цилиндрического слоя $60,3$ м³. Перпендикуляр к центру элементарной площадки проходит под углом 90° к оси симметрии цилиндрических газовых слоев через их верхнее основание. Кратчайшее расстояние l_k от оси коаксиальных цилиндрических газовых объемов, слоев до элементарной площадки составляет 5,2 м.

Изотермические цилиндрические газовые объемы равномерно заполнены излучающими частицами, атомами. Допустим, количество одновременно излучающих кванты энергии атомов в каждом из трех цилиндрических газовых объемов равно $10 \cdot 10^{30}$, общее

количество атомов – $30 \cdot 10^{30}$, и атомы равномерно распределены по всему газовому объему. Время пребывания излучающих частиц в топке 1–2 с.



К расчету излучений от коаксиальных цилиндров:

l_i, l_j – расстояния от элементарных площадок до расчетной площадки;

l_{cp} – среднearифметическое расстояние от элементарных площадок до расчетной площадки dF ; dF_i – часть поверхностного слоя атомов цилиндра 1

Плотность потока теплового излучения q_Φ , падающего от цилиндрического газового объема, факела на расчетную площадку на экранной поверхности труб топки, определяется тройным интегралом по высоте H , периметру Π и радиусу r большого цилиндрического объема 1, учитывающим излучение квантов всех $30 \cdot 10^{30}$ излучающих атомов на расчетную площадку dF :

$$q_\Phi = \iiint_{H \Pi r} \frac{P_i \cos \alpha_i \cos \beta_i}{\pi^2 \ell_i^2} d\alpha_i d\beta_i d\ell_i, \quad (1)$$

где α_i, β_i – углы между направлением излучения и нормалью соответственно к поверхности излучающей частицы, атома и расчетной площадки; P_i – мощность кванта излучения частицы, атома; ℓ_i – расстояние от излучающего атома до расчетной площадки.

Расчет трехкратного интеграла (1) представляет собой сложную математическую задачу. Решение задачи теплового излучения газовых объемов (1) в XX в., как следует из сказанного во введении, не было найдено, поэтому излучающие газовые объемы в расчетах безуспешно моделировались тепловым излучением множества твердых тел, заполняющих газовый объем. В XXI в. положение изменилось: в 2001 г. на помощь в расчетах теплового квантового излучения факелов приходят открытые автором в России законы теплового квантового излучения газовых объемов [3].

Первый закон теплового квантового излучения газовых объемов любой формы и любых размеров имеет следующую формулировку и математическую запись: «Плотность потока теплового излучения, падающего от газового объема на расчетную площадку, прямо пропорциональна его мощности, угловому коэффициенту излучения и обратно пропорциональна коэффициенту поглощения,

средней длине пути квантов от всех атомов объема до площадки и площади площадки»:

$$q_{FdF} = \frac{\varphi_{FdF} P_F}{F e^{\kappa \ell}}, \quad (2)$$

где φ_{FdF} – локальный угловой коэффициент излучения газового объема на расчетную площадку dF ; P_F – мощность теплового излучения газового объема; F – площадь поверхности расчетной площадки dF ; κ – коэффициент поглощения газовой среды печи, топки, камеры сгорания; ℓ – средняя длина пути квантов от всех атомов газового объема до расчетной площадки.

При вычислении по выражению (2) возникает сложность с определением локальных угловых коэффициентов излучения газовых объемов на расчетные площадки и вычислением средней длины пути квантов от всех атомов газового объема до расчетной площадки. Однако на помощь в расчетах локальных угловых коэффициентов излучения газовых объемов и средней длины пути квантов от атомов до расчетной площадки приходят другие (второй-пятый) законы теплового излучения цилиндрических газовых объемов. При открытии очередных законов теплового квантового излучения газовых объемов использовали описанные ниже допущения и математические вычисления.

ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕПЛООВОГО КВАНТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ

Допустим, что излучение внутренних слоев атомов цилиндрических газовых объемов поглощается соседними слоями и наружу выходит излучение только наружных поверхностных слоев указанных атомов. В этом случае излучение изотермических коаксиальных цилиндрических газовых объемов, слоев можно представить излучением трех цилиндров (см. рисунок). Локальные угловые коэффициенты излучения цилиндров 1–3 на dF определяются следующим образом [4]:

$$\begin{aligned} \varphi_{F_1 dF} &= \frac{\varphi_{dFF_1} F_{dF}}{F_1} = \frac{0,23 \cdot 0,25}{3,14 \cdot 4,8 \cdot 10} = 0,0003815; \\ \varphi_{F_2 dF} &= \frac{\varphi_{dFF_2} F_{dF}}{F_2} = \frac{0,188 \cdot 0,25}{3,14 \cdot 3,92 \cdot 10} = 0,0003815; \\ \varphi_{F_3 dF} &= \frac{\varphi_{dFF_3} F_{dF}}{F_3} = \frac{0,133 \cdot 0,25}{3,14 \cdot 2,78 \cdot 10} = 0,0003815, \end{aligned} \quad (3)$$

где φ_{FdF} – угловые коэффициенты излучения элементарной площадки на цилиндры соответственно 1–3 (см. рисунок); F_{dF} – площадь элементарной площадки dF ; F_1 – F_3 – площадь боковой поверхности цилиндров 1–3 (см. рисунок).

Из результатов расчета (3) следует второй закон теплового излучения цилиндрических газовых объемов: «Локальные угловые коэффициенты квантового излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов, слоев равны». Математическая запись второго закона имеет вид

$$\varphi_{F_1 dF} = \varphi_{F_2 dF} = \varphi_{F_3 dF}. \quad (4)$$

Второй закон теплового квантового излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов был впервые рассмотрен в [2] и подтвержден в [1]. При моделировании

излучения сотен и тысяч коаксиальных цилиндрических газовых слоев, входящих в объем первого цилиндра, получили бы аналогичный результат: локальные угловые коэффициенты квантового излучения коаксиальных цилиндрических газовых слоев равны. Из равенства этих коэффициентов следует равенство средних угловых коэффициентов квантового излучения коаксиальных цилиндрических объемов, слоев, так как они представляют собой сумму элементарных угловых коэффициентов квантового излучения коаксиальных цилиндрических объемов, слоев. Средний угловой коэффициент излучения показывает долю излучения коаксиального цилиндрического объема, слоя на поверхность, состоящую из множества элементарных площадок. Из первого закона следует, что при расчете угловых коэффициентов квантового излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов, слоев достаточно определить угловой коэффициент квантового излучения коаксиального цилиндрического объема малого диаметра, соосного с цилиндрическим газовым объемом, то есть цилиндрической оси симметрии газовых объемов (см. рисунок).

Угловые коэффициенты излучения являются основными расчетными величинами теплообмена излучением. Угловой коэффициент квантового излучения представляет собой сложную геометрическую характеристику формы, размеров и взаимного расположения двух тел, находящихся в состоянии теплообмена излучением друг с другом. Обычно в технических расчетах наибольшие трудности связаны с определением геометрических характеристик теплообмена излучением между телами. При использовании аналитических методов расчета элементарные и средние угловые коэффициенты квантового излучения тел определяются путем прямого интегрирования соответствующих зависимостей для коэффициентов. Интегрирование при определении угловых коэффициентов квантового излучения тел, поверхностей, объемов связано с вычислением двух- и четырехкратных интегралов, что существенно усложняет задачу. При расчете углового коэффициента квантового излучения большого цилиндрического газового объема l на площадку dF (см. рисунок) необходимо проводить интегрирование как по высоте, так и по периметру и глубине цилиндрического объема, слоя, то есть решать трех-, четырехкратный интеграл. Второй закон освобождает нас от трех-, четырехкратного интегрирования и позволяет решить задачи с помощью однократного интегрирования по высоте цилиндрического газового объема малого диаметра, цилиндрической оси симметрии.

Таким образом, второй закон квантового излучения изотермических коаксиальных цилиндрических газовых излучающих объемов, из которых состоят электрическая дуга и факел, позволяет находить угловые коэффициенты квантового излучения любого цилиндрического газового объема путем однократного интегрирования геометрических и тригонометрических зависимостей коаксиального цилиндрического газового объема малого диаметра или, как его часто определяют, цилиндрического линейного источника излучения. Автором путем интегрирования геометрических зависимостей между линейными источниками излучения и поверхностями нагрева при любых их пространственных расположениях практически решены задачи определения угловых коэффициентов квантового излучения указанных тел и поверхностей [5–7]. Иными словами, из второго закона теплового квантового излучения изотермических цилиндрических газовых объемов получены аналитические зависимости для определения угловых коэффициентов квантового излучения изотермических коаксиальных цилиндрических газовых объемов любых размеров при различном пространственном расположении газовых объемов и поверхностей нагрева.

ТРЕТИЙ-ПЯТЫЙ ЗАКОНЫ ТЕПЛООВОГО КВАНТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ

Рассчитаем плотность потока квантового излучения на площадку dF коаксиальных цилиндрических газовых объемов, в которых выделяется мощность излучения: $P_1 = P_2 = P_3 = 700/3 = 233,3$ МВт. Принимаем параметры газовой среды, характерные для топки парового котла: концентрация частиц $\mu = 0,06$ г/м³; диаметр $d_r = 0,3$ мкм; плотность $\rho = 2 \cdot 10^3$ кг/м³; коэффициент ослабления среды $k = 1,5\mu / (d_r\rho) = 0,15$. Результаты расчета плотностей потоков тепловых излучений коаксиальных цилиндрических газовых объемов от всех атомов на площадку dF (см. рисунок) по первому закону теплового квантового излучения газовых объемов:

$$q_{F_1dF} = q_{F_2dF} = q_{F_3dF} = \frac{\Phi_{F_1dF} \cdot P_1}{F_{dF}} e^{-kl_1} = \frac{\Phi_{F_2dF} \cdot P_2}{F_{dF}} e^{-kl_2} = \frac{\Phi_{F_3dF} \cdot P_3}{F_{dF}} e^{-kl_3} =$$

$$= (0,0003815 \cdot 233,3 \cdot 10^3 / 0,25) e^{-0,15 \cdot 7,8} = 110 \text{ кВт/м}^2,$$

где $l_1 = l_2 = l_3$ – средняя длина пути квантов от всех атомов 1–3 цилиндрических газовых объемов (см. рисунок).

Среднюю длину пути квантов от всех атомов l_{cp} (см. рисунок) определяли как среднеарифметическое расстояние от элементарных площадок, из которых состоит поверхность цилиндрического излучающего объема, до расчетной площадки dF [8–11], а также как среднюю длину пути квантов от всех излучающих атомов цилиндрического газового объема до расчетной площадки. Средняя длина пути квантов от всех атомов любого изотермического коаксиального цилиндрического объема равна среднеарифметическому расстоянию от оси симметрии коаксиальных цилиндрических объемов до расчетной площадки dF .

Результат расчета по формуле (5) свидетельствует еще о двух законах квантового излучения коаксиальных излучающих и поглощающих цилиндрических газовых объемов, из которых состоят электрическая дуга и факел.

Третий закон: «Средняя длина пути квантов от всех атомов коаксиальных цилиндрических газовых объемов до расчетной площадки равна среднеарифметическому расстоянию от оси симметрии цилиндрических объемов до расчетной площадки»:

$$l_{cp} = l_1 = l_2 = l_3 = \frac{\sum_{j=1}^{10 \cdot 10^3} \ell_j}{10 \cdot 10^{30}},$$

где ℓ_j – расстояние от каждого из $10 \cdot 10^{30}$ j -го атома газовых объемов 1–3 до расчетной площадки (см. рисунок).

Четвертый закон: «Плотности потоков квантовых излучений, падающих от изохорных коаксиальных цилиндрических газовых объемов на расчетную площадку, равны»:

$$q_{F_1dF} = q_{F_2dF} = q_{F_3dF}.$$

Суммарная плотность потоков квантовых излучений, падающих от трех коаксиальных цилиндрических газовых объемов на площадку dF , определяется согласно принципу суперпозиции:

$$q_{FdF} = \sum_{i=1}^3 q_{F_i dF} = 330 \text{ кВт/м}^2. \quad (8)$$

Допустим, что мощность квантового излучения 700 МВт выделяется в одном из цилиндрических газовых объемов (например, в третьем). Найдем плотность потока излучения третьего цилиндрического газового объема на площадку dF :

$$q_{F_3 dF} = \frac{\varphi_{dFF_3} \cdot P_3}{F_{dF}} = (0,0003815 \cdot 700 \cdot 10^3 / 0,25) e^{-0,15 \cdot 7,8} = 330 \text{ кВт/м}^2. \quad (9)$$

Пятый закон теплового квантового излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов выводится из результатов расчетов по формулам (8) и (9): «Суммарная плотность потоков квантовых излучений, падающих на расчетную площадку от нескольких излучающих и поглощающих цилиндрических газовых объемов, равна плотности потока квантового излучения коаксиального цилиндрического газового объема малого диаметра на расчетную площадку при мощности излучения, выделяющейся в цилиндрическом газовом объеме малого диаметра, равной суммарной мощности излучений, выделяющейся во всех коаксиальных цилиндрических газовых объемах, излучающих на расчетную площадку»:

$$q_{F_3 dF} = \sum_{i=1}^3 q_{F_i dF} \cdot$$

Это очень важный закон квантового излучения коаксиальных излучающих и поглощающих цилиндрических газовых объемов, из которых состоят электрическая дуга и факел, так как он подтверждает обоснованность перехода от трех-, четырехкратных интегралов к однократному интегрированию при расчете локальных угловых коэффициентов квантового излучения цилиндрических газовых объемов на элементарные площадки и позволяет вывести аналитические выражения для определения локальных угловых коэффициентов квантового излучения цилиндрических газовых объемов малого диаметра (цилиндрического линейного источника излучения) на элементарные площадки при любом их взаимном пространственном положении [5–7].

Из первого-пятого законов теплового квантового излучения цилиндрических газовых объемов синтезирован следующий вывод: «При моделировании факела и электрической дуги коаксиальными цилиндрическими газовыми объемами, слоями результаты расчета теплообмена включают в себя объемное квантовое излучение и поглощение всех слоев факела и электрической дуги и их теплообмен со всеми поверхностями нагрева».

Преимущества моделирования факела цилиндрическими газовыми объемами:

1. Цилиндрические газовые объемы – это геометрические фигуры, вписывающиеся в факел, создаваемый одиночной горелкой и представляющий собой эллипсоид вращения, и больше заполняющие объем эллипсоида вращения, чем прямоугольные параллелепипеды, которыми традиционно моделируется факел.

2. При расчетах теплообмена излучением цилиндрическими поглощающими и излучающими газовыми объемами моделируется объемное квантовое излучение факела, а в случае моделирования прямоугольными параллелепипедами – поверхностное излучение факела гранями параллелепипеда.

3. В цилиндр, используемый для моделирования факела, могут быть вписаны сотни и тысячи коаксиальных цилиндрических газовых объемов, которыми моделируются квантовое излучение и поглощение внутренних газовых слоев факела. При этом получают одинаковый результат расчета теплообмена излучением и тем самым заменяют множество излучающих и поглощающих цилиндрических газовых слоев одним цилиндрическим газовым объемом. Таким образом, от декларации расчета объемного излучения факела при его моделировании прямоугольными параллелепипедами переходят к реальному расчету объемного квантового излучения факела при его моделировании цилиндрами.

Все пять законов зарегистрированы в виде научного открытия и объединяются общим понятием инвариантности (одинаковости) квантовых излучений изотермических коаксиальных цилиндрических газовых неионизированных и ионизированных излучающих объемов, слоев, образующихся при факельном сжигании газообразного, жидкого, пылевидного топлива и горении электрической дуги в парах металлов при атмосферном давлении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В конце 1990-х гг. была подтверждена выдвинутая автором в 1979–1982 гг. гипотеза о возможности моделирования множества изотермических коаксиальных газовых ионизированных излучающих слоев, из которых состоит электрическая дуга, излучающим центральным изотермическим коаксиальным цилиндрическим газовым ионизированным слоем дуги осью симметрии дуги. Излучением центрального коаксиального излучающего цилиндрического ионизированного газового объема столба дуги, или осью столба, можно моделировать квантовое излучение всего этого столба. Таким образом, гипотеза, выдвинутая в 1979–1982 гг. получила свое научное подтверждение с открытием законов теплового квантового излучения изотермических коаксиальных цилиндрических газовых неионизированных и ионизированных излучающих объемов, образующихся при факельном сжигании газообразного, жидкого, пылевидного топлива и горении электрической дуги в парах металлов при атмосферном давлении.

Способ передачи тепла от источников энергии к поверхностям нагрева, то есть теплообмен квантовым излучением и его зависимость от мощности и размеров источников излучения, у факельных и электродуговых печей, топков паровых котлов, камер сгорания газотурбинных установок схож. На этом явлении автором построена единая методология расчета теплообмена квантовым излучением в факельных и дуговых печах, топках, камерах сгорания, позволяющая объединить два различных физических явления, а именно выделение тепловой энергии при сгорании топлива и выделение ее при протекании электрического разряда в газе, на основе общего для этих двух явлений результата преобразования энергии топлива и электрической дуги в энергию потока квантового теплового излучения.

Модель факела в виде объема, состоящего из множества соосных излучающих и поглощающих цилиндрических газовых объемов, слоев используется при расчете теплообмена квантовым излучением в факельных печах, топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установок [1]. Результаты расчетов хорошо согласуются с результатами измерений тепловых потоков и температур в печах, топках, камерах сгорания [2]. Важнейшая особенность разработанного метода расчета теплообмена квантовым излучением (по сравнению с существующими) состоит в том, что факел, то есть активный объем печей, топков, камер сгорания, в котором протекает реакция горения топлива, отделен от пассивных газовых объемов, где находятся продукты горения. Создан

метод расчета мощности излучения каждого атома в каждом из активных объемов, составляющих факел, и, что еще важнее, получены аналитические выражения, связывающие энергетические, геометрические, оптические параметры факела и поверхностей нагрева и учитывающие излучение каждого атома факела на поверхность нагрева.

Преимущества предлагаемого метода расчета теплообмена в факельных печах заключаются в следующем. При моделировании факела изотермическими коаксиальными цилиндрическими объемами (так же, как при моделировании электрических дуг коаксиальными цилиндрическими газовыми ионизированными объемами) можно абстрагироваться от температуры факела и дуги как основного параметра при расчетах теплообмена квантовым излучением в печах и топках. Схожесть происходящих в электрической дуге и факеле физических процессов, а именно преобразование электрической энергии в дуге и энергии топлива в факеле в энергию потока квантов излучения [12–15], позволяет идентифицировать эти два физических явления и применять одинаковые аналитические выражения при расчетах теплообмена излучением (в частности, для вычисления плотностей потоков квантовых излучений дуги и факела на расчетные площадки).

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. Распределение тепловых потоков в топке парового котла ТГМП-204 // *Электрические станции*. 2003. № 1. С. 20–25
3. Makarov A.N. Theory of radiative Heat Exchange in furnaces, fire boxes, combustion chambers is replenished by four new laws // *Science Discovery*. 2014. Vol. 2. № 2. pp. 34–42.
4. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: справочник. М.: Энергоатомиздат. 1991. 432 с.
5. Макаров А.Н. Определение угловых коэффициентов излучения линейного источника на параллельные и перпендикулярные плоскости // *Теплоэнергетика*. 1997. № 1. С. 65–68.
6. Макаров А.Н. Определение угловых коэффициентов излучения линейного источника на произвольно расположенные плоскости // *Теплоэнергетика*. 1998. № 12. С. 58–62.
7. Макаров А.Н. Определение угловых коэффициентов излучения линейного источника и факела топок паровых котлов // *Теплоэнергетика*. 2000. № 8. С. 63–66.
8. Блох А.Г. Тепловое излучение в котельных установках. Л.: Энергия. 1967. 326 с.
9. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидравлическое сопротивление. М.: Энергоатомиздат. 1990. 367 с.
10. Аметистов Е.В. Основы теории теплообмена. М.: МЭИ. 2000. 247 с.
11. Теплотехнические расчеты металлургических печей / под ред. А.С. Телегина. М.: Металлургия. 1993. 368 с.
12. Макаров А.Н. Закономерности теплообмена газовых слоев факела и экранов топок паровых котлов. Ч. 1. Геометрическая и физическая модель факела как источника теплового излучения // *Теплоэнергетика*. 2014. № 9. С. 26–32.
13. Макаров А.Н. Закономерности теплообмена газовых слоев факела и экранов топок паровых котлов. Ч. 2. Законы излучения газовых слоев и разработанная на их основе методика расчета теплообмена в печах, топках, камерах сгорания // *Теплоэнергетика*. 2014. № 10. С. 24–33.

14. Макаров А.Н. Закономерности теплообмена газовых слоев факела и экранов топок паровых котлов. Ч. 3. Примеры расчета теплообмена в факельных печах и топках паровых котлов // *Теплоэнергетика*. 2014. № 11. С. 46–54.

15. 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.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Макаров А.Н. Математические доказательства законов квантового теплового излучения газовых объемов. Часть I. Законы квантового теплового излучения цилиндрических газовых объемов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 2 (18). С. 44–54.

MATHEMATICAL EVIDENCE OF THE LAWS OF QUANTUM THERMAL RADIATION OF GAS VOLUMES. PART I. LAWS OF QUANTUM THERMAL RADIATION OF CYLINDRICAL GAS VOLUMES

A.N. Makarov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The description of the first law of quantum thermal radiation of ionized and non-ionized gas volumes of any shape and size is given. A mathematical description of the derivation of the second-fifth laws of quantum thermal radiation of cylindrical gas volumes is given. It is indicated that cylindrical gas volumes can simulate the thermal radiation of electric arcs of electric arc steelmaking, flare heating furnaces, furnaces of steam boilers of power plants, flares of combustion chambers of gas turbine plants of power plants, gas turbine engines.

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

REFERENCES

1. Makarov A.N. Teploobmen v elektrodugovyh i fakel'nyh metallurgicheskikh pechah i energeticheskikh ustanovkakh [Heat transfer in electric arc and flare metallurgical furnaces and power plants]. St.-Petersburg: Lan. 2014. 384 p.
2. Makarov A.N. Distribution of heat flows in the furnace of the steam boiler TGMP-204. *Elektricheskie stanzii*. 2003. No. 1, pp. 20–25. (In Russian).
3. Makarov A.N. Theory of radiative Heat Exchange in furnaces, fire boxes, combustion chambers are replenished by four new laws. *Science Discovery*. 2014. Vol. 2. No. 2, pp. 34–42.

4. Bloch A.G., Zhuravlev Yu.A., Ryzhkov L.N. Teploobmen izlucheniem [Heat transfer by radiation]: Handbook. Moscow: Energoatomizdat. 1991. 432 p.
5. Makarov A.N. Determination of the angular coefficients of radiation of a linear source on parallel and perpendicular planes. *Teploenergetika*. 1997. No. 1, pp. 65–68. (In Russian).
6. Makarov A.N. Determination of the angular coefficients of radiation of a linear source on arbitrarily located planes. *Teploenergetika*. 1998. No. 12, pp. 58–62. (In Russian).
7. Makarov A.N. Determination of angular coefficients of radiation of a linear source and a torch of furnaces of steam boilers. *Teploenergetika*. 2000. No. 8, pp. 63–66. (In Russian).
8. Bloch A.G. Teplovoe izluchenie v kotel'nyh ustanovkakh [Thermal radiation in boiler installations]. L.: Energy. 1967. 326 p.
9. Kutateladze S.S. Teploperedacha i gidravlichesкое soprotivlenie [Heat Transfer and Hydraulic Resistance]. Moscow: Energoatomizdat. 1990. 367 p.
10. Ametistov E.V. Osnovy teorii teploobmena [Fundamentals of the theory of heat transfer]. Moscow: MEI. 2000. 247 p.
11. Thermotechnical calculations of metallurgical furnaces [Tehnicheskie raschety metallurgicheskikh pechei] / ed. A.S. Telegin. Moscow: Metallurgy. 1993. 368 p.
12. Makarov A.N. Patterns of heat transfer of gas layers of a torch and screens of furnaces of steam boilers. P. 1. Geometrical and physical model of a torch as a source of thermal radiation. *Teploenergetika*. 2014. No. 9, pp. 26–32. (In Russian).
13. Makarov A.N. Patterns of heat transfer of gas layers of a torch and screens of furnaces of steam boilers. P. 2. Laws of radiation of gaseous layers and a method for calculating heat transfer in furnaces, fireboxes, combustion chambers developed on their basis. *Teploenergetika*. 2014. No. 10, pp. 24–33. (In Russian).
14. Makarov A.N. Patterns of heat transfer of gas layers of a torch and screens of furnaces of steam boilers. P. 3. Examples of calculation of heat transfer in torch furnaces and furnaces of steam boilers. *Teploenergetika*. 2014. No. 11, pp. 46–54. (In Russian).
15. Makarov A.N. Teploobmen v elektrodugovyh staleplavil'nyh i fakil'nyh nagrevatel'nyh pechah, topkakh parovyh kotlov, kamerah sgoraniya gazoturbinnnyh ustanovkakh [Heat transfer in electric arc steel-smelting and flare heating furnaces, furnaces of steam boilers, combustion chambers of gas turbine plants]. Moscow – Vologda: Infra-Engineering. 2022. 452 p.

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. Mathematical evidence of the laws of quantum thermal radiation of gas volumes. Part I. Laws of quantum thermal radiation of cylindrical gas volumes// Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 2 (18), pp. 44–54.