

Инновационные факельные нагревательные печи

Макаров А. Н., доктор техн. наук, Кузнецов А. В., Галичева М. К., инженеры
Тверской государственной технической университет

Изложены открытые законы излучения газовых слоев факела нагревательных печей. На их основе разработана современная методика расчета теплообмена в факельных печах. Законы излучения газовых слоев позволили объяснить неравномерность нагрева изделий в печах, разработать инновационные конструкции нагревательных печей, в которых повышаются равномерность нагрева изделий и производительность, сокращается расход топлива.

Ключевые слова: факел, излучение, нагревательные печи, теплообмен, законы излучения.

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 [1, 2]. Теплообмен излучением является основным видом теплообмена в нагревательных печах, топках, камерах сгорания газотурбинных установок. В дугах дуговых и плазменно-дуговых сталеплавильных печей 86 – 96 % электрической мощности преобразуется в поток излучения. Электродуговые и факельные металлургические печи и энергетические установки объединяет способ передачи теплоты от источников энергии к поверхностям нагрева — теплообмен излучением и его зависимость от мощности и размеров источников излучения.

Рабочее пространство печей, топков представляет собой прямоугольный параллелепипед, и факел в классическом зональном методе расчета теплообмена моделируется набором прямоугольных параллелепипедов, заполняющих свободное пространство печей, с различными температурами и радиационными характеристиками [1, 2]. Но моделирование факела параллелепипедами вносит значительную погрешность в результаты расчета (фотографирование факела, создаваемого одиночной горелкой, показывает, что он представляет собой осесимметричное тело вращения — эллипсоид).

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

$$q = c_0 \epsilon_{\text{пр}} [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] \phi_{12}, \quad (1)$$

где c_0 — постоянная Стефана — Больцмана; $\epsilon_{\text{пр}}$ — приведенный коэффициент излучения; T_1 и T_2 — температуры тел 1 и 2; ϕ_{12} — средний угловой коэффициент излучения тела 1

на тело 2; q — тепловой поток от тела 1 на тело 2.

При применении закона излучения твердых тел для расчета излучения газа, образующего факел, высокой степени точности 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 [3].

Накопилось множество фактов, доказывающих необходимость развития теории теплообмена в печах, топках, камерах сгорания. В факельных печах для повышения производительности увеличивают расход топлива без изменения температуры факела. При увеличении расхода топлива в 2 раза мощность факела возрастает также в 2 раза при неизменной температуре факела, и производительность печи повышается в 2 раза. В топках паровых котлов для сокращения выхода оксидов азота температуру факелов снижают путем введения газов рециркуляции в топочную камеру, при этом производительность котлоагрегата не уменьшается.

При расчетах теплообмена в факельных печах по закону Стефана — Больцмана наблюдались парадоксальные результаты. При нагреве подаваемого в горелку воздуха с 20 до 600 °С мощность факела увеличивалась на 17 %, а температура образующего факел газа — с 1300 до 2000 °С. Расчет тепловых потоков на нагреваемое изделие по закону Стефана — Больцмана показывает, что при нагреве воздуха с 20 до 600 °С результирующие тепловые потоки увеличиваются в 5 раз, а это противоречит закону сохранения энергии. Очевидно, что при расчетах теплообмена необходимо абстрагироваться от температуры факела. Практика эксплуатации печей, топков, камер сгорания свидетельствует, что определяющее влияние на теплообмен и производительность печей оказывают теплота сгорания, расход топлива, геометрические размеры,

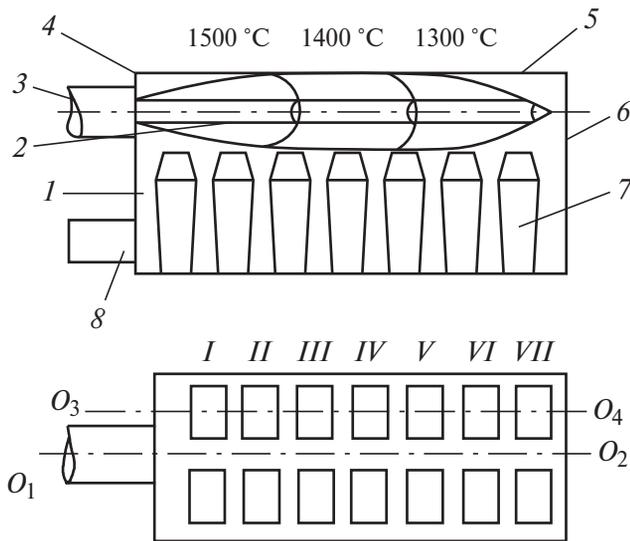


Рис. 1. Схема рекуперативного нагревательного колодца с верхней горелкой:

1 — камера колодца размерами $8 \times 3 \times 4$ м; 2 — факел; 3 — горелка; 4 — фронтальная стена; 5 — крышка; 6 — задняя стена; 7 — слитки размерами $0,74 \times 0,68 \times 2,4$ м массой по 7 т; 8 — каналы для удаления дымовых газов; I–VII — номера рядов слитков

форма факела и его расположение относительно поверхностей нагрева.

Решение проблемы было найдено благодаря открытию законов излучения газовых слоев, образующих факел и электрическую дугу. Это произошло в 2001 г., а в последующие 10 лет осуществляли их апробацию, экспериментальную проверку, разработку аналитической модели факела, методики расчета теплообмена в факельных печах, топках, камерах сгорания, после чего была подана заявка, а в 2011 г. получен диплом на научное открытие [4].

На рис. 1 приведена схема рабочего пространства рекуперативного нагревательного колодца. Геометрическая форма факела — эллипсоид вращения, изотермы 1300, 1400, 1500 °С делят объем факела на три части. В соответствии с разработанной аналитической моделью факела и расположением изотерм в его объем вписаны три излучающих цилиндрических газовых объема. Излучение цилиндрического газового объема образуется путем излучения коаксиальных цилиндрических газовых слоев, которых множество в любом излучающем цилиндрическом газовом объеме. Законы излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов, слоев, образующих факел нагревательных печей и электрическую дугу дуговых и плазменно-дуговых сталеплавильных печей, записаны следующим образом [4]:

1. “Равны следующие параметры излучения изохорных коаксиальных цилиндрических газовых объемов, слоев на расчетную площадку — угловые коэффициенты излучения, плотности потоков излучений”:

$$\Phi_{F_1 dF} = \Phi_{F_2 dF} = \Phi_{F_3 dF} = \Phi_{F_n dF}; \quad (2)$$

$$q_{F_1 dF} = q_{F_2 dF} = q_{F_3 dF} = q_{F_n dF}, \quad (3)$$

где $\Phi_{F_1 dF}$, $\Phi_{F_2 dF}$, $\Phi_{F_3 dF}$, $\Phi_{F_n dF}$ — элементарные угловые коэффициенты излучения 1-, 2-, 3-, n -го коаксиального цилиндрического газового слоя на элементарную площадку dF ; $q_{F_1 dF}$, $q_{F_2 dF}$, $q_{F_3 dF}$, $q_{F_n dF}$ — плотности потоков излучения 1-, 2-, 3-, n -го коаксиальных цилиндрических газовых слоев на площадку dF .

2. “Средняя длина пути лучей от изохорных цилиндрических газовых слоев до расчетной площадки равна среднеарифметическому расстоянию от оси симметрии цилиндрических газовых слоев до расчетной площадки”:

$$l_1 = l_2 = l_3 = l_n = l_{cp}, \quad (4)$$

где l_1 , l_2 , l_3 , l_n , l_{cp} — средняя длина пути лучей от 1-, 2-, 3-, n -го изохорных коаксиальных цилиндрических газовых слоев до расчетной площадки.

3. “Суммарная плотность потоков излучений, падающих на расчетную площадку от изохорных коаксиальных цилиндрических газовых слоев, равна плотности потока излучения коаксиального цилиндрического газового объема малого диаметра, расположенного на оси симметрии слоев, на расчетную площадку при мощности излучения, выделяющейся в коаксиальном цилиндрическом газовом объеме малого диаметра, равной суммарной мощности излучения во всех коаксиальных цилиндрических газовых слоях, излучающих на расчетную площадку”:

$$q_{F_j dF} = \sum_{i=1}^n q_{F_i dF_i}, \quad (5)$$

где $q_{F_j dF}$ — плотность потока излучения цилиндрического газового объема малого диаметра, расположенного на оси симметрии коаксиальных цилиндрических газовых слоев, на площадку dF ; $q_{F_i dF}$ — плотность потока излучения i -го коаксиального цилиндрического газового слоя на площадку dF .

Законы излучения коаксиальных цилиндрических газовых слоев позволяют моделировать излучение больших излучающих цилиндрических газовых объемов излучением коаксиального цилиндрического газового объема малого диаметра и осуществить переход от трех-, четырехкратных интегралов к однократному

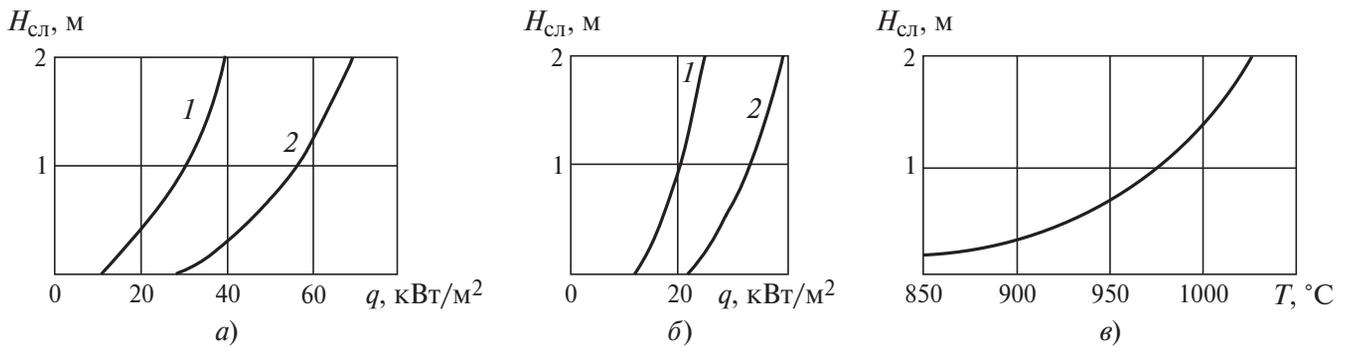


Рис. 2. Графики распределения суммарных интегральных тепловых потоков по высоте боковой поверхности слитков, обращенной к поверхности стен (а), к оси O_1O_2 (б), и изменение температуры по высоте слитков на расстоянии 80 мм от поверхности в процессе нагрева (в):

а: 1 — по высоте слитков I, II, VI рядов; 2 — по высоте слитков III – V, VII рядов;
 б: 1 — по высоте слитков I, II, VI, VII рядов; 2 — по высоте слитков III – V рядов

интегрированию при расчете угловых коэффициентов излучения, плотностей потоков излучения цилиндрических газовых объемов на расчетные площадки.

На основе открытых законов излучения коаксиальных цилиндрических газовых слоев разработана современная методика расчета теплообмена в факельных печах, согласно которой рассчитываются суммарные интегральные тепловые потоки, состоящие из падающих на поверхности нагрева потоков излучений от факела $q_{i п.ф}$, футеровки стен, свода $q_{i п.п}$, продуктов сгорания топлива $q_{i п.г}$, вызванных отражением излучения факела от поверхностей нагрева $q_{i п.о.ф}$ и отражением излучения одних поверхностей от других поверхностей $q_{i п.о.п}$ [4, 6]:

$$q_{i п} = q_{i п.ф} + q_{i п.п} + q_{i п.г} + q_{i п.о.ф} + q_{i п.о.п} \quad (6)$$

где $q_{i п}$ — плотность интегрального потока излучения, падающего на i -ю площадку поверхности нагрева.

Применение современной методики создает новые возможности анализа теплообмена в печах, разработки более совершенных печей и высокоэффективных способов нагрева изделий в них.

При расчете теплообмена в рекуперативном нагревательном колодце с верхней горелкой (см. рис. 1) по существующей методике среднее значение тепловых потоков, падающих на поверхности слитков от печной среды равно $38 - 40 \text{ кВт/м}^2$ (одинаково по всем поверхностям и высоте слитков) [5]. При равномерном нагреве слитков как по высоте, так и по периметру никаких дополнительных мер по выравниванию тепловых потоков предпринимать не надо. Однако измерение температур в процессе нагрева показывает, что в нижней части слитков темпе-

ратура на $150 - 200 \text{ }^\circ\text{C}$ меньше, чем в верхней. Следовательно, существующая методика расчета теплообмена в факельных печах неадекватно отражает процессы теплообмена в печах.

Результаты расчетов теплообмена в рекуперативном нагревательном колодце с верхней горелкой по формуле (6) представлены на рис. 2 [6]. Как видно, тепловые потоки существенно неравномерно распределяются как по высоте, так и по граням слитков. В нижней части слитков тепловые потоки в $1,5 - 2$ раза меньше, чем в верхней. Это подтверждают и данные измерений: температура нижней части слитков на $200 \text{ }^\circ\text{C}$ меньше, чем температура верхней их части.

При неравномерном нагреве слитков процесс затягивается, требуется дополнительное время выдержки для выравнивания температуры по высоте, периметру, глубине слитков. Из результатов расчета теплообмена в нагревательных колодцах по современной методи-

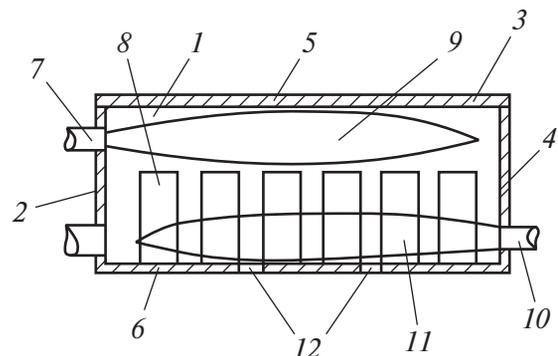


Рис. 3. Схема рекуперативного нагревательного колодца с двумя факелами:

1 — камера; 2 – 4 — фронтальная, боковая, задняя стены; 5 — крышка; 6 — под; 7, 10 — верхняя и нижняя горелки; 8 — слитки; 9, 11 — верхний и нижний факелы; 12 — отверстия для подачи воздуха

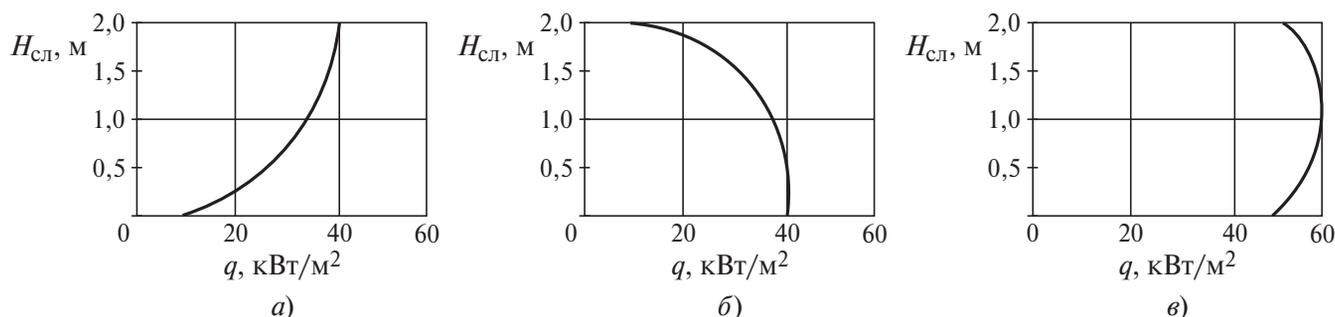


Рис. 4. Графики распределения средних тепловых потоков по высоте слитков при работе верхней горелки (а), нижней горелки (б), верхней и нижней горелок совместно (в)

ке следует, что необходимо использовать дополнительный источник для нагрева нижней части слитков. С этой целью разработан регенеративный нагревательный колодец с двумя факелами — верхним и нижним диффузным (рис. 3). Поступающее в верхнюю горелку (см. рис. 1) топливо равномерно распределяется между верхней и нижней горелками. Верхний факел нагревает верхнюю часть слитков, а нижний — нижнюю, в результате чего средние суммарные тепловые потоки от факелов, продуктов сгорания, поверхностей нагрева (стен, крышки) на поверхности слитков выравниваются, увеличивается равномерность их нагрева по высоте (рис. 4).

В регенеративном нагревательном колодце по высоте боковой поверхности слитков интегральные тепловые потоки изменяются от 22 кВт/м² наверху до 62 кВт/м² внизу. Регенеративный нагревательный колодец с двухъярусным расположением блоков регенераторов [7] позволяет изменять положение факела по высоте камеры, что обеспечивает равномерность нагрева слитков по высоте, уменьшение времени их нагрева, повышение производительности, снижение расхода топлива.

Следующее техническое решение — разработка конструкции регенеративного нагревательного колодца с двумя дополнительными горелками, расположенными в фронтальной и задней стенах над блоками регенераторов [8]. Верхний факел создается верхними горелками, находящимися над блоками регенераторов, и нагревает верхнюю часть слитков. Нижний факел образуется при сгорании истекающего из регенератора газа и воздуха и нагревает нижнюю часть слитков. В итоге суммарные тепловые потоки, падающие от факелов на поверхность слитков, также выравниваются, время их нагрева уменьшается, повышается производительность регенеративного нагревательного колодца, снижается расход топлива.

Таким образом, открытие закономерностей излучения газовых слоев, образующих факел, позволило объяснить неравномерность нагрева слитков в рекуперативных и регенеративных нагревательных колодцах, разработать инновационные их конструкции, в которых повышается равномерность нагрева слитков, сокращается расход топлива, увеличивается производительность печей.

Список литературы

1. Блох А. Г., Журавлев Ю. А., Рыжков Л. Н. Теплообмен излучением: справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. **Теплотехнические** расчеты при автоматизированном проектировании нагревательных и термических печей: Справочник / Под ред. А. Б. Усачева. — М.: Черметинформация, 1999.
3. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидравлическое сопротивление: Справочное пособие. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. 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. — Научные открытия: Сборник кратких описаний научных открытий, научных идей, научных гипотез — 2011. Составитель — В. В. Потоцкий. М.: Изд-во РАЕН, 2012.
5. **Теплотехнические** расчеты металлургических печей: Учеб. для вузов / Под ред. А. С. Телегина. — М.: Металлургия, 1993.
6. Макаров А. Н. Моделирование факела излучающими цилиндрами при расчете теплообмена в печах и топках котлов. — Промышленная энергетика, 2003, № 4.
7. Пат. 2312907 (RU2312907 C1) C21D9/70. Регенеративный нагревательный колодец / А. Н. Макаров, В. В. Воропаев. — Изобретения. Полезные модели, 2007, № 35.
8. Пат. 2457262 (RU2457262 C1) C21D9/70. Регенеративный нагревательный колодец / А. Н. Макаров, А. Г. Щеглов. — Изобретения. Полезные модели, 2012, № 21.