

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
ЖУРНАЛ
ISSN 0023-2815

КОКС

И

ХИМИЯ

№ 10 • 2011



КОКС И ХИМИЯ

10 • 2011

Научно-технический и производственный журнал
Основан в сентябре 1931 г.

Учредители: предприятия и организации коксохимической промышленности

СОДЕРЖАНИЕ

УГОЛЬ

- Киселев Б. П., Стахеев С. Г.*
Угольное сырье и кокс. О предпосылках выпуска стабильного по свойствам кокса 2
- Щукина Т. Г., Кауфман А. А., Гуряшина М. А.*
О необходимости унификации подготовки проб и оборудования пластометрических аппаратов А. М. Сапожникова 8

КОКС

- Бологова В. В., Султангузин И. А., Гюльмалиев А. М.*
Об одном из способов повышения качества кокса в установке сухого тушения кокса 12
- Голубев А. В., Збыковский Е. И.*
Коэффициент теплоотдачи для единичного куска кокса 17

ХИМИЯ

- Платонов О. И.*
Опыт эксплуатации узла доочистки «хвостовых» газов линии десульфуризации коксового газа 22
- Павлович О. Н., Белоусова О. А.*
Комплексный метод исследования полиэвтектических систем 29
- Тагиров М. А., Жирнов Б. С., Гостьков Е. В., Фаткуллин М. Р., Мухаметзянова Э. Г.*
Динамика активирования нефтяных коксов с целью получения носителей для катализаторов 32
- Зарецкий М. И., Русак В. В., Чартов Э. М.*
Абсорбционная очистка газовых потоков с использованием органических растворителей (Обзор) 37

ОБОРУДОВАНИЕ. ЭНЕРГЕТИКА

- Данилин Е. А.* Совершенствование конструкции и режима работы установок сухого тушения кокса 39
- Дябин В. В., Назаров Н. Н., Чабан И. А., Марченко Е. Г., Голубцов С. Н.*
Ремонт кладки коксовых печей керамической наплавкой в коксовом цехе «ЕвразКоксСибирь» – филиал ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» 43

ИНФОРМАЦИЯ. ХРОНИКА

- Краткие сообщения (Реф. Гагарин С. Г.) 45

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ и ВАК Украины изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней.

Журнал переводится на английский язык фирмой «Allerton Press Inc.» (США), a division of Pleiades Publishing. Distributed by Springer.

КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛООТДАЧИ ДЛЯ ЕДИНИЧНОГО КУСКА КОКСА

© А. В. Голубев¹, Е. И. Збыковский²ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»
83000 г. Донецк, ул. Артема, 58. Украина¹ Голубев Артем Владимирович, аспирант каф. хим. технологии топлива, e-mail: a-v-golubev@ya.ru² Збыковский Евгений Иванович, канд. техн. наук, доцент каф. хим. технологии топлива, e-mail: xtt@feht.dgtu.donetsk.ua

Приводятся результаты экспериментального определения коэффициента теплоотдачи единичного куска кокса при конвективном теплообмене с охлаждающим газом. Описаны методика эксперимента и опытная установка. Предложен механизм конвективного теплообмена куска кокса с инертным газом. Показано, что коэффициент теплоотдачи в слое кокса значительно возрастает за счет факторов, способствующих дополнительной турбулизации потока.

Ключевые слова: кокс; конвективный теплообмен; охлаждающий газ; коэффициент теплоотдачи; сухое тушение кокса.

Коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи – фундаментальные величины для технологических процессов, сопровождающихся теплообменом между твердым телом и жидкостью. Их величины в значительной степени определяют механизм развития и интенсивность этих процессов. Для случая теплообмена слоя кокса с инертными газами предложено большое число методик расчета коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи [1], основанных на изучении теплообмена в идеальных (лабораторных) условиях. Эти методики дают сильно различающиеся результаты, что объясняется сложностями постановки эксперимента для слоя кокса даже в лабораторных условиях и использованием для кокса зависимостей, полученных для других материалов. В промышленных условиях большой объем исследований в области теплообмена был проведен А. Г. Старовойтом с сотрудниками [2].

Вместе с тем отсутствует оценка влияния взаимной блокировки поверхности кусков кокса сложной формы и переменных размеров каналов, по которым движется охлаждающий газ, на режим движения теплоносителя, механизм переноса тепла и интенсивность теплообмена в слое кокса. Отсутствуют также специальные экспериментальные исследования внутреннего термического сопротивления куска кокса с учетом сложной формы реальных кусков.

Ответы на эти вопросы можно дать на основании исследования теплообмена единичного куска кокса в идеальных условиях. Это позволит научно обоснованно наметить пути интенсификации конвективного теплообмена в слое кокса.

Основной величиной, подлежащей опытному исследованию в конвективном теплообмене, является коэффициент теплоотдачи. Для его определения применяют методы стационарного и нестационарного тепловых потоков. Разновидностью методов нестационарного теплового потока служат методы регулярного теплового режима [3, с. 167, 168].

При исследовании теплообмена куска кокса мы остановились на методе регулярного теплового режима первого рода. Наш выбор обусловлен следующими его преимуществами. Эксперименты, основанные на методах регулярного режима, представляются, как правило, быстро протекающими во времени, не требуют продолжительной предварительной выдержки образцов при определенной температуре. Эти методы позволяют выполнять исследования при непрерывном изменении температуры до определенного ее значения. Экспериментально измеряется лишь одна величина – темп охлаждения. Измерять температуру поверхности тела не требуется, что особенно удобно при исследовании кусков кокса, которые имеют сложную геометрическую форму. Большим преимуществом метода регулярного режима первого рода следует считать возможность измерения температуры в любой точке тела. Этот момент особенно важен при изучении теплообмена кусков кокса, формы и размеры которых значительно отличаются.

К недостаткам регулярного режима первого рода следует отнести необходимость четкого соблюдения в эксперименте граничных условий, принятых в теории.

Средний коэффициент теплоотдачи для регулярного режима первого рода определяется из соотношения [3, с. 68]:

$$\bar{\alpha} = \Psi \frac{mC}{F}, \quad (1)$$

где Ψ – коэффициент, характеризующий неравномерность распределения температуры тела; m – темп охлаждения; C – теплоемкость тела; F – площадь поверхности тела.

Темп охлаждения характеризует относительную скорость изменения температуры тела во времени. В регулярной стадии зависимость натурального логарифма избыточной температуры v ($v = t - t_c$) от времени τ $\ln v = f(\tau)$ представляет собой прямую линию. Геометрически темп охлаждения равен угловому коэффициенту (тангенс угла наклона) этой прямой.

Эта формула применима при следующих граничных условиях. Температура окружающей среды постоянна $t_c = \text{const}$, значения критерия Фурье (безразмерного времени):

$$Fo = \frac{a\tau}{R_{\text{экв}}^2} \geq 0,55,$$

где a – коэффициент температуропроводности; τ – время от начала процесса; $R_{\text{экв}}$ – эквивалентный линейный размер тела.

Коэффициент Ψ равен отношению средней по поверхности избыточной температуры к средней по объему избыточной температуре тела. Этот коэффициент находится из зависимости

$$\Psi = \frac{M}{Bi_v} = \frac{1}{\sqrt{1 + nBi_v + Bi_v^2}}.$$

Здесь $M = \frac{m}{m_\infty}$ – безразмерный коэффициент; $Bi_v = \frac{\bar{\alpha}R_{\text{экв}}}{\lambda}$ – критерий Био; λ – коэффициент теплопроводности; $R_{\text{экв}} = \frac{KF}{V}$ – эквивалентный линейный размер тела; K – коэффициент формы; F – площадь поверхности тела; V – объем тела; n – коэффициент, зависящий от формы тела; m_∞ – темп охлаждения при критерии Био, стремящемся к бесконечности, $Bi_v \rightarrow \infty$.

Коэффициент n для геометрически совершенных различных тел: шара, цилиндра, параллелепипеда и др. имеет близкие значения, поэтому всю совокупность значений коэффициента n , который, например для пластины, цилиндра, шара равен соответственно 1,633; 1,414; 1,437, можно заменить его средним значением $n_{\text{ср}} = 1,437$ [4, с. 268]. В наших расчетах применялась последняя величина. Использование усредненного коэффициента особенно оправданно для кусков кокса, имеющих сложную геометрическую форму.

Коэффициент формы K для тел с простой геометрической формой рассчитывают по формулам, приведенным в литературе [3, с. 79]. Если коэффициент формы определить расчетным путем нельзя, то проводят предварительный опыт с образцом твердого тела заданной геометрии из материала с известными теплофизическими свойствами, затем – с образцом такой же формы и размеров, но из материала, подлежащего исследованию. Куски кокса имеют сложную и существенно отличающуюся друг от друга форму, поэтому проведение предварительных опытов для определения коэффициента формы для него не имеет смысла. В данном случае целесообразно сделать допущение о форме, которая максимально точно описывала бы реальный кусок. В наших исследованиях принято допущение, что форма куска кокса соответствует форме прямоугольного параллелепипеда с ребрами R_1, R_2, R_3 [5, с. 27], коэффициент формы конкретного куска кокса рассчитывали по формуле [3, с. 79]:

$$K = \left[\pi^2 \left(\frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} + \frac{1}{R_3^2} \right) \right]^{-1} \text{ м}^2. \quad (2)$$

Постановку эксперимента и обработку результатов осуществляли в соответствии с требованиями теории подобия. Экспериментальную зависимость представляли в виде

$$Nu = ARe^n.$$

Здесь $Re = \frac{wd_e\rho}{\mu} = \frac{wd_e}{\nu}$ – критерий Рейнольдса; w – скорость охлаждающего газа; d_e – эквивалентный диаметр куска кокса; ρ – плотность охлаждающего газа; μ – коэффициент динамической вязкости охлаждающего газа; $\nu = \mu/\rho$ – кинематический коэффициент вязкости охлаждающего газа; $Nu = \alpha d_e/\lambda_g$ – критерий Нуссельта; α – коэффициент теплоотдачи; λ_g – коэффициент теплопроводности охлаждающего газа.

В ходе эксперимента выполняли требование метода регулярного теплового режима – постоянство температуры окружающей среды и коэффициента теплоотдачи с помощью следующих приемов. Использовали массивную установку, суммарная теплоемкость которой значительно больше полной теплоемкости образца. Отсутствовал нагрев экспериментальной установки (нагревали только исследуемый образец). Задавали значительный объемный расход охлаждающего агента, который обеспечивал большую величину общей теплоемкости охлаждающего агента, проходящего через установку за 1 с, в 10–20 раз превышающую полную теплоемкость куска кокса. Постоянство коэффициента теплоотдачи обе-

спечивалось отсутствием изменения физических свойств теплоносителя и его постоянной линейной скоростью в пересчете на свободное сечение.

Рабочая камера экспериментальной установки выполнена по принципу аэродинамической трубы открытого типа. На входе в установку соблюдали равномерное распределение скоростей потока теплоносителя. Доля сечения, занимаемая куском кокса максимального размера, не превышала 0,6 %. Куски кокса подбирали таким образом, чтобы их форма и размеры резко отличались друг от друга, что позволяет, во-первых, определить степень влияния формы куска на теплообмен, во-вторых, получить усредненную зависимость для определения коэффициента теплоотдачи.

Размеры образцов, необходимые для обработки экспериментальных данных, определяли следующим образом. Первоначально оценивали форму куска кокса. Потом измеряли величины длин ребер параллелепипеда и после усреднения измерений определяли их соотношение. Зная объем куска кокса и соотношение его размеров, с учетом сделанного допущения о форме аналитически вычисляли линейные размеры для дальнейших расчетов.

Эксперимент проводили на четырех кусках кокса с линейными размерами от 10 до 40 мм с соотношением сторон: образец № 1 – 1 : 1 : 1,6; № 2 – 1 : 2,58 : 3; № 3 – 1 : 1,27 : 3,17; № 4 – 1 : 1,85 : 2,32.

Общий расход теплоносителя определяли измерительной диафрагмой, рассчитанной, изготовленной и установленной в соответствии с [6].

Температуру кокса измеряли хромель-алюмелевой термопарой с диаметром проволоки 0,2 мм. Для размещения термопары в куске кокса просверливали отверстие диам. 1,2 мм, глубиной 9–15 мм. При размещении термопары защитной арматурой не пользовались. Электроизоляция обеспечивалась покрытием термопарной проволоки эпоксидной смолой, что гарантировало эксплуатацию до 300 °С. Термопару в куске кокса фиксировали эпоксидной смолой, которую предварительно отверждали до полутекучего состояния для предотвращения пропитки кокса. Окончательное отверждение происходило в отверстии. Объем эпоксидной смолы не превышал 0,01 мл. При обработке результатов вводили поправку на изменение полной теплоемкости образца вследствие наличия отверстия, проволоки и горячего спая термопары, эпоксидной смолы в куске, которая не превышала долей процента (0,2 %).

Присутствие даже остатков влаги в коксе давало бы значительную погрешность при опреде-

лении полной теплоемкости образца. Поэтому перед каждой серией опытов для полного удаления влаги образец кокса высушивали при 160–180 °С. Необходимое время сушки определяли в предварительных опытах для каждого куска, при этом об окончании сушки судили по отсутствию изменения массы после 30 мин выдержки при 160 °С. Кроме длительной выдержки перед каждым опытом образец выдерживали в течение 5 мин при 160–190 °С.

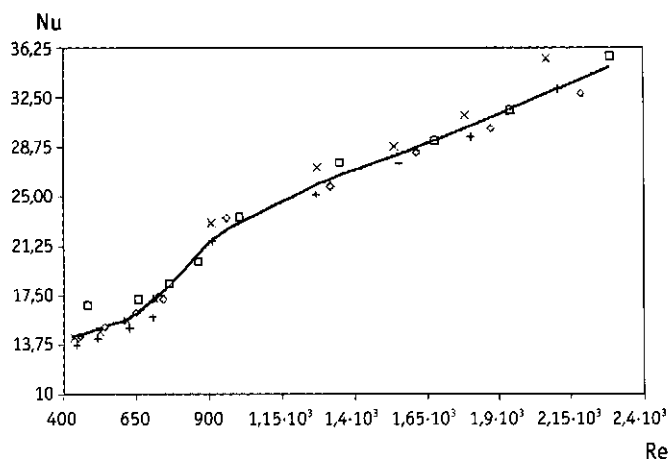
После нагрева в печи образец устанавливали по оси рабочей камеры, через которую с заданным расходом подавали теплоноситель (воздух). Образец висел в камере на термопарной проволоке, жестко закрепленной в нем эпоксидной смолой. Провода термопары в верхней части камеры были навиты на специальную планку, позволяющую регулировать положение образца в камере, и от планки отводились к измерительному прибору с классом точности 1,5.

Затем фиксировали изменение температуры во времени. Предварительными расчетами определяли момент наступления регулярного режима для каждого куска, при этом выбирали достаточно продолжительный интервал времени с изменением температуры в пределах 20–30 °С, что гарантировало малое изменение теплофизических свойств куска кокса. Для выбранного участка по экспериментальным точкам методом наименьших квадратов строили прямую в координатах $\ln v = f(\tau)$ и по наклону этой прямой определяли величину темпа охлаждения.

При обработке экспериментальных данных использовали среднеарифметические данные теплофизического параметра в начале и в конце температурного интервала. Значения теплопроводности и теплоемкости кокса брали из [7] с учетом зольности, кажущейся плотности и конечной температуры коксования.

Линейный размер $R_{\text{экв}}$, необходимый для вычисления по формуле (1), отражает влияние размеров тела на перенос тепла внутри куска кокса, но не на гидродинамическую структуру потока теплоносителя, обтекающего тело. Поэтому при определении числа Рейнольдса в качестве эквивалентного диаметра d_e использовали среднеарифметическую величину между линейными размерами куска кокса.

Шаг изменения скорости выбирали таким, чтобы изменение значения критерия Re при переходе к следующей экспериментальной точке составляло ~ 20 % относительно предыдущей. В каждой точке для каждого куска выполняли 6 экспериментов. Набор значений темпа охлаждения по результатам серии опытов в данной точке



Результаты эксперимента для образцов:

+ — образец № 1; × — образец № 2; □ — образец № 3;
◇ — образец № 4

обрабатывали статистическими методами с расчетом среднего значения, среднеквадратичного отклонения и доверительного интервала.

Результаты представлены на рисунке; как видно, влияние размеров и соотношения линейных размеров кусков кокса на интенсивность теплообмена при одинаковых значениях Re (т. е. при одинаковых гидродинамических режимах) проявляется в незначительной степени: экспериментальные точки для различных кусков лежат близко друг к другу.

Между экспериментальными точками в прикладном математическом пакете Mathcad методом наименьших квадратов построена кривая, обобщающая результаты эксперимента. На кривой можно выделить три различных участка: начальный — $Re = 430 \div 650$, имеющий пологий характер; средний — $Re = 650 \div 1400$, выпуклый наружу; конечный — $Re > 1400$, приближающийся по форме к прямой. Такой вид кривой можно объяснить, исходя из представлений о хорошо изученном конвективном теплообмене цилиндра и шара.

При набегании газового потока на цилиндр можно выделить две области с различными гидродинамическими характеристиками — лобовую зону и зону «за кормой» цилиндра [9, с. 101, 102]. В широких пределах изменения Re (до $Re = (1-4) \cdot 10^5$ [9, с. 101]) лобовая часть цилиндра при отсутствии искусственной турбулизации потока обтекает устойчивым ламинарным пограничным слоем. Характер движения потока за кормой цилиндра претерпевает ряд трансформаций. До $Re \approx 0,5 \div 1,5$ наблюдается безотрывное обтекание потоком цилиндра, затем происходит отрыв потока от поверхности и образование за кормой вихревой зоны. При этом турбулизации

пограничного слоя не происходит. Для ламинарного пограничного слоя цилиндра, шара и частиц неправильной формы Re будет иметь степень $\sim 0,5$ [8, 10]. Начиная с $Re \approx 30 \div 50$ устанавливается более или менее постоянное соотношение площадей поверхности между лобовой частью ($\sim 45\%$ всей поверхности цилиндра) и кормой ($\sim 55\%$ всей поверхности цилиндра). Начиная с определенного значения Re , которое определяется степенью турбулизации набегающего потока, состоянием поверхности, углом атаки, в корме цилиндра образуется турбулентный пограничный слой. При полной турбулизации пограничного слоя цилиндра (шара) Re будет иметь степень $\sim 0,82$ [8]. Подобный характер обтекания газом наблюдается и для шара.

Автор работы [9, с. 104] рекомендует для расчета среднего по периметру цилиндрической трубы коэффициента теплоотдачи следующие формулы, полученные в результате анализа и обработки большого объема экспериментальных данных:

$$\begin{aligned} \overline{Nu} &= 0,49Re^{0,50}, & Re < 1000; \\ \overline{Nu} &= 0,245Re^{0,60}, & Re > 1000. \end{aligned} \quad (3)$$

Для куска кокса изменение характера кривой $Nu = f(Re)$ определяется механизмом теплообмена в кормовой части куска, так как в лобовой части при всех значениях Re , имевших место в эксперименте, будет устойчивый ламинарный слой с неизменным механизмом переноса тепла.

Начальный участок кривой (см. рисунок) соответствует ламинарному слою по всей поверхности куска кокса. По сравнению с шаром для куска кокса характерно значительное расширение границ существования на всей поверхности устойчивого ламинарного пограничного слоя. Это можно объяснить шероховатостью и неоднородностью поверхности куска кокса, вследствие чего пограничный слой «прилипает» к ней, что приводит к утолщению пограничного слоя, обволакивающего кусок, и увеличению термического сопротивления теплообмену.

Вид второго участка определяется отрывом потока и развитием вихревой зоны в кормовой части куска. С учетом неоднородности поверхности куска — наличие многочисленных выступов и углублений — этот процесс должен сопровождаться турбулизацией пограничного слоя на локальных участках поверхности — в районах выступов.

Третий участок соответствует турбулентному пограничному слою в кормовой части куска. Для этой области нами методом наименьших квадратов получена следующая зависимость:

$$Nu = 0,351Re^{0,596}. \quad (4)$$

Как видно, показатель степени при Re в формуле (4) практически совпадает с показателем степени в формуле (3). Это свидетельствует об одинаковом характере развития процессов, а следовательно, и о близости физических механизмов переноса тепла. Однако абсолютное значение коэффициента теплоотдачи для куска кокса в 1,43 раза больше, чем для цилиндрической трубы при одинаковых значениях Re . Это можно объяснить отличием формы куска кокса от цилиндрической трубы и состоянием поверхности, на выступах которой происходит более сильная турбулизация, чем в среднем по поверхности.

На основе приведенного анализа можно утверждать, что для единичных кусков кокса, имеющих форму, близкую к прямоугольному параллелепипеду, характерную для валового промышленного кокса, механизм конвективного теплообмена близок к механизму конвективного теплообмена для цилиндра и шара. Отличия обусловлены в основном состоянием поверхности куска кокса.

Полученные результаты согласуются с принятой в работе [11, с. 85–87] моделью расчета теплообмена в слое кокса, когда насыпная масса кокса представляется в виде поперечно обтекаемого пакета цилиндрических тел.

По методике Гипрококса значение коэффициента теплоотдачи в слое кокса для усредненных гидродинамических условий промышленной камеры сухого тушения составляет $128 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$ [1]. Для этих условий коэффициент теплоотдачи, рассчитанный по формуле (4), в ~ 3,4 раза меньше. Это явление однозначно объясняется турбулизацией потока в слое из-за наличия резких сужений и поворотов, а также многочисленных точек касания между кусками и отрывов течения [10]. По этим причинам происходит турбулизация всего пограничного слоя поверхности куска, участвующей в теплообмене, а не только ее кормовой

части. Степень турбулизации при тех же значениях критерия Re значительно выше, чем для кормовой части единичного куска.

Таким образом, в слое кокса происходит значительная интенсификация теплообмена, которая компенсирует уменьшение теплообмена вследствие образования застойных зон между кусками и взаимной блокировки поверхности.

Список литературы

1. Гребенюк А. Ф., Голубев А. В., Коваленко Д. А. Анализ экспериментальных данных по теплообмену в установках сухого тушения кокса // Углекимический журнал. 2006. № 3/4. С. 48–54.
2. Старовойт А. Г., Анисимов В. А., Гончаров В. Ф. Кинетика движения и характер охлаждения кокса в камере УСТК // Кокс и химия. 1990. № 3. С. 9, 10.
3. Осипова В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена : учеб. пособие для вузов. – М. : Энергия, 1979. – 320 с.
4. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М. : Высшая школа, 1967. – 599 с.
5. Эйдельман Е. Я. Основы технологии коксования углей. – Киев–Донецк : Вища школа. Головное изд-во, 1985. – 191 с.
6. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами РД-50-2/3-80. – М. : Издательство стандартов, 1982. – 318 с.
7. Агроскин А. А., Глейбман В. Б. Теплофизика твердого топлива. – М. : Недра, 1980. – 256 с.
8. Чуханов З. Ф. Теплоотдача цилиндрической трубы и шара в газовом потоке // Докл. АН СССР. Т. ЛII, № 8. 1946. С. 685–688.
9. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.
10. Чуханов З. Ф. Высокоскоростной метод интенсификации конвективного переноса тепла и вещества // Изв. АН СССР. Отделение технических наук. 1947. № 10. С. 1341–1356.
11. Мучник Д. А., Постольник Ю. С. Теория и техника охлаждения кокса. – Киев–Донецк : Вища школа. Головное изд-во, 1979. – 160 с.

Статья поступила 15.07.2011 г.

HEAT TRANSFER COEFFICIENT FOR SINGLE PIECE OF COKE

© A. V. Golubev, E. I. Zbykovskiy

An experimental determination of heat transfer coefficient for single piece of coke while convective heat transfer to cooling gas is presented. Method of experiment and experimental device are described. The mechanism of convective heat transfer for piece of coke was suggested. It's shown that heat transfer coefficient in a layer of coke while coke dry quenching increases considerably due to factors contributing to more turbulence.

Keywords: coke; convective heat transfer; cooling gas; heat transfer coefficient; dry coke quenching.