

## ПРЕДИСЛОВИЕ

**В**местимость дуговых сталеплавильных печей увеличилась с 1,5–3 т в 1910 г. до 100–150 т в 1979 г., удельная мощность возросла с 220 до 800 кВА/т стали. Увеличение удельной мощности вызвало в конце 1970-х гг. интенсивное оплавление огнеупоров, резкое уменьшение срока службы футеровки, увеличение простоев печей, связанное с заменой футеровки стен, сводов. В это время ученые, исследователи, в том числе автор учебника (тогда аспирант Московского энергетического института) и руководитель научной работы, крупный ученый, создатель первой в России кафедры электротермических установок и автор первого учебника по электротермическим установкам, изданного в 1948 г., доктор технических наук профессор А. Д. Свенчанский обратили внимание на неизученность явлений, отсутствие методик расчета теплообмена в дуговых сталеплавильных печах (ДСП).

Проведенный в те годы автором анализ истории развития ДСП показал опережающее развитие электротехнического и отставание теплотехнического обеспечения электродуговых печей, как материального, так и теоретического. Исследование и разработка методов расчета электрических режимов ДСП начались в 1910–1920-х гг., исследование тепловых режимов — на 30–40 лет позже. Такая диспропорция вызвана тем, что датчики и приборы контроля электрических параметров работают в благоприятных условиях, имеют значительный срок службы, дают непрерывную информацию, что позволило создать многолетнюю базу для совершенствования практического и теоретического обеспечения электротехнической части ДСП, а датчики контроля тепловых параметров работают в условиях высоких температур в парах металлов, срок их службы чрезвычайно мал, информацию передают эпизодически, поэтому за многолетний опыт эксплуатации ДСП была собрана весьма скудная, зачастую локальная информация о тепловых параметрах в рабочем пространстве печей.

Сложность экспериментального познания процессов электро-теплового преобразования и распределения энергии, процессов теплообмена в ДСП приводила к сдерживанию дальнейшего прогресса электропечестроения для плавки

стали. В конце 1970-х гг. остро стояла проблема получения не только количественных данных по теплообмену в ДСП, но и качественной картины теплообмена. Не имело научного объяснения, было непонятно происхождение и протекание в электродуговых печах ряда физических явлений: образование «горячих пятен» на футеровке стен; максимальный износ сводов в центральной части, где футеровка экранирована электродами от излучения дуг; неравномерность температур по периметру, неравномерное расплавление шихты на откосах; обвалы шихты в печах с короткими дугами и вызванные ими колебания напряжения сети, сказывающиеся на питании других электроприемников; отсутствие обвалов, стабильный электрический режим в печах с длинными дугами и другие явления. Не зная причин возникновения явления, нельзя на него воздействовать, управлять физическим явлением, устранять его отрицательное влияние.

Результаты исследований и анализа теплообмена в электродуговых и факельных металлургических печах, топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установок, выполненных несколькими сотнями коллективов отечественных и зарубежных ученых в различные годы (1920–2000) и разных странах, одинаковы: 85–95% мощности дуги и факела выделяются в них в виде теплового потока излучения, а на долю конвективного потока и теплопроводности приходится 5–15% мощности дуги и факела.

В 1978 г. автор выдвинул научную гипотезу о возможности моделирования электрических дуг, горящих в парах металлов, цилиндрическими источниками теплового излучения. В 1978–1982 гг. автором были получены аналитические выражения, формулы, связывающие электрические, геометрические и тепловые параметры электрических дуг и поверхностей нагрева, разработана методика расчета теплообмена излучением в дуговых сталеплавильных печах трехфазного тока, позволившая объяснить ряд физических явлений, происходящих в рабочем пространстве ДСП трехфазного тока. В последующие 1982–1992 гг. автором были получены аналитические выражения, формулы для расчета теплообмена излучением в печах с длинными дугами, дуговых сталеплавильных печах постоянного тока, плазменно-дуговых сталеплавильных печах. Результаты работ были опубликованы в монографиях, учебных пособиях, статьях в центральных журналах и обобщены в докторской диссертации «Теория теплообмена излучением в дуговых печах для плавки стали», направленной на научное объяснение физических явлений, происходящих в рабочем пространстве печей, создание более совершенных дуговых сталеплавильных печей, оптимизацию энергетических режимов работы действующих печей. Учебные пособия, монографии используются в учебном процессе в России и ближнего зарубежья, а также при проектировании ДСП.

В 1992–2010 гг. автор с учениками, аспирантами продолжил совершенствование теории теплообмена излучением в электродуговых, факельных печах, топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установок. К 1992 г. сложились следующие основные методы расчета теплообмена излучением в факельных печах и топках паровых котлов. В первой математической модели расчета теплообмена в нагревательных печах факел представляется серой изотермической газовой средой. С учетом этого допущения определяют среднюю

плотность результирующего потока излучения на нагреваемые поверхности от газа, а кладке отводится роль посредника-переизлучателя теплоты от газов через кладку на металл [1]–[7]. Метод расчета теплообмена излучением, при котором определяют среднее, одинаковое для всех поверхностей нагрева, значение плотности теплового потока, получаемого поверхностями от факела, неадекватно отражает процессы теплообмена излучением, происходящие в факельных печах. Для повышения точности расчетов в печах и топках используется зональный метод расчета внешнего теплообмена излучением с учетом конвективной составляющей. Поверхности и объемы разбиваются на поверхностные и объемные зоны в виде прямоугольных параллелепипедов с определенными, заданными температурами и оптическими константами. Для поверхностных и объемных зон методом дискретной аппроксимации интегральных уравнений радиационного теплообмена рассчитываются на компьютере потоки излучения и температуры зон. В существующем методе расчета приходится использовать целый массив приближенных значений температур поверхностных и объемных зон. Данный метод не получил широкого распространения вследствие его сложности и того, что в расчетах используется модель факела, неадекватная натуре, и результаты расчетов могут значительно отличаться от реального теплообмена, происходящего в печах и топках паровых котлов.

Относительно роли математики в технических задачах В. А. Веников заметил, что «наряду с работами и вычислениями, в которых инженера призывают к переходу ко все более сложным и громоздким вычислениям, учитывающим максимально возможное число влияющих факторов, независимо от их практической роли в изучаемом явлении (это якобы повышает строгость подхода), в научной литературе появляются и работы другого характера. Среди них можно упомянуть статьи, где подчеркивается, что излишняя вера в сложные математические формулировки и описания приводит к тому, что любая нелепость, облаченная в этот математически импозантный мундир, выглядит очень научно. Математическими соотношениями, в частности дифференциальными уравнениями, можно описать все что угодно, если только принять определенные постулаты. Можно при этом получить соответствующие расчетам математически абсолютно строгие результаты, не имеющие в то же время никакого смысла для инженера». В настоящее время создано много программ расчета на ЭВМ теплообмена в печах, топках, камерах сгорания, правильность расчета по которым проверить практически невозможно ввиду их закрытости. Большое количество частных результатов приводит к информационному голоду в различных областях знаний. Компьютер — великое изобретение человечества — при неумелом использовании может способствовать информационному голоду. «Увеличение производительности и оперативной памяти современных персональных компьютеров привело к резкому расширению круга теплотехнических задач, успешно решаемых методом математического моделирования, и в результате к формированию мнения в том, что компьютерное моделирование является универсальным средством для решения всех проблем. К счастью, это заблуждение постепенно проходит, и возникает понимание того, что математическое моделирование не панацея, а рабочий инструмент для решения конкретных практических задач» [236].

Компьютер, оперируя огромным количеством данных, может создать иллюзию всеохватности изучаемого явления. В действительности, компьютер способствует размножению деталей и частных рассматриваемого явления, придавая важную роль частным случаям. Компьютерную часть расчетов невозможно проверить вручную, существующий метод дискретной аппроксимации интегральных уравнений настолько трудоемкий и сложный, что его трудно целиком проверить. Расчеты, не поддающиеся проверке, вызывают сомнение, согласиться с ними означает просто поверить авторам. Один из основоположников синергетики (науки о совместном, согласованном поведении многих элементов как единого целого в составе сложной системы) известный физик Герман Хакен говорит: «Информацию, перегруженную огромным количеством деталей, затемняющих существо дела, необходимо сжать, превратив в небольшое число законов, концепций и идей».

Условия теплообмена в различных нагревательных печах значительно отличаются друг от друга, что объясняется различием в конструкциях и способах отопления. Авторы публикаций по факельным печам отмечают, что обстоятельных исследований внешнего теплообмена в ряде печей не было проведено. Поэтому в расчетах приходится пользоваться общими приближенными значениями теплофизических величин, что сказывается на точности расчетов. Недостаточная изученность процессов тепловыделения в факеле и теплоотдачи от него затрудняла решение задачи о тепловых потоках и температурах в зонах печей и топков и делала решение этой задачи весьма приближенным [8]–[14]. В настоящее время продолжается процесс накопления экспериментального и теоретического материала. Экспериментальные исследования, физическое и математическое моделирование — все это создает предпосылки для дальнейшего развития теории печей.

На IV Минском Международном форуме по теплообмену ММФ-2000 существующая методика расчета теплообмена излучением в печах и топках с газовым, мазутным, пылеугольным факелами, в которой факел моделируется изотермическим объемом или объемными зонами с заданными параметрами, подвергалась критике в ряде докладов [60]. На I Международном симпозиуме по радиационному теплообмену в 1995 г. отмечалось, что нет достаточно надежного и эффективного метода расчета теплообмена излучением, каждый из существующих методов имеет свои недостатки и ограниченную область применения [57]. В 1992–2000 гг. автор исследовал излучение изохорных коаксиальных цилиндрических газовых объемов и открыл законы их излучения, свойство инвариантности их излучений, заключающиеся в следующем: средняя длина пути лучей, средние угловые коэффициенты излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов равны; от множества коаксиальных цилиндрических газовых объемов одинаковой высоты и мощности на любую расчетную площадку, расположенную в пространстве, падает одинаковый поток излучения. Открытие данного уникального явления, законов излучения значительно расширило возможности существующих методов расчета теплообмена излучением в печах и топках с объемными источниками излучения. На основании законов излучения, свойства инвариантности излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов разработаны физическая и математическая моде-

ли факела как объемного тела, состоящего из цилиндрических газовых объемов, которые используются при расчете теплообмена в топках паровых котлов и камерах нагревательных печей, сгорания. В XVII–XX вв. в научном мире существовала хорошая традиция присваивать научным сообществом закону имя автора, его открывшего. Очевидно, что научная этика и в настоящее время обязывает исследователей при использовании в исследованиях закона упоминать фамилию автора, его открывшего.

Свойство инвариантности, законы излучения излучающих коаксиальных цилиндрических газовых объемов позволяют моделировать факел излучающими цилиндрами малого диаметра — линейными источниками излучения. В работах [63]–[65] выведены аналитические выражения для определения локальных и средних угловых коэффициентов излучения линейных источников на расчетные площадки поверхностей нагрева. Разработан метод аналитического моделирования теплообмена излучением в печах, топках, камерах сгорания взамен численного моделирования, требующего огромных расчетных ресурсов. Преимущества аналитических методов моделирования над численным моделированием признаны всей передовой мировой наукой. В аналитической математике все логично, понятно, нет двусмысленности и множества толкований.

Длительное время считалась нерешенной задача расчета распределения мощности по длине факела. Автором предложено решение данной задачи. Для расчета распределения мощности по длине факела предложено использовать пропорцию, составленную для излучающих объемных зон, в которую входят температуры в третьей степени и объемы зон. Представление факела топок паровых котлов и печей цилиндрическими объемными зонами, излучающими и поглощающими излучение в диапазоне длин волн излучения газа, составляющего факел, с распределением мощности в объемных зонах в соответствии с расположением изотерм по объему факела позволяет рассчитывать распределение интегральных потоков излучений, падающих на поверхности нагрева, и получать результат, адекватно отражающий реальное распределение интегральных излучений в камерах печей, топок, сгорания.

Разработанная методика расчета в топках паровых котлов позволяет рассчитывать распределение мощности по высоте факелов топок, определять не только плотности интегральных потоков по оси симметрии экранов, но и их распределение по периметру фронтальных, задних, боковых экранов топок, что не позволяет сделать существующие методы расчета, а также ранжировать экранные поверхности топок по количеству полученного тепла и выявить наиболее радиационно-напряженные участки для определения первоочередности регламентных и ремонтных работ, создавать инновационные топки паровых котлов.

Разработанная методика расчета теплообмена в факельных нагревательных печах позволяет объяснить причины неравномерного нагрева изделий по длине и высоте нагревательных печей, определять рациональное положение факела в печах, а также рациональную конструкцию горелок, рациональный угол раскрытия факела, который зависит от размеров камер печей и расположения нагреваемых изделий в них, создать инновационные факельные печи.

К настоящему времени автором с привлечением учеников, аспирантов разработана концепция расчета теплообмена излучением в электродуговых,

факельных печах и топках паровых котлов, камерах сгорания, основанная на моделях электрической дуги, факела в виде излучающих цилиндрических газовых объемов. Объединяет факельные и дуговые печи, топки паровых котлов, камеры сгорания способ передачи тепла от источников энергии к поверхностям нагрева: теплообмен излучением и его зависимость от мощности и размеров источников излучения. На этом явлении построена единая методология расчета теплообмена излучением в факельных и дуговых печах, топках паровых котлов, 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 дуги в энергию потока излучения. Эта методика позволяет повысить точность расчетов и получить достоверный результат, уменьшить время расчетов, расширить число пользователей от опытных исследователей, научных сотрудников до студентов вузов.

В учебное пособие вошли материалы исследований, выполненных по грантам Минобразования РФ 1993–2012 гг. на проведение фундаментальных исследований в областях металлургии, электротехники и энергетики, изложенные в 7 монографиях, 5 учебных пособиях, 75 статьях в центральных журналах «Электрометаллургия», «Известия вузов. Черная металлургия», «Промышленная энергетика», «Электротехника», «Теплоэнергетика», «Электрические станции», «Электричество» и др., а также в описаниях 16 патентов на изобретения. Книга рассчитана на широкий круг читателей, в связи с чем характеристики топлива, факела, электрической дуги излагаются сравнительно элементарно.

Автор искренне благодарен коллегам по кафедре, особенно В. В. Рыбаковой за оформление рукописи и рецензенту зам. заведующего кафедрой «Металлургии стали и ферросплавов» НИТУ МИСиС доктору технических наук, профессору Семину А. Е.

## ВВЕДЕНИЕ

Современная наука не догма, и некоторые ее основы могут пересматриваться. Известно, что ни одна научная теория не претендует на абсолютную истину, она лишь с большей или меньшей степенью точности описывает определенное физическое явление. Впоследствии, когда представления о физическом явлении расширяются, конкретная теория может быть уточнена или может превратиться в один из частных случаев новой теории. Так, например, классическая механика Ньютона на определенном этапе развития науки стала составной частью современной механики, в которую входят классическая и квантовая механика. Аналогичные процессы происходят и в теории теплообмена излучением: появляются новые факты из практики эксплуатации электродуговых и факельных печей, топков, камер сгорания и новые, более точные, методики расчета, которые заставляют ученых, исследователей пересмотреть отношение к существующим методикам расчета теплообмена в печах, топках, камерах сгорания.

На протяжении всего XX в. расчет теплообмена в факельных печах, топках, камерах сгорания, теплообмена факела с поверхностями нагрева вели на основании закона Стефана–Больцмана, сформулированного Стефаном в 1879 г. по результатам исследования излучения твердых тел и теоретически обоснованного Больцманом в 1884 г. также для расчета излучения твердых тел. Факел представляет собой газообразное объемное тело, в котором происходит реакция горения и теплообмен которого с поверхностями нагрева не подчиняется закону Стефана–Больцмана, что было доказано автором в конце XX в. Анализ столетнего опыта эксплуатации, расчета, конструирования, теоретических и экспериментальных исследований показал несоответствие теории теплообмена практике эксплуатации. Теория теплообмена излучением в факельных печах, топках, камерах сгорания, основанная на законе Стефана–Больцмана, оказалась приближенной и требовала корректирования, совершенствования. Она не удовлетворяет требованиям современной практики эксплуатации факельных печей, топков, камер сгорания, не отражает реальной картины распределения тепловых потоков по поверхностям нагрева, не отвечает современным требованиям расчета и выбора рациональных тепловых режимов печей, топков, камер сгорания, обеспечивающих экономию топливно-энергетических ресурсов.

Применение приближенной теории теплообмена не позволяло получить полный достоверный результат о процессах теплообмена в печах, топках, камерах сгорания. Моделирование факела твердыми телами, прямоугольными параллелепипедами или излучающими площадками и определение результирующих потоков излучений на поверхности нагрева в зависимости от разности четвертых степеней температур прямоугольных параллелепипедов, площадок, которыми моделируются факел и поверхности нагрева, приводило к грубым приближенным результатам расчета, так как не учитывались газовая структура, геометрические размеры, форма, положение факела и поверхности нагрева и использовался закон Стефана–Больцмана, созданный для расчета теплообмена излучением между твердыми поверхностями. Такие допущения приемлемы для приближенных расчетов и при отсутствии более точной методики расчета теплообмена излучением в факельных печах, топках, камерах сгорания.

В 1970–2000-е гг. были разработаны сотни сложных программ, в которых для определения потоков излучения факела на поверхности нагрева используется разность четвертых степеней температур газового объема и поверхности, дающие, как показали исследования, недостоверный результат. В конце XX — начале XXI в. разработана теория теплообмена в факельных печах, топках, камерах сгорания (к расчетам автор привлекал учеников, аспирантов), основанная на реальной газовой структуре, геометрической форме, размерах, положении факела, на открытых законах теплообмена излучающих и поглощающих цилиндрических газовых объемов и использовании этих цилиндрических объемов и их мощностей для моделирования факела, а также на отказе от применения закона Стефана–Больцмана для определения результирующих потоков излучения факела на поверхности нагрева.

Теория теплообмена излучением в электродуговых и факельных печах, топках, камерах сгорания, опыт их эксплуатации доказали, что поток излучения факела на поверхности нагрева зависит не от разности четвертых степеней температур дуги, факела и поверхности, а от мощности, размеров, пространственного положения дуги, факела в камерах печей, топок, сгорания. На основе научного открытия разработаны прикладные математические модели дуги и факела и методики расчета теплообмена излучением в печах, топках, камерах сгорания. Как показывают результаты расчетов и измерений теплообмена излучением в камерах печей, топок, сгорания, новая теория и основанные на ней методики расчета позволяют получать достоверный результат процессов теплообмена, происходящих в камерах, совершенствовать теплообмен в камерах, создавать новые печи, топки, камеры сгорания. Исследователи процессов теплообмена, освоившие новую теорию теплообмена излучением, получают инструмент для анализа теплообмена излучением в камерах печей, топок, сгорания и создания новых конструкций камер, горелок, способов нагрева.

Изложение материала в учебном пособии об аналитическом моделировании процессов теплообмена в печах, топках, камерах сгорания осуществлено по принципу перехода от простого к сложному, от простых моделей изотермического факела к сложным моделям факела, создаваемого несколькими горелками.



# ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕПЛООБМЕНА ИЗЛУЧЕНИЕМ В ПЕЧАХ, ТОПКАХ И КАМЕРАХ СГОРАНИЯ

## 1.1. ПОТОКИ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ

Перенос тепла или теплообмен в печах, топках, камерах сгорания осуществляется тремя способами: излучением, теплопроводностью и конвекцией [1]–[214]. Теплообмен излучением осуществляется посредством электромагнитных волн. Теплообмен излучением составляет 90–95% суммарного теплообмена в топках паровых котлов, дуговых сталеплавильных печах, 80–90% — в плазменно-дуговых печах и камерах нагревательных печей. Факел передает пламенной трубе камеры сгорания газотурбинных установок 99–99,5% теплоты излучением, 0,5–1% путем конвекции [224]–[230].

Электромагнитные волны распространяются прямолинейно со скоростью света и подчиняются оптическим законам преломления, поглощения, отражения. Тепловое излучение помимо волновых свойств обладает корпускулярными свойствами: энергия излучается телом не непрерывно, а отдельными порциями — квантами и фотонами. Следовательно, излучение обладает корпускулярно-волновым дуализмом: энергия и импульс сосредоточены в фотонах, а вероятность их нахождения в пространстве обусловлена волновой механикой. Поэтому процессы излучения и поглощения энергии описываются законами квантовой механики, а процессы распространения энергии — законами волновой теории распространения электромагнитных колебаний [1]–[10].

Энергия фотона определяется по выражению

$$W = h\nu, \quad (1.1)$$

где  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с, постоянная Планка;  $\nu$  — частота колебаний эквивалентного электромагнитного поля.

Длина волны и частота колебаний находятся в следующем соотношении:

$$\lambda\nu = c, \quad (1.2)$$

где  $c$  — скорость света, в вакууме  $c = 300\,000$  км/с.

Излучение энергии фотона происходит следующим образом. При переходе атома или электрона на новый энергетический уровень, как и при возвращении их на прежний уровень, происходит излучение фотона энергии. Переход атомов и электронов на другой энергетический уровень происходит при нагревании, охлаждении тел, а также при ионизации газов в электрической дуге

(плазме) под действием электромагнитного поля. При горении топлива процесс перехода атомов на новый энергетический уровень происходит непрерывно. Энергия, запасенная в топливе, выделяется при его горении в энергию потока излучения (табл. 1.1). Испускание излучения — это процесс испускания фотонов, а поглощение — захват фотонов частицей. При испускании или поглощении фотона энергия испускающей или поглощающей частицы будет соответственно уменьшаться или увеличиваться.

Таблица 1.1

Распределение излучения по длинам волн и по частоте

№	Вид излучения	Длина волны, м	Частота волны, Гц
1	Радиоволны	$10^3-10^{-4}$	$3 \cdot 10^5-3 \cdot 10^{12}$
2	Инфракрасное	$10 \cdot 10^{-4}-7,6 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{11}-3,75 \cdot 10^{14}$
3	Видимое	$7,6 \cdot 10^{-7}-4 \cdot 10^{-7}$	$3,75 \cdot 10^{14}-7,5 \cdot 10^{14}$
4	Ультрафиолетовое	$4 \cdot 10^{-7}-10^{-9}$	$7,5 \cdot 10^{14}-3 \cdot 10^{17}$
5	Рентгеновское	$2 \cdot 10^{-9}-6 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{17}-5 \cdot 10^{19}$
6	$\gamma$ -излучение	$< 6 \cdot 10^{-12}$	$> 5 \cdot 10^{19}$

*Примечание.* Инфракрасная (ИК) область излучения состоит из ближней ИК-области 0,76–1,5 мкм; средней ИК-области 1,5–10 мкм; дальней ИК-области 10–1000 мкм. Видимое излучение состоит из фиолетового 0,4–0,45 мкм; синего 0,45–0,48 мкм; голубого 0,48–0,50 мкм; зеленого 0,50–0,56 мкм; желтого 0,56–0,59 мкм; оранжевого 0,59–0,62 мкм; красного 0,62–0,76 мкм.

При температурах от 0 до 1800°C основная доля мощности излучения приходится на инфракрасную область спектра, не видимую глазом человека. Поэтому мы не видим газовый факел в топках паровых котлов, максимальная температура которого не превышает 1800°C. При температурах выше 2000°C излучение в видимой области спектра существенно увеличивается и светимость факела увеличивается. Электрическая дуга, горящая в дуговых сталеплавильных печах, имеет температуру 4700–6000°C и излучает большую часть мощности в области видимого излучения. Для защиты зрения от мощного видимого излучения дуги применяют затемненные стекла, поглощающие часть излучения дуги. В видимой области работает и вольфрамовая нить ламп накаливания, температура которой 2800°C.

Основными источниками излучения в газовом, мазутном, пылеугольном факелах являются молекулы, когда их атомы или группы атомов, входящие в их состав, переходят из колебательного движения с большей энергией в такое же — с меньшей. При этом возникает инфракрасное излучение. При столкновении атомов друг с другом происходит выбивание электронов с переходом их на новый энергетический уровень и появлением излучения в факеле в видимой области спектра. Светимость факела повышают за счет увеличения концентрации сажистых частиц и числа столкновений атомов.

Основными источниками излучения в электрической дуге являются электроны, которые переходят из состояния с большой энергией в состояние с меньшей энергией и наоборот и излучают в видимой и ультрафиолетовой областях.

С уменьшением длины волны более ярко проявляются корпускулярные свойства излучения, энергия фотонов возрастает с уменьшением длины волны.

Для излучений больших длин волн (невидимые ИК-лучи с  $\lambda = 0,76\text{--}1000$  мкм) характерно, что лучи проявляют лишь волновые свойства.

Излучение, соответствующее какой-либо определенной частоте  $\chi$  колебаний или длине волны, называется *монохроматическим*. В реальности такого излучения не существует, любое излучение охватывает какой-то диапазон длин волн. Излучение, соответствующее длинам волн от 0 до  $\infty$ , называется *интегральным*. Количество энергии, излучаемое телом в единицу времени, называется *поток излучения* (Вт) или *мощностью излучения*:

$$Q = \frac{W}{\tau}. \quad (1.3)$$

*Плотность потока излучения* (Вт/м<sup>2</sup>) — это количество энергии, излучаемое телом в единицу времени с единицы площади:

$$q = \frac{Q}{F}. \quad (1.4)$$

В инженерных расчетах часто обозначают  $q = E$  [2]–[5].

Потоки излучения в зависимости от взаимодействия излучения и тела подразделяются: на *собственный поток излучения*  $Q_{\text{соб}}$ , т. е. излученный телом во всех направлениях; *падающий поток излучения*  $Q_{\text{пад}}$ , т. е. приходящий на поверхность со всех направлений; *отраженный поток излучения*  $Q_{\text{отр}}$ , т. е. отраженный телом во всех направлениях; *поглощенный поток излучения*  $Q_{\text{погл}}$ , т. е. поток, перешедший из формы излучения в форму теплового движения атомов и молекул поглощающего тела; *резльтирующий поток излучения*  $Q_{\text{рез}}$  — разность собственного и поглощенного потоков, т. е. поток, остающийся в теле и идущий на изменение его внутренней энергии в результате процессов испускания и поглощения; *рассеянный поток излучения*  $Q_{\text{рас}}$  — часть падающего на объем потока излучения и рассеянного по всем направлениям; *ослабленный поток излучения*  $Q_{\text{осл}}$  — сумма поглощенного и рассеянного потоков, разность падающего и пропущенного потоков; *эффективный поток излучения*  $Q_{\text{эф}}$  — общий поток излучения тела. Результирующим потоком излучения также называется разность потоков, уходящих от тела и приходящих к телу (рис. 1.1).

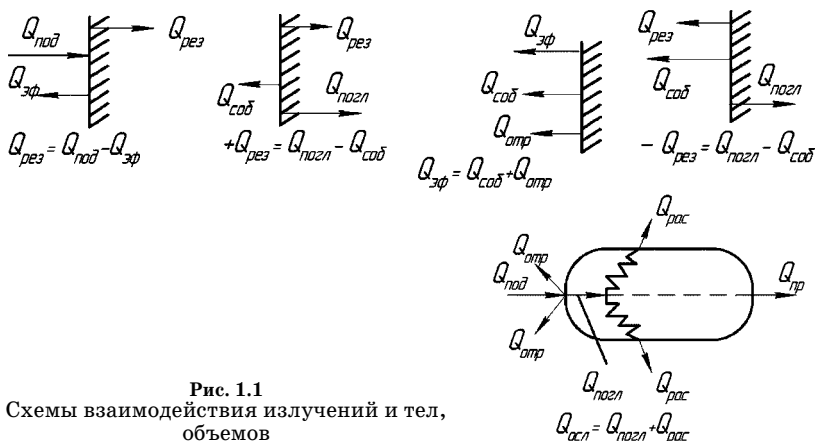


Рис. 1.1  
Схемы взаимодействия излучений и тел, объемов

Взаимодействие излучений и тел, объемов характеризуется коэффициентами: *коэффициент поглощения* — отношение поглощенного потока к падающему  $A = Q_{\text{погл}}/Q_{\text{пад}}$ ; *коэффициент отражения* — отношение отраженного потока к падающему  $R = Q_{\text{отр}}/Q_{\text{пад}}$ ; *коэффициент пропускания* — отношение пропущенного потока к падающему  $D = Q_{\text{пр}}/Q_{\text{пад}}$ ; *коэффициент рассеяния* — отношение рассеянного потока к падающему  $B = Q_{\text{рас}}/Q_{\text{пад}}$ .

Результирующий поток излучения может быть положительным, когда тело поглощает энергию, и отрицательным, когда тело отдает энергию (рис. 1.1). Если падающий на поверхность поток отражается по всем направлениям, то такое отражение называется *диффузным*. Диффузный отраженный поток излучения, яркость которого одинакова для всех направлений, называют *изотропно-диффузным* отраженным потоком.

По двум известным потокам могут быть определены остальные потоки излучения. Например, при известных падающих и собственных потоках излучения неизвестные потоки определяются по выражениям

$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{эф}} &= Q_{\text{соб}} + RQ_{\text{пад}}, \\ Q_{\text{погл}} &= AQ_{\text{пад}}, \\ Q_{\text{отр}} &= RQ_{\text{пад}}, \\ Q_{\text{рез}} &= AQ_{\text{пад}} - Q_{\text{соб}}. \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

Аналогичные соотношения характерны и для плотностей падающих, собственных, эффективных, поглощенных, отраженных, результирующих потоков излучений.

Для твердых, непрозрачных тел, какими являются металлы, диэлектрики и ряд жидкостей, можно записать выражение для потоков излучений

$$Q_{\text{пад}} = Q_{\text{погл}} + Q_{\text{отр}}. \quad (1.6)$$

После деления на  $Q_{\text{пад}}$  получим

$$A + R = 1. \quad (1.7)$$

Для твердых прозрачных и полупрозрачных тел можно записать

$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{пад}} &= Q_{\text{погл}} + Q_{\text{отр}} + Q_{\text{пр}}, \\ A + R + D &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

При  $A = 1$ ,  $R = 0$ ,  $D = 0$  имеем *абсолютно черное тело* (АЧТ), т. е. такое тело, которое полностью поглощает все падающее на него излучение. Его моделью служит отверстие в стенке непрозрачной полости, т. е. абсолютно черная, с коэффициентом излучения, равным единице, плоская, выпуклая или вогнутая поверхность.

Если поверхность диффузно отражает все падающее на нее излучение, то ее называют абсолютно белой. При  $R = 1$ ,  $A = 0$ ,  $D = 0$  имеем абсолютно белую поверхность, абсолютно отражающее тело или идеальное зеркало.

При  $D = 1$ ,  $A = 0$ ,  $R = 0$  имеем абсолютно пропускающую среду, *диатермическую среду*, или идеальное стекло. Сухой воздух при низких и умеренных температурах представляет собой диатермическую среду.

Спектры излучения тел бывают непрерывные и прерывистые, *селективные*, с излучением в узком диапазоне длин волн. Тело, имеющее непрерывный спектр излучения, называется *серым телом*. Часто теплотехнические расчеты ведут на основе допущения серого излучения тел. Такое допущение упрощает решение многих теплотехнических задач, которые без него были бы неразрешимы. Собственное излучение большей части поверхностей, участвующих в теплообмене, близко к серому. Излучение газов — селективное, не серое. Монохроматическое излучение ограничивается бесконечно малым интервалом длин волн излучения и всегда является серым. Поток излучения для участка спектра называется *спектральным потоком* излучения. Поток излучения, взятый по всему спектру излучения тела, называется *интегральным потоком* излучения.

Для определенной длины волны отражательная, пропускательная, поглощательная способности тел характеризуют спектральные коэффициенты поглощения  $A_\lambda$ , отражения  $R_\lambda$ , пропускания  $D_\lambda$ .

Интегральный, или средний, коэффициент поглощения для всего спектра (рис. 1.2) определяется по выражению

$$A = \frac{\int_0^\infty A_\lambda Q_{\lambda \text{ пад}} d\lambda}{\int_0^\infty Q_{\lambda \text{ пад}} d\lambda}. \quad (1.9)$$

Возможны два случая поглощения: первый, когда поглощение происходит по всему спектральному составу лучей, например поглощение в газе потока излучения, создаваемого тем же газом; второй, когда поглощение наблюдается только в части спектра потока излучения, например поглощение газом излучения абсолютно черного тела, т. е. селективное. На рисунке 1.3 приведены зависимости спектральных коэффициентов поглощения и отражения алюмосиликатного стекла, толщиной 13 мм [6]. Как видно из рисунка, стекло в видимой области спектра обладает низкой поглощательной и высокой пропускательной способностью, а в инфракрасной и ультрафиолетовой области — высокой поглощательной способностью.

Большинство белых поверхностей в видимом диапазоне волн обладают коэффициентом отражения  $R_\lambda = 0,7-0,9$ , а в ИК-диапазоне волн ведут себя как

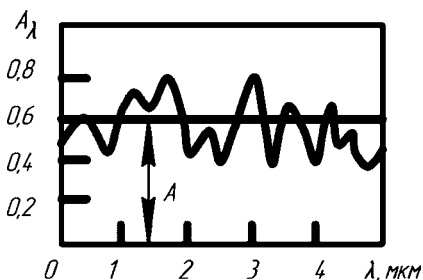


Рис. 1.2  
Зависимость поглощательной способности тела от длины волны теплового излучения

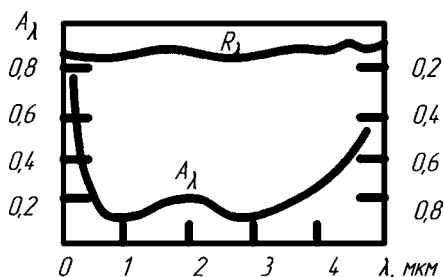


Рис. 1.3  
Зависимость поглощательной и отражательной способности тела от длины волны теплового излучения

черные тела в связи с большим коэффициентом поглощения в ИК-диапазоне (например, стекло, фаянс, силикатный кирпич). Большинство твердых и жидких тел излучают энергию всех длин волн в интервале от 0 до  $\infty$ , т. е. имеют сплошной спектр излучения. Наибольшее количество энергии приходится на диапазон длин волн от 0,7 до 80 мкм. Чистые металлы и газы характеризуются выборочным — селективным излучением, т. е. излучают энергию только определенных длин волн.

Потоки излучения в системе теплообмена (камере, топке, печи) распространяются независимо один от другого. При наличии в системе теплообмена нескольких источников излучения плотность падающего в любую  $i$ -ю точку системы потока излучения равна сумме плотностей потоков излучений, падающих в данную точку от отдельных источников излучения:

$$q_{in} = \sum_{j=1}^n q_{inj}. \quad (1.10)$$

Выражение (1.10) отражает свойство *аддитивности, суперпозиции, наложения* потоков излучения.

Рассмотрим излучение абсолютно черных элементарных (бесконечно малых размеров) поверхностей, которыми могут аппроксимироваться излучающие тела: элементарные площадка, цилиндр, шар, прямоугольный параллелепипед. Пусть имеется абсолютно черная поверхность в виде прямоугольника площадью  $dF_0$ , излучающая поток  $Q_0$  с одной стороны поверхности (рис. 1.4). Излучение поверхности в нормальном  $N$  направлении, т. е. в направлении перпендикуляра  $N$  к поверхности  $dF_0$ , характеризует *интенсивность излучения поверхности* (*яркость излучения поверхности*):

$$I_{0N} = \frac{d^2Q_0}{dF_0 d\omega} \rightarrow d^2Q_0 = I_{0N} dF_0 d\omega. \quad (1.11)$$

Интенсивность излучения поверхности (Вт/(м<sup>2</sup>·ср)) равна частному от деления теплового потока  $d^2Q_0$ , излучаемого данной поверхностью по всем направлениям, на площадь поверхности  $dF_0$  и величину телесного угла  $d\omega$ , в пределах которого излучает поверхность.

Для плоской элементарной поверхности, излучающей с одной стороны,  $d\omega = \omega = \pi$ ,  $dF_0 = F_0$ ,  $d^2Q = \text{const} = Q_0$ . Подставив эти значения теплового потока, площади поверхности, телесного угла в (1.11), получим

$$I_{0N} = \frac{Q_0}{F_0 \omega} = \frac{Q_0}{F_0 \pi} = \frac{E_0}{\pi}. \quad (1.12)$$

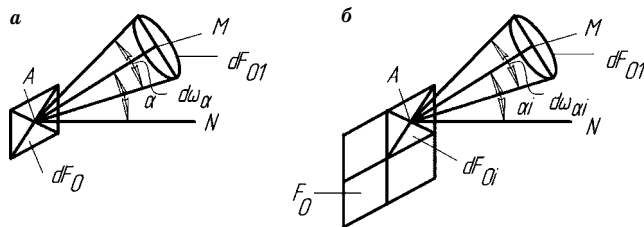


Рис. 1.4  
Излучение одной (а) и четырех (б) абсолютно черных элементарных площадок

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)