УДК 536.24:669.187

ЗАКОНЫ ТЕПЛООБМЕНА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ И ФАКЕЛА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Макаров А.Н.

Тверской государственный технический университет, Тверь, Россия

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, соглашение №14.B37.21.1067.

АННОТАЦИЯ

Показана ошибочность использования закона излучения твердых тел, закона Стефана-Больцмана, для расчета теплообмена факела, газообразного источника излучения, в нагревательных печах и энергетических установках. Предложено моделировать факел изотермическими цилиндрическими газовыми объемами. Изложены результаты научного открытия законов излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов. На основании научного открытия разработана геометрическая, физическая модель факела и методика расчета теплообмена в факельных печах и энергетических установках.

ВВЕДЕНИЕ

Объединяет факельные и электродуговые печи, топки паровых котлов, камеры сгорания газотурбинных установок способ передачи тепла от источников энергии к поверхностям нагрева: теплообмен излучением и его зависимость от мощности и размеров источников излучения. В дугах дуговых и плазменно-дуговых сталеплавильных печей 86-96% электрической мощности преобразуется в поток излучения [1,2].

При факельном сжигании газообразного, жидкого и пылевидного топлива 90-99% мощности, выделяющейся в факеле, излучается им по всем направлениям, в том числе на нагреваемые изделия [3,4]. Теплообмен излучением является основным видом теплообмена в нагревательных печах, топках, камерах сгорания газотурбинных установок [5].

На основе научного открытия законов излучения газовых слоев электрической дуги и факела построена единая методология расчета теплообмена излучением в электродуговых и факельных печах, топках, камерах сгорания, позволяющая объединить два различных физических явления: выделение тепловой энергии при сгорании топлива и протекании электрического разряда в газе, на основе общего для этих двух явлений результата преобразования энергии топлива и электрической энергии в энергию потока излучения [6,7].

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Рабочее пространство печей, топок представляет собой прямоугольный параллелипед и факел в классическом зональном методе расчета теплообмена моделируется набором прямоугольных параллелипедов, заполняющх свободное пространство печей, с различными температурами и радиационными характеристиками [3,4]. Моделирование факела параллелепипедами вносит значительную погрешность в результаты расчета, так как фотографирование факела, создаваемого одиночной горелкой, показывает, что он представляет собой осесимметричное тело вращения – эллипсоид, чего нельзя сказать о параллелепипеде.

На протяжении XX века расчет теплообмена в факельных печах, топках, камерах сгорания осуществляется на основе закона, сформулированного Стефаном в 1879 году и теоретически основанного Больцманом в 1884 году для расчета излучения твердых тел:

$$q = c_0 \varepsilon_{пр} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi_{12} , \qquad (1)$$

где c_o – постоянная Стефана-Больцмана; $\varepsilon_{пр}$ – приведенный коэффициент излучения; T_1, T_2 – температура, соответственно, тел 1 и 2; φ_{12} – средний угловой коэффициент излучения тела 1 на тело 2; q – тепловой поток с тела 1 на тело 2.

Высокой степени точности при использовании закона излучения твердых тел для расчета излучения газа, образующего факел, достичь не удалось. Излучение газов, образующих факел, не подчиняется закону Стефана-Больцмана: излучение паров углекислоты, входящих в газ, пропорционально температуре в степени 3,5, а водяного пара в 3-й степени [8].

Накопилось множество фактов, доказывающих необходимость развития теории теплообмена в печах, топках, камерах сгорания. В факельных печах для увеличения их производительности увеличивают расход топлива без изменения температуры факела. При увеличении расхода топлива в 2 раза мощность факела также увеличивается в 2 раза при неизменной температуре факела, производительность печи увеличивается также в 2 раза.

В топках паровых котлов для снижения выхода оксидов азота температуру факелов снижают путем введения газов рециркуляции в топочную камеру, при этом производительность котлоагрегата не снижается.

При расчетах теплообмена в факельных печах по закону Стефана-Больцмана наблюдаются парадоксальные случаи. При нагреве воздуха, подаваемого в горелку, от 20 до 600 °С мощность факела увеличилась на 17%, а температура газа, образующего факел, с 1300 до 2000 °С. Расчет тепловых потоков на нагреваемое изделие по закону Стефана-Больцмана показывает, что при нагреве воздуха от 20 до 600 °С результирующие тепловые потоки увеличиваются в 5 раз, что противоречит закону сохранения энергии. Стало очевидным, что при расчетах теплообмена необходимо абстрагироваться от температуры факела. Практика эксплуатации печей, топок, камер сгорания показывает, что определяющее влияние на теплообмен и на производительность печей оказывают теплота сгорания, расход топлива, геометрические размеры, форма факела и его взаиморасположение с поверхностями нагрева.

Решение проблемы было найдено с открытием законов излучения газовых слоев, образующих факел и электрическую дугу. Законы были открыты автором в 2001 году и последующие 10 лет отданы на апробацию открытия, экспериментальное подтверждение, разработку аналитической модели факела, методики расчета теплообмена в факельных печах, топках, камерах сгорания, после чего в 2010 году была подана заявка, а в 2011 году получен диплом на научное открытие [9].

ЗАКОНЫ ТЕПЛООБМЕНА ЭЛЕТРИЧЕСКОЙ ДУГИ И ФАКЕЛА

Рассмотрим топку парового котла энергоблока 300 МВт ТГМП-314, которая представляет собой прямоугольный параллелепипед высотой $H_т$ = 35 м, шириной a = 14м, глубиной b = 7м (рис. 1). Факел и продукты горения занимают все пространство камеры топки. Форма факела по всей высоте топки это эллиптический цилиндрический газовый объем, в которой могут быть вписаны два или несколько круговых цилиндрических газовых объемов. Изотермы делят круговые цилиндрические газовые объемы по высоте на несколько изотермических круговых цилиндрических или несколько десятков изотермических круговых цилиндрических газовых объемов. Рассмотрим излучение одного изотермического кругового цилиндрического газового объема, множеством которых моделируется факел, на элементарную площадку dF размером 0,5×0,5 м (рис. 1).

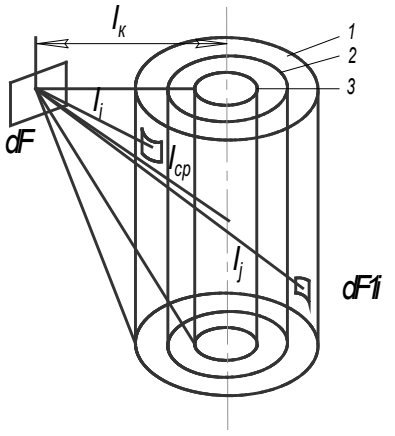

Рис.1 К расчету излучений от коаксиальных цилиндров 1 – 3. l_i, l_j, $l_{ср}$ – расстояние от элементарных площадок и среднеарифметическое расстояние до расчетной площадки dF.

Допустим, что при сгорании топлива образуется изотермическое цилиндрическое газовое тело высотой 10 м, диаметром 4,9 м, объем которого равен 180,9 м^3. За 1 ч выделяется 700 МВт × ч энергии, которая равномерно распределяется по всему объему цилиндра. Разделим изотермический цилиндрический излучающий и поглощающий газовый объем на три равных по объему цилиндрических тела, слоя (рис. 1). Радиус третьего цилиндра − 1,39, второго − 1,96, первого − 2,4 м, объем каждого цилиндрического слоя − 60,3 м^3. Перпендикуляр к центру элементарной площадки проходит под углом 90^0 к оси симметрии цилиндрических газовых слоев через их верхнее основание. Кратчайшее расстояние $l_к$ от оси коаксиальных цилиндрических газовых объемов, слоев до элементарной площадки составляет 5,2 м. Допустим, что излучение внутренних слоев цилиндрических газовых объемов поглощается соседними слоями и наружу выходит излучение только наружных поверхностных слоев цилиндрических газовых объемов. В этом случае излучение изотермических коаксиальных цилиндрических газовых объемов, слоев можно представить излучением трех цилиндров. Элементарные угловые коэффициенты излучения цилиндров 1 – 3 на dF определяются следующим образом [7]:

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

где $\varphi_{dFF_1}, \varphi_{dFF_2}, \varphi_{dFF_3}$ – угловые коэффициенты излучения элементарной площадки на цилиндры соответственно 1 − 3; F_{dF} – площадь элементарной площадки dF; $F_1 - F_3$ – площадки боковой поверхности цилиндров 1 − 3.

Из результатов расчета (2) следует первый закон излучения газовых слоев электрической дуги и факела: «Элементарные угловые коэффициенты излучения коаксиальных цилиндрических объемов, слоев, из которых состоят электрическая дуга и факел равны». Математическая запись первого закона имеет вид:

$$\varphi_{F_1 dF} = \varphi_{F_2 dF} = \varphi_{F_3 dF} \qquad (3)$$

Интегрирование при определении угловых коэффициентов излучения тел, поверхностей, объемов связано с вычислением двух- и четырехкратных интегралов, что существенно усложняет задачу. При расчете углового коэффициента излучения большого цилиндрического газового объема, слоя 1 на площадку dF необходимо проводить интегрирование как по высоте, так и по периметру и глубине цилиндрического объема, слоя, то есть решать трех-, четырехкратный интеграл. Первый закон освобождает нас от трех-, четырехкратного интегрирования и позволяет решить задачи с помощью однократного интегрирования по высоте цилиндрического газового объема малого диаметра.

Рассчитаем плотность потока излучения на площадку dF коаксиальных цилиндрических газовых слоев, в которых выделяется мощность излучения $P_1 = P_2 = P_3 = 700/3 = 233{,}3$ МВт. Принимаем параметры среды, характерные для топки парового котла: концентрация частиц $\mu = 0{,}06$ г/м^3, диаметр $d_r = 0{,}3$ мкм, плотность $\rho = 2 \cdot 10^3$ кг/м^3, коэффициент ослабления среды $k = 1{,}5\mu/(d_r\rho) = 0{,}15$. Результаты расчета плотностей потоков излучений коаксиальных цилиндрических газовых слоев на площадку dF:

$$q_{F_1 dF} = q_{F_2 dF} = q_{F_3 dF} = \frac{\varphi_{F_1 dF} \cdot P_1}{F_{dF}} e^{-kl_1}$$
$$= \frac{\varphi_{F_2 dF} \cdot P_2}{F_{dF}} e^{-kl_2} = \frac{\varphi_{F_3 dF} P_3}{F_{dF}} e^{-kl_3} =$$
$$= \frac{0{,}0003815 \cdot 233{,}3 \cdot 10^3}{0{,}25} e^{-0{,}15 \cdot 7{,}8} = \qquad (4)$$
$$= 110 \text{ кВт/м}^2$$

где $l_1 = l_2 = l_3$ – средняя длина пути лучей 1 – 3 цилиндров.

Среднюю длину пути лучей $l_{ср}$ (рис. 1) определяли как среднеарифметическое расстояние от элементарных площадок из которых состоит поверхность цилиндрического излучающего слоя до расчетной площадки dF. Средняя длина пути лучей любого изотермического коаксиального цилиндрического слоя равна среднеарифметическому расстоянию от оси симметрии коаксиального цилиндрического слоя до расчетной площадки dF.

Результаты расчета по формуле (4) свидетельствуют еще о двух законах излучения коаксиальных излучающих и поглощающих цилиндрических газовых объемов, из которых состоят электрическая дуга и факел.

Второй закон: «Средняя длина пути лучей от коаксиальных цилиндрических газовых

слоев, из которых состоят дуга и факел, до расчетной площадки равна среднеарифметическому расстоянию от оси симметрии цилиндрических слоев до расчетной площадки»:

$$l_{ср}=l_1=l_2=l_3 \quad (5)$$

Третий закон: «Плотности потоков излучений, падающего от изохорных коаксиальных цилиндрических газовых объемов, слоев, из которых состоят дуга и факел, на расчетную площадку равны»:

$$q_{F_1dF}=q_{F_2dF}=q_{F_3dF} \quad (6)$$

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

$$q_{FdF}=\sum_{i=1}^{3} q_{F_idF}=330\ кВт/м^2 \quad (7)$$

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

$$q_{F_3dF}=\frac{\varphi_{dFF_3}\cdot P_3}{F_{dF}}=\frac{0{,}0003815\cdot 700\cdot 10^3}{0{,}25}e^{-0{,}15\cdot 7{,}8}=$$
$$=330\ кВт/м^2. \quad (8)$$

Четвертый закон излучения электрической дуги и факела выводится из результатов расчетов по формулам (7) и (8): «Суммарная плотность потоков излучений, падающих на расчетную площадку от нескольких излучающих и поглощающих цилиндрических газовых объемов, слоев, из которых состоят электрическая дуга и факел, равна плотности потока излучения коаксиального цилиндрического газового объема малого диаметра на расчетную площадку при мощности излучения, выделяющейся в цилиндрическом газовом объеме малого диаметра, равной суммарной мощности излучения, выделяющейся во всех коаксиальных цилиндрических газовых объемах, излучающих на расчетную площадку»:

$$q_{F_3dF}=\sum_{i=1}^{3} q_{F_idF} \quad (9)$$

Это очень важный закон 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 излучения цилиндрических газовых объемов на элементарные площадки и позволяет вывести аналитические выражения для определения локальных угловых коэффициентов излучения цилиндрических газовых объемов малого диаметра (линейного источника излучения) на элементарные площадки при любом их взаимном пространственном положении.

Пятый закон излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов, из которых состоят электрическая дуга и факел, синтезирован из вышеизложенных четырех законов и записывается следующим образом: «При моделировании факела и электрической дуги коаксиальными цилиндрическими газовыми объемами, слоями результаты расчета теплообмена включают в себя объемное излучение и поглощение всех слоев факела и электрической дуги и их теплообмен со всеми поверхностями нагрева».

Модель факела в виде объема, состоящего из множества соосных излучающих и поглощающих цилиндрических газовых объемов, слоев используется при расчете теплообмена излучением в факельных печах [7], топках паровых котлов [10], камерах сгорания газотурбинных установок [11]. Результаты расчетов хорошо согласуются с результатами измерений тепловых потоков и температур в печах, топках, камерах сгорания [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открытие закономерностей, сопровождающих преобразование энергии топлива в тепловую, лучистую в факеле металлургических печей и электрической энергии в тепловую, лучистую в электрической дуге электросталеплавильных печей, подтвердило правомерность применения гипотезы о моделировании электрических дуг цилиндрическими источниками теплового излучения и позволило создать модель факела в виде эллиптического источника теплового излучения, состоящего из множества изотермических коаксиальных цилиндрических газовых объемов. Геометрическая, физическая и разработанная на их основе аналитическая модель дуги, факела многократно использовалась для расче-

тов теплообмена в электродуговых, плазменно-дуговых, факельных печах, результаты расчетов тепловых потоков соответствуют результатам измерений тепловых потоков в печах [9-16, 19, 20]. Открытие создает новые возможности анализа теплообмена в факельных и электродуговых печах, на основе открытия могут быть решены многие научные и технические проблемы, созданы новые более совершенные факельные и электродуговые металлургические печи, высокоэффективные способы нагрева и плавки металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никольский Л.Е. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей / Л.Е. Никольский, В.Д. Смоляренко, Л.Н. Кузнецов – М.: Металлургия, 1981. – 344с.
2. Макаров А.Н. Электрические, геометрические, тепловые параметры дуг, горящих в парах металлов / А.Н. Макаров, А.Ю. Соколов // Электрометаллургия. – 2009. – №11. – С.19-24.
3. Блох А.Г. Теплообмен излучением: справочник / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432с.
4. Теплотехнические расчеты при автоматизированном проектировании нагревательных и термических печей: справочник / Под ред. А.Б. Усачева – М.: Черметинформация, 1999. – 185с.
5. Стационарные газотурбинные установки / Под ред. Л.В. Арсеньева и В.Г. Тырышкина – Л. Машиностроение, 1989. – 462с.
6. Макаров А.Н. Оптимальные тепловые режимы дуговых сталеплавильных печей / А.Н. Макаров, А.Д. Свенчанский – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 96с.
7. Макаров А.Н. Законы теплообмена электрической дуги и факела в металлургических печах и энергетических установках / А.Н. Макаров – Тверь: ТвГТУ, 2012. – 164с.
8. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидравлическое сопротивление: справочное пособие / С.С. Кутателадзе – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367с.
9. Макаров А.Н. Закономерная связь между параметрами излучения изотермических коаксиальных цилиндрических газовых слоев, образующихся при факельном сжигании топлива и горении электрической дуги в парах металлов при атмосферном давлении – закономерности Макарова (диплом на научное открытие №417) / А.Н. Макаров // Научные открытия: сборник кратких описаний научных открытий, научных идей, научных гипотез – 2011. Составитель В.В. Потоцкий – М.: Изд. РАЕН, 2012. – С. 33-36.
10. Макаров А.Н. Применение модели линейного источника для определения падающих потоков излучений в топке парового котла / А.Н. Макаров // Теплоэнергетика. – 2001. - №7. – С. 39-43.
11. Макаров А.Н. Расчет теплообмена в камере сгорания стационарной газотурбинной установки / А.Н. Макаров, Д.В. Чернышев, В.В. Воропаев // Промышленная энергетика. – 2006. - №1. – С. 31-36.