

3. Mansfield C.T. Petroleum and Coal. / C.T.Mansfield, B.N.Barman, J.V.Thomas, A.K.Mehrotra, J.M.McCann // Anal. Chem. — 1999. — Vol.71, № 12. — P. 81–108.

4. Zubkova V. Chromatographic methods and techniques used in studies of coals, their progenitors and coal-derived materials // Anal Bioanal Chem. – ASAP:DOI 10.1007/s00216-010-4328-x 17 p.

5. Islas C.A. Pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry of fractions separated from a low-temperature coal tar: an attempt to develop a general method for characterising structures and compositions of heavy hydrocarbon liquids. / C.A.Islas, I.Suelves, J.F.Carter, W.Li, T.J.Morgan, A.A.Herod, R.Kandiyoti. // Rapid Communications in Mass Spectrometry/ — 2009. — Vol.16. — № 8. — P. 774–784.

6. Catalytic arylation and alkylation of phenol with components of the 130–170 °C fraction of pyrolysis products. / Ch.K.Rasulov, A.G.Azizov, V.G.Mirzoev, R.K.Azimova, S.I.Abasov, S.Z.Alieva. // Petroleum Chemistry. — 2009. — Vol. 49, №. 5. — P. 377–380.

© Луцык А.И., Портнянский В.Ю., Суйков С.Ю.,  
Денисенко Ю.И., Иващенко Е.Ю., 2011

Надійшла до редколегії 14.12.2010

УДК 662.741.355.002.5

**А.В. Голубев, Е.И. Збыковский, О.Ю. Голуб** (ГБУЗ «Донецкий национальный технический университет»)

### **АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В СЛОЕ КОКСА**

*Приводится система дифференциальных уравнений и краевых условий, описывающих конвективный теплообмен в слое кокса. На основании аппарата теории подобия решение этой системы представляется в виде безразмерных комплексов. Проведен анализ полученного решения. Отброшены факторы, не влияющие на величину коэффициента теплоотдачи в условиях промышленных установок. Показано, что для получения экспериментальных данных, пригодных для использования в промышленных условиях, необходимо строгое соблюдение предпосылок, лежащих в основе вывода конечной зависимости для определения коэффициента теплоотдачи.*

*Ключевые слова: сухое тушение кокса, коэффициент теплоотдачи, конвективный теплообмен, экспериментальная зависимость, теория подобия, физическое моделирование.*

Сухое тушение кокса позволяет существенно повысить энергетическую эффективность коксового производства с одновременным значительным улучшением качества кокса и уменьшением вредных выбросов по сравнению с мокрым тушением. Наибольшее распространение в мире получили установки сухого тушения кокса конструкции (УСТК) ГИПРОКОКСа. В основу работы этих агрегатов положен конвективный теплообмен между охлаждающим газом и горячим коксом. Для конвективного теплообмена коэффициент теплоотдачи является фундаментальным параметром. Коэффициент теплоотдачи в значительной степени определяет развитие большинства промышленных процессов химической технологии. Поэтому при проектировании и контроле

работы УСТК важно знать характер зависимости коэффициента теплоотдачи от различных факторов.

Существует несколько методик определения коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи при охлаждении кокса инертными газами, полученные в лабораторных условиях [1-3]. При их применении получаются противоречивые, значительно отличающиеся друг от друга результаты, что объясняется трудностями теоретически грамотной постановки опыта при изучении теплообмена для крупнокускового материала и попытками использовать для кокса зависимости, полученные для других материалов (например, зависимости для расчета регенеративных теплообменников).

Для промышленных УСТК исследования по теплообмену проведены А.Г. Старовойтом с сотрудниками [4]. В УСТК на теплообмен значительное влияние оказывает конструктивное оформление процесса, следствием которого является наличие зон с различной интенсивностью теплообмена. В [4] приведены значения коэффициента теплоотдачи для каждой из этих зон. Однако в промышленных условиях затруднительно провести широкое варьирование влияющих факторов (прежде всего, скорости охлаждающего газа) и определить степень влияния каждого из них.

Таким образом, представляет интерес проведение теоретически строго обоснованного экспериментального исследования процесса теплообмена в слое кокса в идеальных условиях при широком варьировании влияющих факторов.

Любой эксперимент по теплообмену должен отвечать следующим основным требованиям:

- возможность получения на опытной установке результатов, адекватных практическим целям;
- простота и возможно меньшая продолжительность и затратность опыта;
- минимальная погрешность измерительной схемы и наличие точной оценки этой погрешности;
- простота и точность математической обработки получаемых результатов.

Принципиальные элементы конструкции опытной установки, определяемые величины, интервал исследований и способ представления конечных результатов задаются требованиями теории моделирования, что создает необходимые условия адекватности опыта практическим целям. Количество и характер измерений определяются преимущественно способом математической обработки результатов, который должен обеспечивать соответствие конечных результатов измерений задачам эксперимента.

Наиболее точные результаты при изучении теплообмена дают методы физического моделирования.

Экспериментальное определение коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи неоднородных по фракционному составу крупнодисперсных материалов, к которым можно отнести валовый кокс и отдельные его фракции, методом физического моделирования вызывает ряд затруднений. Это обусловлено необходимостью соблюдения значительного количества требований, определяющих размеры исследовательской установки и характер проведения опыта.

Проанализируем с помощью механизма теории подобия, в какой форме и какие величины должны входить в зависимость по определению коэффициента теплоотдачи слоя кокса при условии ее применимости для реальных промышленных агрегатов.

Процесс теплообмена при сухом тушении кокса в дифференциальном виде можно описать следующими уравнениями: уравнением движения вязкой жидкости Навье-Стокса (1), уравнением неразрывности (сплошности) течения (2) и уравнением Фурье-Кирхгофа (3)

$$\rho \cdot \frac{\partial w_x}{\partial \tau} + \rho \cdot w_x \cdot \frac{\partial w_x}{\partial x} + \rho \cdot w_y \cdot \frac{\partial w_x}{\partial y} + \rho \cdot w_z \cdot \frac{\partial w_x}{\partial z} = \rho \cdot g - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho \cdot \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho \cdot w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w_z)}{\partial z} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \cdot \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial t}{\partial z} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

где  $\rho$  — плотность охлаждающего газа,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;  $w_x, w_y, w_z$  — составляющие скорости по осям координат  $x, y, z$ ,  $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;  $\tau$  — время, с;  $g$  — ускорение силы тяжести,  $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ;  $P$  — давление,  $\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ ;  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  — кинематический коэффициент вязкости охлаждающего газа,  $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ;  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости охлаждающего газа,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;  $\beta$  — коэффициент температурного расширения газа,  $\frac{1}{\text{град}}$ ;  $\Delta t$  — температурный напор по оси  $x$  охлаждающего газа, град;  $t$  — температура охлаждающего газа,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $a$  — коэффициент теплопроводности охлаждающего газа,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$ .

Для простоты проекция уравнения (1) на оси  $y$  и  $z$  не проводится, что при анализе подобия не приводит к ограничению общности [5]. В уравнении (1) принято, что направление действия силы тяжести совпадает с направлением оси  $x$ , а вязкость во всей области течения не изменяется  $\mu = \text{const}$ .

В силу малых скоростей охлаждающего газа при сухом тушении кокса нет необходимости дополнять уравнения (1) и (2) уравнением, описывающим сжимаемость газа при больших (околозвуковых, сверхзвуковых) скоростях движения газа.

Приведенные выше уравнения должны быть дополнены краевыми условиями. Условия теплообмена задаем уравнением теплоотдачи (граничным условием третьего рода):

$$\alpha \cdot (t_c - t_{\text{ж}}) = -\lambda \cdot \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n \rightarrow 0},$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$ ;  $t_c$  — температура поверхности кокса,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{ж}}$  — температура охлаждающего газа,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda$  — коэффициент

теплопроводности охлаждающего газа,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$ ;  $\left(\frac{\partial t}{\partial n}\right)_{n \rightarrow 0}$  — градиент температур в слоях газа, прилегающих к поверхности кокса,  $\frac{\text{град}}{\text{м}}$ .

Для сухого тушения зависимостью физических параметров от температуры пренебречь нельзя. Считаем, что эти зависимости заданы в виде эмпирических функций.

Геометрические условия, предполагая равномерное распределение потоков по поперечному сечению, задаем в виде эквивалентного поперечного размера аппарата  $D$ , м, высоты установки  $H$ , м, и эквивалентного размера куска кокса  $d$ , м. При неравномерном распределении потоков должен быть дополнительно введен геометрический размер (или размеры), характеризующий эту неоднородность.

Из опыта известно, что распределение давлений и скоростей определяется условиями на входе и на границах потока, но распределение давления в свою очередь практически определяется распределением скоростей [6]. Поэтому в данном случае достаточно задать скорость потока на входе  $w = f_w(x, y, \tau)$  и скорость на границах с коксом  $w_{cm} = 0$  (вследствие прилипания потока). При равномерном распределении охлаждающего газа по сечению  $w = f_w(\tau)$ . Задание  $w_{cm}$  делает возможным использование выражения (3) для описания теплообмена.

Для нестационарного процесса должны быть заданы начальные условия. Для конвективного теплообмена начальные условия задаются в виде функции распределения температур  $t = f_t(x, y, z, \tau = 0)$ .

Общее решение сформулированной выше задачи при использовании аппарата теории подобия представляется в критериальном виде следующим образом

$$f(Fo, Ho, Fr, Eu, Re, Nu, Pr, \frac{H}{d}, \frac{D}{d}, \frac{\delta}{d}) = 0, \quad (4)$$

где  $Fo = \frac{a \cdot \tau}{d_e^2}$  — критерий Фурье;  $d_e$  — характерный геометрический размер

системы, м;  $Ho = \frac{w \cdot \tau}{d_e}$  — критерий гомохронности (Струхалья);  $w$  — характерная

скорость газа,  $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;  $Fr = \frac{w^2}{g \cdot d_e}$  — критерий Фруда;  $Eu = \frac{\rho}{\rho \cdot w^2}$  — критерий

Эйлера;  $Re = \frac{w \cdot d_e \cdot \rho}{\mu} = \frac{w \cdot d_e}{\nu}$  — критерий Рейнольдса;  $Nu = \frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda}$  —

критерий Нуссельта;  $Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a}$  — критерий Прандля;  $c_p$  — удельная

теплоемкость охлаждающего газа,  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{град}}$ ;  $\frac{H}{d}, \frac{D}{d}, \frac{\delta}{d}$  — геометрические критерии-симплексы (критерии параметрического типа).

Коеффіцієнт теплоотдачи может быть отнесен не к единице поверхности, а к единице объема (размерность  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{град}}$ ). В этом случае экспериментальные данные обрабатываются соответствующим образом, например, используется модифицированный критерий Нуссельта  $Nu = \frac{\alpha \cdot d_e^2}{\lambda}$  [2].

Полученное уравнение определяет необходимые условия полного подобия процессов гидродинамики и теплообмена в слое кокса. При этом следует иметь в виду следующее обстоятельство. В процессе сухого тушения температуры охлаждающего газа и кокса изменяется значительно, следовательно, изменяются значительно их физические свойства. Подобие процессов выполняется тем строже, чем меньше относительное изменение этих свойств. При значительном изменении свойств строгое подобие различных процессов, как показывает анализ, в общем случае становится невозможным [5]. В этих условиях имеет место лишь приближенное подобие. Однако, как показано в [6], приближенное подобие, при строгом соблюдении теоретических предпосылок, дает результаты, вполне точно описывающие моделируемый процесс, и может применяться без каких-либо ограничений прикладного характера. При этом на первый план выходят способ осреднения изменяющихся параметров и выбор характерных величин. Подробнее эти вопросы для конвективного теплообмена в слое кокса рассмотрены ниже.

Проанализируем уравнение (4). Определяемым при изучении теплообмена является критерий Нуссельта. Критерий Эйлера является определяемым для гидродинамических процессов и зависит от критериев-комплексов (критериев комплексного типа) Фруда, Рейнольдса, гомохронности и критериев-симплексов (критериев параметрического типа). Поэтому критерий Эйлера при изучении теплообмена не следует учитывать.

Критерий Фурье характеризует условия подобия нестационарных процессов теплоотдачи по времени. Он является аналогом критерия гомохронности (Струхаля)  $Ho = \frac{W \cdot \tau}{d_e}$ , который используется для описания

нестационарных гидродинамических процессов. В [8] показано, что нестационарность не влияет на значение коэффициента теплоотдачи, так как вследствие быстрого установления скоростного и температурного равновесия в пограничном слое процесс теплообмена становится квазистационарным. Таким образом, критерий Нуссельта не зависит от критерия Фурье как для промышленного агрегата, так и для любой исследовательской установки.

Промышленные аппараты работают в стационарном гидродинамическом режиме, поэтому критерий гомохронности для них теряет физический смысл.

Критерием Фруда широко пользуются при исследовании оросительных систем, движения воды через плотины и других потоков, перемещение которых происходит главным образом под воздействием силы тяжести. При изучении естественной конвекции, вызванной разностью плотностей в различных точках трудно определить скорость движения конвективных токов. В этом случае применяют критерии производные от критерия Фруда (Архимеда, Галилея и др.). При вынужденном движении газов силы тяжести не участвуют в формировании потока, т. к. они пренебрежимо малы по сравнению с силами вязкости и инерции. Поэтому критерий Фруда можно исключить из условий подобия [7].

Так как теплообмен происходит в газовом потоке, то по отношению к критерию Прандтля в силу малого его изменения в широком температурном интервале процесс является автомодельным, его можно исключить из уравнения. Отношение  $\frac{H}{d}$  характеризует влияние на гидродинамику потока возмущений, возникающих при входе потока в слой. При достаточно большом отношении  $\frac{H}{d}$  его влияние вырождается. Опытами показано, что при  $\frac{H}{d} > 5$  коэффициент теплообмена остается постоянным при дальнейшем увеличении слоя. Для валового кокса в промышленных установках сухого тушения это отношение значительно больше. Влияние этого параметра вырождено.

Критерий-симплекс  $\frac{D}{d}$  учитывает влияние пристеночной порозности на гидродинамику потока. При величине отношения  $\frac{D}{d} > 10$  влияние пристеночной порозности на гидродинамику потока, а следовательно и на интенсивность теплообмена, незначительно [9]. Параметрический критерий  $\frac{\delta}{d}$  учитывает влияние шероховатости поверхности на теплообмен. Для теплообмена в слое кокса этот параметрический критерий количественно учесть невозможно, поэтому это отношение необходимо учитывать качественно, т.е. соответствующая критериальная зависимость справедлива лишь для данного материала — кокса.

Таким образом, с учетом вышеприведенных рассуждений и допущений, имеем:

$$Nu = f(Re) \text{ или } Nu = A \cdot Re^n, \quad (5)$$

где  $A$ ,  $n$  — эмпирически определяемые константы.

Формально в виде таких же или подобных зависимостей обрабатывали полученные опытные данные и другие авторы [2, 3]. Однако при этом в экспериментах не соблюдались все предпосылки, лежащие в основе вывода этой зависимости, что привело к значительным отличиям результатов разных авторов друг от друга и от промышленных данных.

В качестве характерного (определяющего) размера целесообразно выбирать тот размер, который определяет развитие процесса. При этом обобщенные зависимости для однотипных, но геометрически неподобных систем, оказываются близкими или даже одинаковыми, что представляет большое удобство для практических расчетов [5]. Для кокса развитие процесса конвективного теплообмена определяют форма и размеры каналов, по которым движется охлаждающий газ. В [5] для каналов неправильного и сложного сечения, т. е. для каналов характерных для засыпок кокса, рекомендуется следующий способ определения характерного размера (эквивалентного диаметра):

$$d_e = \frac{4 \cdot S}{P}, \quad (6)$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения канала,  $\text{м}^2$ ;  $\Pi$  — смоченный периметр поперечного сечения, независимо от того, какая часть этого периметра участвует в теплообмене,  $\text{м}$ .

Для слоя кокса уравнению (6) будет эквивалентна следующая формула:

$$d_e = \frac{4 \cdot \varepsilon}{f}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon$  — порозность слоя кокса,  $\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$ ;  $f$  — удельная поверхность слоя кокса,  $\frac{\text{м}^2}{\text{м}^3}$ .

Удельную поверхность слоя кокса можно определить следующим образом:

$$f = f_k \cdot n_k = f_k \cdot \frac{1 - \varepsilon}{V_k},$$

где  $f_k$  — площадь поверхности куска кокса,  $\text{м}^2$ ;  $n_k$  — количество кусков кокса в  $1 \text{ м}^3$  слоя кокса;  $V_k$  — объем куска кокса,  $\text{м}^3$ .

При определении эквивалентного диаметра живого сечения максимально используются эмпирические данные, что делает расчет этого параметра максимально точным.

В условиях эксперимента площадь поверхности и объем кусков кокса могут быть установлены опытным путем непосредственно без какого-либо предположения о форме куска, что является наиболее верным с точки зрения точности получаемых результатов. Однако при этом возникнут трудности при практическом использовании полученных результатов, поэтому при обработке результатов необходимо делать допущение о форме куска.

В качестве характерной скорости в исследованиях конвективного теплообмена обычно применяется средняя скорость жидкости в начальном сечении системы [5]. Для слоя кокса традиционно применяется отнесение скорости газа при нормальных условиях к свободному сечению или к полному сечению аппарата (фиктивная скорость) [10], что не вызывает возражений теоретического порядка.

Осреднение физических свойств производится с помощью определяющей температуры, по которой определяются значения физических параметров. Определяющая температура может выбираться различными способами. Для сухого тушения кокса в силу значительного изменения температуры по высоте аппарата необходимо использовать среднелогарифмическую температуру охлаждающего газа.

Установка и методика опытного исследования теплообмена в слое кокса (как и любого другого крупнокускового материала) должна обеспечивать соблюдение вышеизложенных предпосылок, приводящих критериальное уравнение (4) к критериальному уравнению (5).

Форма каналов, по которым движется газ в эксперименте, должна повторять форму (но не размеры) каналов для практически реализуемых процессов. Это требование определяет размеры кусков исследуемого материала. Минимальный поперечный размер лабораторной установки

определяется соотношением  $\frac{D}{d} > 10$ . Высота установки также не может быть

выбрана произвольно, она определяется математической формулировкой задачи исследования и для большинства случаев значительно больше  $d$ , для

наиболее простого случая высота установки должна выбираться, исходя из соотношения  $\frac{H}{d}$ . Для осреднения температуры твердого материала необходимо производить замеры во многих точках. Для определения коэффициента теплопередачи необходимо также знать распределение температур по объему куска.

Работа с коксом осложняется тем, что куски имеют значительно отличающиеся размеры и форму. Широко применяемые для исследования теплообмена измерения температуры центра тела или точки на определенном расстоянии от центра (или поверхности) для тел с правильной геометрической формой для кокса неприемлемы по причине невозможности точного определения геометрического центра куска. Неправильная форма кусков кокса приводит к необходимости достаточно грубых допущений при определении эквивалентных формы и размера.

Таким образом, исследование конвективного теплообмена кокса (как и любого другого крупнодисперсного материала неоднородного фракционного состава) требует сооружение довольно массивных установок и применение сложной измерительной схемы.

### Литература

1. Гребенюк А. Ф. Анализ экспериментальных данных по теплообмену в установках сухого тушения кокса / А. Ф. Гребенюк, А. В. Голубев, Д. А. Коваленко // Углекислотный журнал. — 2006. — № 3–4. — С. 48–54.
2. Караваев Н. М. Исследование теплообмена в слое кокса / Н. М. Караваев, Г. П. Стельмах // Изв. АН СССР. ОТН. — 1957. — № 3. — С. 135–141.
3. Караваев Н. М. Влияние внутреннего термического сопротивления тела на теплообмен / Н. М. Караваев, Г. П. Стельмах // Изв. АН СССР. ОТН. — 1957. — № 2. — С. 36–42.
4. Старовойт А. Г. Кинетика движения и характер охлаждения кокса в камере УСТК / А. Г. Старовойт, В. А. Анисимов, В. Ф. Гончаров // Кокс и химия. — 1990. — №3. — С. 9–10.
5. Михеев М. А. Основы теплопередачи / Михеев М. А., Михеева И. М. — М.: Энергия, 1977. — 344 с. — (Изд. 2-е, стереотип.).
6. Гречко А. В. Практика физического моделирования на металлургическом заводе: монография / Гречко А. В., Нестеренко Р. Д., Кудинов Ю. А. — М.: Металлургия, 1976. — 224 с.
7. Ханин И. М. Изучение движения газов в коксовых печах методом подобия: монография / Ханин И. М. — Харьков: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1957. — 203 с.
8. Бицютко И. Я. Исследование процесса охлаждения сферических тел в потоке воздуха при малых значениях  $Bi$ : [в сб. «Исследование нестационарного тепло- и массообмена» / Под ред. Лыкова А. В., Смольского Б. М.] / Бицютко И. Я., Щитников В. К., Садовников Г. В., Сергеева Л. А. — Минск: «Наука и техника», 1966. — 252 с. — С. 144–160.
9. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии: учебник [для студ. высш. уч. зав.] / Дытнерский Ю. И. — М.: «Химия», 2002. — 400 с. — (Изд. 3-е. В 2-х кн.: Часть 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты).
10. Гребенюк А. Ф. Расчеты процессов коксового производства. Пособие по проектированию / Гребенюк А. Ф., Збыковский А. И. — Донецк: Норд-пресс, 2008. — 322 с.

© Голубев А.В., Збыковский Е.И., Голуб О.Ю., 2011

Надійшла до редколегії 24.09.2010