

УДК 669.187:621.186

**ЗАКОНЫ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ
ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ,
ФАКЕЛЬНЫХ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ, ТОПОК ПАРОВЫХ КОТЛОВ,
КАМЕР СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК***А.Н. Макаров**Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Макаров А.Н., 2024

Аннотация. Изложены результаты анализа источников тепла, поступающего в высокоомощную дуговую сталеплавильную печь (ДСП). Указано, что электрические дуги являются основными источниками тепла в ДСП; теплообмен ионизированных газовых объемов дуг и неионизированных газовых объемов факелов газокислородных горелок с поверхностями нагрева в ДСП осуществляется тепловым излучением. Доказано наличие значительной погрешности при расчете теплообмена газовых объемов дуг, факелов с поверхностями нагрева по закону теплового излучения твердых тел, т.е. по закону Стефана – Больцмана. Рассмотрены открытые в России в 1996–2001 годах законы квантового теплового излучения газовых объемов электрических дуг и факелов ДСП, факелов, факельных нагревательных печей (ФНП), топков паровых котлов (ТПК) тепловых электрических станций, камер сгорания (КС) газотурбинных установок (ГТУ) электростанций. Отмечено, что, согласно открытым законам, в газовые объемы дуг, факелов вписываются цилиндрические газовые объемы и в расчетах их тепловое излучение с высокой точностью моделируется тепловым излучением цилиндрических осей симметрии. На основе открытых законов разработана методика расчета теплообмена в ДСП, ФНП, ТПК, КС ГТУ.

Ключевые слова: электрическая дуга, факел, теплообмен излучением, газовые объемы, законы теплового излучения, печи, топки, камеры сгорания.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-4-58-67**ВВЕДЕНИЕ**

Электрические дуги являются основными источниками тепла в дуговых сталеплавильных печах (ДСП). Согласно результатам анализа энергетических балансов, на долю дуг в современных высокоомощных ДСП приходится 55–65 % тепла, поступающего в печь. Доли тепла, выносимого в ДСП другими источниками, распределяются следующим образом: тепло реакций окисления металла – 12–20 %; тепло факелов (газовых объемов) газокислородных горелок (ГКГ) – 7–14 %; тепло инжекторов угольного порошка – 12–18 % [1; 2]. Среди внешних источников энергии (дуг, факелов ГКГ, инжекторов) электрические дуги являются наиболее эффективными источниками тепловой энергии в ДСП. Коэффициент полезного использования тепла дуг (КПД дуг) за одну плавку в современных высокоомощных ДСП в среднем составляет 0,76–0,78, коэффициент полезного использования тепла газовых объемов факелов ГКГ не превышает 0,55, а

коэффициент полезного использования тепла газовых объемов инжекторов угольного порошка составляет 0,28–0,36 [2]. Коэффициент полезного использования тепла газовых объемов факелов ГКГ максимален в начале расплавления шихты при горении факела в нише в шихте. Он снижается до значения 0,25–0,3 при горении факела ГКГ на жидкометаллическую ванну. Коэффициент полезного использования тепла внутреннего источника тепловой энергии реакции окисления металлов составляет 1,0. Это тепло полностью усваивается ванной [2], но окислять, сжигать металл в ДСП экономически нецелесообразно.

Вся электрическая мощность, подведенная к дуге, преобразуется в ней в тепловой поток. Теплообмен электрических дуг с поверхностями нагрева в ДСП осуществляется за счет теплового излучения [3]. Тепловые потоки, падающие на поверхности стен, свода, ванны, на 95 % состоят из потоков тепловых излучений [2; 3]. В высокомошных ДСП 92–94 % мощности дуги выделяется в столбе дуги, представляющем собой ионизированный газовый объем, и излучается им в виде теплового потока во всех направлениях в рабочем пространстве ДСП. Столб дуги в ДСП – это ионизированный газовый объем в форме усеченного конуса. В связи с равномерным распределением мощности по высоте столба в расчетах теплообмена он моделируется цилиндрическим ионизированным газовым объемом [2]. Незначительная часть мощности (2–3 % мощности дуги) передается ионизированным газом на основе конвекции ванне металла. Часть мощности (5–8 % мощности дуги) выделяется в анодно-катодных пятнах на электроде и в ванне металла и передается теплопроводностью в равных долях объемам графитового электрода и ванны металла.

При факельном сжигании топлива в ГКГ ДСП, в факельных нагревательных печах (ФНП) в металлургии и машиностроении, в топках паровых котлов (ТПК), камерах сгорания (КС) газотурбинных установок (ГТУ) тепловых электрических станций (ТЭС) тепловые потоки, падающие от газового объема факела на поверхности нагрева, на 95–97 % состоят из потоков теплового излучения [4–7]. Процессы преобразования электрической энергии в газовом объеме электрической дуги, горящей в ДСП, и энергии топлива при его факельном сжигании в ГКГ в ТПК ТЭС, КС ГТУ ТЭС идентичны: электрическая энергия в электрической дуге ДСП и энергия топлива при его факельном сжигании преобразуются в поток теплового излучения [8]. На протяжении XX века, до открытия в России законов теплового излучения ионизированных (электрическая дуга в ДСП) и неионизированных (факел ГКГ в печах, топках, КС) газовых объемов, расчет теплообмена в печах, топках, КС осуществляли по закону теплового излучения твердых тел Стефана – Больцмана [4–8]. На основе данного закона были разработаны методы расчета Чандрасекара, Шварцильда – Шустера, зональный, численный и другие, однако они не получили широкого распространения, так как излучение газовых объемов не подчиняется закону теплового излучения твердых тел и погрешность расчетов составляет 200–300 % и более [8]. Плотность потока теплового излучения твердого тела, топлива на нагреваемое твердое тело, согласно закону Стефана – Больцмана, определяется по формуле [4–7]

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

где c_s – коэффициент излучения абсолютно черного тела (АЧТ); $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент излучения; T_1, T_2 – температура горящего твердого топлива на колосниковых

решетках и поверхности нагрева соответственно, K ; φ_{12} – угловой коэффициент, т.е. доля излучения слоя топлива на поверхность нагрева.

ПОГРЕШНОСТЬ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕНА В ДСП, ФНП, ТПК, КС ГТУ

Закон Стефана – Больцмана используется для определения плотностей потоков тепловых излучений твердого топлива (угля, торфа, сланцев) (рис. 1), находящегося на колосниковых решетках, на экранные поверхности труб в ТПК электростанций. В этом случае названный закон дает безукоризненный результат расчета [4].



Рис. 1. Горение твердого топлива на колосниковой решетке в ТПК

Использование закона Стефана – Больцмана для расчета плотностей потоков теплового излучения газовых объемов электрических дуг, факелов ГКГ в ДСП, факелов в нагревательных печах, ТПК, КС ГТУ в энергетике приводит к значительным погрешностям. Например, в ФНП для нагрева слитков перед прокаткой мощность газового объема факела ГКГ, созданного сжиганием газообразного топлива, составила 5 МВт при температуре 20 °С подаваемого в ГКГ воздуха. Среднемассовая температура газового объема факела составляет 1 300 °С [9]. Средняя плотность теплового потока излучения газового объема факела на расчетную площадку на слитках, рассчитанная по формуле (1), равняется 40 кВт/м². При подогреве подаваемого в ГКГ воздуха до 600 °С среднемассовая температура газового объема факела возросла до 2 000 °С, а мощность факела – на 17 %. При расчетах по выражению (1) плотность потока теплового излучения газового объема факела на расчетную площадку на слитках увеличилась с 40 до 200 кВт/м², т.е. в 5 раз, а скорость нагрева слитков также должна возрасти в 5 раз, что противоречит закону сохранения энергии. В реальных условиях эксплуатации нагреваемой печи при подогреве воздуха до 600 °С и увеличении мощности газового объема факела на 17 % плотность теплового потока от факела и скорость нагрева слитков увеличились на 17 %, т.е. прямо пропорционально увеличению мощности газового объема факела, а не температуре в четвертой степени [9]. Погрешность в расчетах теплового излучения газового объема факела на поверхность слитков составила, согласно закону теплового излучения твердых тел, 427 %.

Применение закона теплового излучения твердых тел (формулы (1)) для расчета плотности потока теплового излучения газового ионизированного объема дуги на

расчетные площадки в ДСП также неприемлемо. Среднемассовая температура дуги в ДСП всего номенклатурного ряда от 0,5 до 200 т в жидкие периоды плавки составляет 6 000 °С [10–12]. При расчетах по формуле (1) получаем одинаковую плотность потока теплового излучения дуги на поверхности нагрева в ДСП-1,5 и ДСП-150 (1,5 и 150 т), одинаковую производительность печей при мощности дуг в этих печах 0,4 МВт и 80 МВт соответственно. В реальности производительность 1,5-тонной ДСП составляет 0,5 т/ч, а 150-тонной – около 200 т/ч, т.е. производительность ДСП зависит от мощности дуг, а не от температуры дуг в четвертой степени, закон теплового излучения твердых тел (1) неприемлем для расчета теплообмена газовых ионизированных и неионизированных объемов с поверхностями нагрева.

ЗАКОНЫ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ

В 1996–2001 годы в России были открыты законы теплового излучения ионизированных (электрические дуги в ДСП) и неионизированных (факелы в ДСП, нагревательных печах, ТПК, КС ГТУ) газовых объемов [13]. Первый закон теплового излучения ионизированных и неионизированных газовых объемов любой формы (рис. 2) и любых габаритов вывели на основе математических расчетов [8; 13]. Он имеет следующий вид:

$$q_{GF} = \frac{\varphi_{GF} P_G}{F e^{kl}}, \quad (2)$$

где q_{GF} – плотность потока теплового излучения газового объема на расчетную площадку F , кВт/м²; φ_{GF} – угловой коэффициент, т.е. доля излучения газового объема на расчетную площадку; P_G – мощность газового объема, кВт; F – площадь расчетной площадки, м²; e – число натуральных логарифмов; k – коэффициент поглощения газового объема; l – средняя длина пути лучей квантов от всех атомов газового объема до расчетной площадки, м.



Рис. 2. Горение газообразного, жидкого, пылевидного топлива с образованием газового объема в ТПК [14]

Определение доли излучения газового объема на расчетную площадку и установление средней длины пути лучей квантов от всех атомов газового объема до

площадки – это сверхсложные математические задачи. Для определения доли излучения и средней длины путей квантов от всех квинтиллионов (10^{30}) атомов газового объема необходимо решить трехкратные интегральные уравнения по длине, ширине, высоте газового объема. В XX веке решения данных уравнений по объему газового объема не было найдено ни в России, ни в других странах. Задачи расчета доли излучения газового объема на площадку и средней длины пути квантов от всех атомов до расчетной площадки были решены автором настоящей работы после открытия законов теплового излучения цилиндрических газовых объемов [8; 13]. Цилиндрические газовые объемы вписываются в газовые объемы электрических дуг, факелов ГКГ ДСП, ФНП, ТПК, КС ГТУ ТЭС.

Второй закон теплового излучения газовых объемов имеет следующую формулировку и аналитическую запись: «Угловые коэффициенты, т.е. доля излучения на расчетную площадку, цилиндрического газового объема φ_{GF} и его цилиндрической оси симметрии φ_{OF} равны при равенстве количества атомов и мощностей в цилиндрическом объеме и его цилиндрической оси симметрии»:

$$\varphi_{GF} = \varphi_{OF}. \quad (3)$$

Уникальное явление, описанное вторым законом теплового излучения газовых объемов, происходит в том случае, когда все атомы большого цилиндрического газового объема радиальным усилием сжаты на цилиндрическую ось объема. В этом случае мощности теплового излучения цилиндрического газового объема и его цилиндрической оси симметрии равны. Второй закон теплового излучения газовых объемов позволил осуществить переход от нерешенных тройных интегралов по длине, ширине, высоте газового объема (при определении доли излучения газового объема на расчетную площадку и средней длины пути квантов от всех атомов объема до площадки) к однократным интегралам по высоте оси симметрии газового объема с геометрическими и тригонометрическими функциями в подынтегральных выражениях, связывающих площадку и все атомы газового объема. Однократные интегралы для расчета доли излучения цилиндрического газового объема электрической дуги, факела ГКГ ДСП, ФНП, ТПК, КС ГТУ на расчетную площадку решены автором для любого положения цилиндрической оси симметрии газового объема дуги, факела и расчетной площадки [8].

С открытием третьего закона теплового излучения газовых объемов было найдено простое решение сверхсложной задачи определения средней длины пути квантов от всех квинтиллионов атомов газового объема до расчетной площадки: «Средняя длина пути квантов от всех квинтиллионов атомов цилиндрического газового объема до расчетной площадки l_{GF} равна среднеарифметическому расстоянию от оси симметрии цилиндрического газового объема l_{OF} до расчетной площадки»:

$$l_{GF} = l_{OF}. \quad (4)$$

Третий закон теплового излучения газовых объемов дал возможность решить в России сверхсложную задачу (которая не была решена в других странах мира) определения средней длины пути квантов от атомов (которых, например, в ТПК энергоблока 800 МВт столько, сколько песчинок в пустыне Сахара) до расчетной площадки. После открытия третьего закона теплового излучения газовых объемов решение задачи оказалось простым (в несколько алгебраических действий) [8].

Четвертый закон теплового излучения газовых объемов является следствием второго и третьего законов: «Плотности потоков тепловых излучений на расчетную

площадку цилиндрического газового объема $q_{ГФ}$ и газового объема его цилиндрической оси симметрии $q_{ОФ}$ равны при равенстве в этих газовых объемах количества излучающих атомов и мощностей тепловых излучений»:

$$q_{ГФ} = q_{ОФ}. \quad (5)$$

Открытие законов теплового излучения газовых объемов позволило выявить уникальное физическое явление: в газовые объемы электрических дуг, факелов ГКГ, факелов любых размеров ФНП, ТПК, КС можно вписывать цилиндрические газовые объемы и моделировать, рассчитывать с высокой точностью тепловое излучение газового объема на основе теплового излучения его цилиндрической оси симметрии на любую расчетную площадку.

МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕКТОВ

В электрическую дугу ДСП вписывается один цилиндрический газовый объем. В газовые объемы факелов ГКГ ДСП, факелов ФНП, ТПК, КС (в зависимости от распределения изотерм по объему факела) вписываются несколько цилиндрических газовых объемов или несколько десятков цилиндрических газовых объемов, от каждого из которых по формуле (1) определяются плотности потоков излучений цилиндрических газовых объемов и суммарная плотность потока теплового излучения газового объема факела. В книге [8] приведены экспериментальные подтверждения открытых законов. Измерения тепловых потоков на действующих ДСП свидетельствуют о том, что погрешность при математическом моделировании теплового излучения газовых объемов электрических дуг, факелов ГКГ в ДСП, факелов в ФНП, ТПК, КС тепловым излучением вписанных в них цилиндрических газовых объемов, их цилиндрической осью симметрии не превышает 6–8 %.

Открытые законы теплового излучения газовых объемов, как и законы теплового излучения твердых тел Стефана – Больцмана, относятся к фундаментальным законам физики, обладают мультидисциплинарностью и используются в металлургии, энергетике, различных отраслях машиностроения [8; 13]. Разработанная на основе научного открытия методика позволяет рассчитать теплообмен газового объема факела ГКГ и поверхностей нагрева ДСП при их любом пространственном положении. Расчеты распределения плотностей потоков тепловых излучений газового объема факела ГКГ по поверхности ванны, согласно открытым законам и разработанной методике расчета, показывают, что чем меньше угол между осью симметрии газового объема факела ГКГ и поверхностью ванны, тем больше плотность теплового потока излучения газового объема факела на поверхность ванны [8; 13].

Открытие фундаментальных законов физики – редкое событие в истории человечества, которое происходит один раз в 80–100 лет. Подтверждением данного факта являются учебники физики [15], в которых изложены около 30 фундаментальных законов физики, открытые за последние 2 500 лет истории человечества. После учреждения Нобелевской премии в 1900 г. ученые, открывшие фундаментальные законы физики, были ее удостоены: В. Вин – за открытие законов теплового излучения твердых тел (1911 г.), М. Планк – за открытие кванта излучения (1918 г.), Н. Бор – за заслуги в изучении строения атома и излучения из него (1922 г.). Нобелевской премии были бы удостоены и Стефан с Больцманом за открытие закона теплового излучения твердого тела, но она была

учреждена уже после их смерти. С 1922 г. и до настоящего времени Нобелевская премия присуждалась за открытия явлений природы (например, нейтрона, позитрона, космических лучей и т.д.), великие изобретения (к примеру, интегральные схемы, оптические системы передачи данных, светодиоды), но ни разу не присуждалась за открытие фундаментальных законов физики, поскольку после 1922 г. не было совершено открытий такого уровня [15].

На основе законов теплового излучения газовых объемов была разработана методика расчета теплообмена в ДСП, позволяющая определить тепловые потоки излучения, падающие от дуг с различными геометрическими и электрическими параметрами на поверхности стен, свода, ванны, рассчитать коэффициент полезного использования тепла дуг η_d (КПД дуг) при различных электротехнологических режимах, высоте слоя шлака, диаметре распада электродов, расстоянии от дуг до стен, прогнозировать удельный расход электроэнергии при заглублении дуг в шлак различной высоты и определять другие энергетические параметры плавок [8; 13]. Открытые законы теплового излучения газовых объемов позволили установить, что при полном заглублении дуг в шлак тепловые потоки их излучения преобразуются в углублениях в ванне, шлаке в потоки конвективные при турбулентном перемещении дугами шлака и металла из углубления на поверхность ванны, а также в потоки теплопроводности, нагревающие весь объем ванны и шлак [13]. Остаются неизученными процессы теплопередачи дуг в углублениях в ванне металла и шлаке и процессы передачи тепла из углублений под дугами на периферийные участки ванны, на периферийные участки шлака и металла, отсутствуют данные о распределении изотерм по поверхности шлака и металла в окислительный период перед выпуском металла в печь-ковш.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе научного открытия автором была разработана теория теплообмена в ДСП, ФНП, ТПК, КС ГТУ. Она представлена в учебном пособии [13] и монографии [8]. Пособие рекомендовано федеральным учебно-методическим объединением по образованию в области металлургии для использования в университетах. Как и открытые законы, учебник мультидисциплинарен и применяется при обучении студентов, магистрантов, аспирантов по направлениям «Металлургия», «Теплоэнергетика и теплотехника», «Электроэнергетика и электротехника» «Энергетическое машиностроение», «Техническая физика», «Технологические машины и оборудование» в ведущих университетах России: МИСИС; МЭИ; МГТУ им. Н.Э. Баумана; Московском политехническом университете; Уфимском авиационном техническом университете; Южно-Уральском государственном университете; Казанском (Приволжском) федеральном университете; Казанском национальном исследовательском техническом университете; Уральском федеральном университете; Томском политехническом университете; Сибирском университете науки и технологий; Пермском национальном исследовательском политехническом университете; Санкт-Петербургском горном университете; Магнитогорском техническом университете; Российском профессионально-педагогическом университете; Алтайском техническом университете; Казахском агротехническом университете, а также в других университетах России и ближнего зарубежья. В подтверждение сказанного можно набрать в поисковой системе интернета: «Макаров, теплообмен в рабочих программах», после чего найти рабочие программы дисциплин в университетах, где используется данное учебное пособие.

Открытые законы квантового теплового излучения газовых объемов факелов и разработанная на их основе методика расчета теплообмена используются в практической

деятельности в металлургических, энергетических, промышленных компаниях для расчета рациональных конструкций ДСП, ФНП, ТПК, КС ГТУ, повышения коэффициента полезного использования тепла топлива и электрической дуги, снижения расхода топлива и электрической энергии, увеличения надежности и срока службы экранных труб, горелок, жаровых турбин и других конструкций печей, топков, КС, сокращения выбросов загрязняющих веществ в регионах.

В РСФСР в конце 1980-х годов, например, удельное потребление электроэнергии в электродуговой ДСП (ЭДСП) вместимостью 100 т стали составляло 450–460 кВт · ч/т. К 2015 году за счет технологических факторов, рациональной организации теплообмена в ДСП удельное потребление электроэнергии снизилось до 350–360 кВт · ч/т. Экономия электроэнергии составляет 100 млн кВт · ч на одну печь в год. В этом есть заслуга сотрудников металлургических компаний, а также профессорско-преподавательского состава кафедр металлургии, которые их готовят. Кроме того, определенная заслуга принадлежит и А.Н. Макарову – разработчику пионерской теории теплообмена в ЭДСП. Данная теория используется для подготовки специалистов в университетах и для расчета рационального теплообмена в ЭДСП в металлургических компаниях.

Подробно информация о выводе законов квантового теплового излучения газовых объемов факелов и их мультидисциплинарном использовании в различных отраслях промышленности, энергетике, металлургии и сфере образования изложена в статьях журналов [17–27], включенных в мировые базы данных Web of Science и Scopus, а также в видеозаписях, которые можно посмотреть, если набрать в поисковой системе: «ВКонтакте, ТвГТУ, видео, лекции профессора А.Н. Макарова».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности тепловой работы электропечи ДСП-120 Consteel на Ашинском металлургическом заводе / В.Г. Евстратов [и др.] // *Электротехника*. 2012. № 8. С. 2–6.
2. Дорофеев Г.А., Зинягин Т.А., Макаров А.Н. Производство стали на основе железа прямого восстановления. Старый Оскол: ТНТ, 2021. 324 с.
3. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. М.: Металлургия, 1981. 344 с.
4. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
5. Расчет нагревательных и термических печей: справочник / под ред. В.М. Тымчака, В.Л. Гусовского. М.: Металлургия, 1983. 480 с.
6. Зигель Р., Хауэлл Д. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. 934 с.
7. Сперроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением. Л.: Энергия, 1971. 294 с.
8. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых сталеплавильных и факельных нагревательных печах, топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установок. Москва – Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 452 с.
9. Мاستрюков Б.С. Теплотехнические расчеты промышленных печей: учебник. М.: Металлургия, 1972. 368 с.
10. Егоров А.В. Электроплавильные печи черной металлургии. М.: Металлургия, 1985. 280 с.
11. Огороков Н.А. Дуговые сталеплавильные печи. М.: Металлургия, 1971. 347 с.
12. Сисоян Г.А. Электрическая дуга в электрической печи. М.: Металлургия, 1971. 304 с.
13. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках: учебное пособие. СПб.: Лань, 2014. 384 с.

14. Сайт компании DURAG GROUP. URL: www.durag.com (дата обращения: 23.09.2024).
15. Трофимова Т.И. Курс физики: учебник для студентов вузов. М.: Высшая школа, 2001. 369 с.
16. Дорофеев Г.А., Ашпин Н.А., Степанов Я.М., Зинягин Г.А., Макаров А.Н. Металлургия железа – от огня Прометея к термической плазме: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2024. 324 с.
17. Makarov A.N. Calculation of Heat Radiation from Gas Volume of the Torch. Part II. Calculations of Radiation from the on Burner // *JP Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. No. 16 (1), pp. 43–52.
18. Makarov A.N. Calculation of Heat Transfer in Torch Furnaces // *JP Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. No. 18(1), pp. 1–20.
19. Makarov A.N. Calculation of Heat Transfer in Furnaces of Steam Boilers under Laws of Radiation of Gas Volume // *JP Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. No. 18 (2), pp. 423–436.
20. Makarov A.N. Radiation from Large Gas Volumes and Heat Exchange in Steam Boiler Furnaces // *Power Technology and Engineering*. 2015. No. 3 (49), pp. 196–201.
21. Makarov A.N. Flare Temperature and Nitrogen Oxide Emission Reduction and Heat Transfer in the TGMP-314I Steam Boiler Firebox // *Power Technology and Engineering*. 2016. No. 2 (50), pp. 200–203.
22. 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. No. 4 (51), pp. 445–450.
23. Makarov A.N. Calculation and Analysis of the Relationship between the Efficiency and Position of Electric Arcs and Power Consumption in Electric Arc Furnaces (EAF) of Smaller and Larger Capacity. Part I. Calculation and Analysis of the Relationship between Arc Efficiency and Power Consumption // *Metallurgist*. 2019. Vol. 63. No. 3–4, pp. 341–349.
24. Makarov A.N. Calculation and Analysis of the Relationship between the Efficiency and Position of Electric Arcs and Power Consumption in Electric Arc Furnaces (EAF) of Smaller and Larger Capacity. Part 2. Calculation and Analysis of the Relationship between Position Arcs, Walls and Power Consumption // *Metallurgist*. 2019. Vol. 63. No. 5–6, pp. 441–450.
25. Makarov A.N. Effect of the Sloganeer Thickness, Gas Composition, and Furnace Capacity on the Arc Efficiency and Heat Transfer in Arc Furnaces. Part I. Effect of the Slag Thickness and Furnace Capacity on Arc Efficiency // *Metallurgist*. 2021. Vol. 64. No. 9–10, pp. 987–996.
26. Makarov A.N. Effect of the Sloganeer Thickness, Gas Composition, and Furnace Capacity on the Arc Efficiency and Heat Transfer in Arc Furnaces. Part II. Effect of the Slag Thickness on the Magnitude of Arc Heat Radiation Incident to the Walls // *Metallurgist*. 2021. Vol. 64. No. (11-12), pp. 1121–1129.
27. Makarov A.N. Complex Heat Transfer in a Bath under Arcs of High-power Arc Steel-melting Furnaces. Part I. Laws of Thermal Radiation of Gas Volumes and their Rationale for Calculating Heat Transfer in EAFs // *Metallurgist*. 2024. Vol. 67. No. 9–10, pp. 1438–1447.

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. Законы теплового излучения газовых объемов электродуговых сталеплавильных печей, факельных нагревательных печей, топок паровых котлов, камер сгорания газотурбинных установок // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 4 (24). С. 58–67.

**LAWS OF THERMAL RADIATION OF GASEOUS VOLUMES
OF ELECTRIC ARC STEEL-MELTING FURNACES, FLARE HEATING FURNACES,
STEAM BOILER FURNACES, COMBUSTION CHAMBERS
OF GAS TURBINE PLANTS**

A.N. Makarov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The results of the analysis of heat sources entering a high-power arc steelmaking furnace (ASF) are presented. It is stated that electric arcs are the main sources of heat in ASF; heat exchange of ionized gas volumes of arcs and non-ionized gas volumes of flares of gas-oxygen burners with heating surfaces in ASF is carried out by thermal radiation. It is proved that there is a significant error in calculating the heat exchange of gas volumes of arcs and flares with heating surfaces according to the law of thermal radiation of solid bodies, i.e. according to the Stefan – Boltzmann law. The laws of quantum thermal radiation of gas volumes of electric arcs and flares, flares, flare heating furnaces (FHF), steam boiler furnaces (SBF) of thermal power plants, combustion chambers (CC) of gas turbine units (GTU) of power plants discovered in Russia in 1996–2001 are considered. It is noted that, according to the open laws, cylindrical gas volumes of arcs, flares are inscribed in the gas volumes of arcs, flares and in calculations their thermal radiation is modeled with high accuracy by thermal radiation of cylindrical symmetry axes. On the basis of the open laws the methodology of heat exchange calculation in ASF, FHF, SBF, CC of GTU is developed.

Keywords: electric arc, torch, heat exchange by radiation, gas volumes, laws of thermal radiation, furnaces, fireboxes, combustion chamber.

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: gtu_kafedra_ese@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Makarov A.N. Laws of thermal radiation of gaseous volumes of electric arc steel-melting furnaces, flare heating furnaces, steam boiler furnaces, combustion chambers of gas turbine plants // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 4 (24), pp. 58–67.