

5. Набивач В.М., Даль В.И. Газовая хроматография коксохимических продуктов. — К.: «Техника», 1967. — 212 с.
6. Столяров Б.В., Савинов И.М., Виттенберг А.Г. Руководство к практическим работам по газовой хроматографии. — Л.: «Химия», 1979. — 286 с.
7. Крутько И.Г., Кузнецов Е.Р., Киричук А.В., Кауфман С.И., Квасов А.В., Макаренко А.В. Очистка аммиачных вод от примесей диспергированных смол и масел // Кокс и химия, 1999. — № 12. — С. 32–34
8. Адельшин А.Б., Мутин Д.И., Урмитова И.С. и др. Установка очистки нефтепромысловых сточных вод с коалесцирующими насадками: обзорная информация. — М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1983. — 40 с.

© Крутько И.Г., Пульникова Ю.В., 2010

Поступила в редакцию 21.11.2009 г.

УДК 662.741.355.

Збыковский Е. И., Голубев А. В. (ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»)

РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР ПРИ КОНТАКТНОМ СПОСОБЕ СУХОГО ТУШЕНИЯ КОКСА В НЕПОДВИЖНОМ СЛОЕ

Анализируется процесс теплопередачи при контактном охлаждении кокса, которое рассматривается как альтернатива традиционному сухому тушению кокса циркулирующим газом. Показано, что точные результаты может дать только численное решение, однако с достаточной степенью точности при итерационном расчете может быть применена формула, полученная при аналитическом решении задачи нестационарной теплопроводности при условиях однозначности, соответствующих рассматриваемой задаче.

Ключевые слова: сухое тушение кокса, нестационарная теплопроводность, контактное охлаждение, численное решение, аналитическое решение.

Сухое тушение кокса способно значительно повысить энергетическую эффективность коксового производства, существенно улучшить качество кокса по многим показателям, в т.ч. по таким важным как индексы CRI и CSR, уменьшить загрязнение окружающей среды [1]. За время развития сухого тушения кокса с момента выдачи первого патента в 1917 г. было предложено множество вариантов конструктивного оформления процесса. Наиболее удачным из них считается установка сухого тушения кокса (УСТК) Гипрококса. УСТК Гипрококса получили преимущественное распространение в мире. Кроме стран бывшего СССР, они построены в Японии, Германии, Пакистане, Индии, Китае, Венгрии, Бразилии и др. странах (в т.ч. по лицензиям). Способ Гипрококса основан на охлаждении кокса циркулирующим в замкнутом контуре газом. Ему, как и другим способам тушения кокса циркулирующим газом, присущ ряд серьезных недостатков: потери кокса («угар») вследствие взаимодействия с окислительными компонентами циркулирующего газа, значительные капитальные затраты, большой расход электроэнергии на циркуляцию газов, загрязнение атмосферы избытком циркулирующего газа и пылью и др. Как альтернативу можно рассматривать контактное тушение кокса в движущемся или неподвижном слое. В неподвижном слое можно тушить как

неразрушенный коксовый «пирог», так и тонкий слой засыпки кокса [2, 3]. С практической точки зрения представляет интерес определить распределение температур по ширине коксового «пирога» или коксовой засыпки в различные моменты времени от начала охлаждения. Это даст возможность оптимизировать процесс с точки зрения технологического и конструктивного оформления, что будет способствовать уменьшению капитальных и эксплуатационных затрат.

На основании [4] общий вид дифференциального уравнения теплопроводности с изменяющимися значениями теплофизических свойств тела можно записать как:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{c(t) \cdot \rho(t)} \cdot \left(\frac{\partial}{\partial x^2} (\lambda(t) \cdot \partial t) + \frac{\partial}{\partial y^2} (\lambda(t) \cdot \partial t) + \frac{\partial}{\partial z^2} (\lambda(t) \cdot \partial t) \right) + \frac{q_g}{c(t) \cdot \rho(t)},$$

где t — температура; τ — время; x, y, z — координаты в декартовой системе координат; $\lambda(t)$ — коэффициент теплопроводности, зависящий от температуры; $\rho(t)$ — плотность тела, также в общем случае зависящая от температуры; $c(t)$ — удельная теплоемкость тела, зависящая от температуры; q_g — тепловой поток, обусловленный внутренними источниками и (или) внутренним стоком тепла.

При контактном охлаждении с нестационарным режимом кокс охлаждается в камерах или контейнерах, которые по форме и размерам близки к коксовым камерам. При этом отвод тепла преимущественно осуществляется через боковые стенки контейнера (камеры). Для этого случая слой кокса можно рассматривать как неограниченную пластину с одномерным переносом тепла в направлении, перпендикулярном стенкам, без внутренних источников и стоков тепла:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{c(t) \cdot \rho(t)} \cdot \frac{\partial}{\partial x^2} (\lambda(t) \cdot \partial t). \quad (1)$$

Решение дифференциального уравнения (1) необходимо вести при начальных и граничных условиях (условиях однозначности).

Начальные условия можно записать в виде:

$$t(x, 0) = f(x), \quad (2)$$

где $f(x)$ — функция, описывающая распределение температур по ширине «пирога» (засыпки); $t(x, 0)$ — температура в точке с координатой x в начальный момент времени $\tau = 0$.

Если температуру по ширине коксового «пирога» можно принять неизменной, то условие (2) запишется как:

$$t(x, 0) = \text{const.}$$

Для привязки уравнений математического описания к конкретному процессу охлаждения кокса используем граничные условия третьего рода, что для рассматриваемого нестационарного процесса является вполне корректным.

Граничные условия третьего рода можно записать в виде:

$$-\lambda(t(\delta, \tau)) \cdot \frac{\partial t(\delta, \tau)}{\partial x} + \alpha(t(\delta, \tau), t_c) \cdot (t(\delta, \tau) - t_c) = 0;$$

$$\lambda(t(0, \tau)) \cdot \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} + \alpha(t(0, \tau), t_c) \cdot (t(0, \tau) - t_c) = 0,$$

где δ — толщина слоя кокса, определяющая пределы дифференцирования по координате x , которая в данном случае изменяется от 0 до δ ; $t(0, \tau)$, $t(\delta, \tau)$ — температуры боковых поверхностей слоя кокса в момент времени τ ; $\lambda(t(0, \tau))$, $\lambda(t(\delta, \tau))$ — коэффициенты теплопроводности боковых поверхностей слоя кокса в момент времени τ ; t_c — температура окружающей среды; $\alpha(t(\delta, \tau), t_c)$, $\alpha(t(0, \tau), t_c)$ — коэффициенты теплоотдачи боковых поверхностей слоя кокса в момент времени τ .

При данных граничных и начальных условиях для нестационарного процесса нагревания (охлаждения) неограниченной пластины в [4] приводится аналитическое решение уравнения (1):

$$\vartheta(x, \tau) = t(x, \tau) - t_c = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n} \cdot \cos\left(\mu_n \cdot \frac{x}{R}\right) \cdot \frac{2}{R} \cdot \int_0^R f_1(x) \cdot \cos\left(\mu_n \cdot \frac{x}{R}\right) \cdot e^{-\mu_n^2 \frac{a \cdot \tau}{R^2}} dx \right), (3)$$

где $\vartheta(x, \tau)$ — избыточная температура в точке с координатой x в момент времени τ ; μ_n — корни характеристического уравнения

$$\operatorname{ctg} \mu = \frac{1}{Bi} \cdot \mu;$$

Bi — критерий Био

$$Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda}; (4)$$

R — половина толщины пластины

$$R = \frac{\delta}{2};$$

λ — коэффициент теплопроводности тела; a — коэффициент температуропроводности:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p},$$

c_p — удельная теплоемкость тела; x — координата точки, для которой вычисляется температура, $0 \leq x \leq R$.

В силу симметричности рассматриваемой задачи начало координат помещается по оси пластины.

Количество членов ряда (3), которое необходимо брать для точного решения уравнения (1) определяется значением критерия Фурье:

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{R^2}.$$

Для большинства практических случаев приходится пользоваться только первыми корнями μ_n , так как благодаря неравенству

$$\mu_1 < \mu_2 < \dots < \mu_n$$

ряд (3) быстро сходится, и, начиная с определенного значения Fo , все члены ряда становятся исчезающе малыми по сравнению с первым членом. При $Fo \geq 0,3$ ошибка не превышает 1%, если отбросить все члены ряда, кроме первого [5].

Корни характеристического уравнения (4) даны в специальной литературе. В [4] приведены первые шесть корней для разных значений критерия Био.

Для равномерного начального распределения температуры и неизменяющейся температуры среды, т. е. при

$$t(x, 0) = f(x) = t_0 = \text{const},$$

$$f_1(x) = t_c - f(x) = t_c - t_0 = \text{const}$$

уравнение (3) примет вид:

$$\frac{t_c - t(x, \tau)}{t_c - t_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2 \cdot \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n} \cdot \cos\left(\mu_n \cdot \frac{x}{R}\right) \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot \frac{a \cdot \tau}{R^2}) \right) \quad (5)$$

или в обобщенных переменных:

$$\theta = \frac{t(x, \tau) - t_0}{t_c - t_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cdot \cos(\mu_n \cdot X) \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo)),$$

где θ — относительная избыточная температура; $X = \frac{x}{R}$ — безразмерная координата; A_n — постоянная

$$A_n = \frac{2 \cdot \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n} = (-1)^{n-1} \frac{2 \cdot Bi \sqrt{Bi^2 + \mu_n^2}}{\mu_n \cdot (Bi^2 + Bi + \mu_n^2)}.$$

При охлаждении коксового «пирога» в камере без его разрушения и соприкосновения с охлаждающими стенками коэффициент теплоотдачи в общем случае определяется как:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_l,$$

где α_k — коэффициент конвективной теплоотдачи; α_l — коэффициент теплоотдачи лучистого механизма переноса тепла.

Лучистый коэффициент теплоотдачи для двух параллельно расположенных, равных или близких по площади поверхностей определяется выражением [6]:

$$\alpha_l = \frac{\varepsilon_{\text{пр}} \cdot c_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{T_1 - T_2}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ — приведенная степень черноты

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1};$$

ε_1 и ε_2 — степень черноты соответственно более нагретого и менее нагретого тела; $c_0 = 5,67$ — коэффициент излучения абсолютно черного тела, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$; T_1 — абсолютная температура поверхности более нагретого тела, т. е. в нашем случае $T_1 = t(\delta, \tau) + 273$ или $T_1 = t(0, \tau) + 273$. При условии равенства температур боковых поверхностей коксового «пирога» в начальный момент времени и

одинаковой температуры охлаждающих поверхностей можно записать: $T_1 = t(\delta, \tau) + 273 = t(0, \tau) + 273$, К; T_2 — абсолютная температура поверхности менее нагретого тела, т. е. охлаждающих стенок: $T_2 = t_{ct} + 273$, К.

По определению конвективным теплообменом (теплоотдачей) переносится тепло от поверхности твердого тела к жидкости (газу) с помощью механизмов теплопроводности и конвекции [7].

Очевидно, при данных условиях охлаждения естественная конвекция будет вносить пренебрежительно малый вклад в общий перенос тепла. Поэтому можно принять поток тепла при конвективной теплоотдаче равным тепловому потоку, передаваемому по закону Фурье за счет теплопроводности газового слоя между «пирогом» и охлаждающими стенками. Этот тепловой поток определяется как:

$$q_k = -\lambda_g \cdot \frac{\partial t}{\partial n},$$

где $\frac{\partial t}{\partial n}$ — градиент температур в газовом слое; λ_g — теплопроводность газового слоя.

Так как толщина газового слоя невелика, можно заменить производную конечными разностями:

$$q_k = \frac{\lambda_g}{\Delta} \cdot (t_n - t_{ct}),$$

где Δ — толщина газового слоя между коксовым «пирогом» и охлаждающими стенками; t_n — температура поверхности коксового «пирога».

Как показывают наши расчеты, максимальное количество тепла, переносимого этим способом, не превышает 10% от количества тепла, переносимого радиационным механизмом, в среднем составляет 5–6%. В дальнейших расчетах эта величина учтена.

При тушении кокса в разрушенном «пироге» тепло от кокса к охлаждающим стенкам передается излучением и теплопроводностью через контактные пятна. Точное определение переносимого количества тепла расчетным путем, без эмпирических данных в этом случае представляется труднорешаемой задачей. При этом эмпирические данные по этому вопросу обрывочны и, как показывает литературный обзор, наиболее полно представлены работой [8], используя результаты которой нельзя однозначно определить величину коэффициента теплоотдачи для промышленного валового кокса. Поэтому более точным и надежным представляется следующий способ расчета. Слой кокса и стенки охлаждающей камеры представляются как единое целое — неограниченная пластина, для этой системы рассчитываются значения теплофизических свойств, а коэффициент теплоотдачи для этого случая есть коэффициент теплоотдачи от стенок камеры к охлаждающей среде (кипящей воде).

Однако, при этом возникает проблема определения величины теплопроводности засыпки кокса в широком интервале температур. Для разрушенного «пирога» данные по экспериментальному определению теплопроводности обрывочны и, как показывает литературный обзор, наиболее полно представлены результатами [9], по которым, тем не менее, нельзя сделать определенного вывода о величине теплопроводности слоя валового промышленного кокса. Следовательно, проверенных методик расчета этого теплофизического параметра также нет.

Расчет по формулам (3) и (5) для больших значений критерия Фурье, т. е. для больших промежутков времени, сопряжен со значительными погрешностями, обусловленными трудноучитываемыми изменениями теплофизических свойств тела, движущей силы процесса и коэффициента теплоотдачи, для нашего случая однозначно зависящих от распределения температур в коксовом «пироге».

Поэтому представляет интерес итерационный расчет, при котором изменение температуры в определенных точках (но не менее, чем в двух: поверхности и осевой плоскости) рассчитываются при небольших значениях F_0 . Далее, с учетом полученных значений температур, корректируются все величины, зависящие от температуры и на основании скорректированных значений расчет повторяется.

В силу относительной простоты выражения (5) по сравнению с (3) (нет необходимости вычисления интеграла), несмотря на заведомую дополнительную погрешность расчета, обусловленную предположением о постоянной температуре по ширине в начальный момент времени, представляет интерес использование для «ручного» расчета выражения (5).

Нами проведен пошаговый (итерационный) расчет для малых значений критерия Фурье для выражений (3) и (5), а также обычный расчет для больших значений критерия Фурье с усреднением параметров, зависящих от температуры, для выражения (5) с использованием прикладного математического пакета MathCad.

Использование малых значений критерия Фурье осложнено необходимостью расчета значительного количества членов в уравнениях (3) и (5). Увеличение числа шагов при расчете повышает точность учета изменения параметров, зависящих от температуры, но чрезвычайно усложняет «ручной» расчет. Для расчета по формулам (3) и (5) минимальное значение критерия Фурье, использованное в вычислениях, соответствовало 15 мин, при этом брались первые шесть членов рядов (3) и (5).

Однако аналитическое решение не может дать точного результата для рассматриваемой задачи даже при применении итерационного расчета в силу чрезвычайной сложности учета изменения теплофизических свойств тела и коэффициентов теплопереноса. Точный результат может быть получен при численном решении.

Существуют различные способы численного решения задач нестационарной теплопроводности. Наиболее распространенными являются метод конечных разностей и метод конечных балансов [7]. Нами при решении был использован метод конечных балансов. Численный расчет был осуществлен на основе приведенных выше начальных и граничных условий.

Как отмечалось выше, расчет распределения температур для засыпки кокса сопряжен с трудностями при определении коэффициентов теплопереноса. Поэтому в качестве примера мы провели расчет только лишь для неразрушенного «пирога», значения физических свойств и коэффициентов теплопереноса для которого можно надежно определить из литературных источников или рассчитать по проверенным методикам.

Расчет для неразрушенного коксового «пирога» проводился при следующих исходных данных:

средняя ширина коксового «пирога», мм..... 410;
давление получаемого водяного пара, ата.....6;
начальная температура по оси «пирога», °С.....1050;
начальная температура по поверхности «пирога», °С.....1090;

распределение температуры по ширине «пирога» в начальный момент времени является линейной функцией;

коэффициент теплоотдачи охлаждающей среде, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$ 8000;

время охлаждения, ч.....10.

Теплофизические свойства кокса взяты из [10].

При использовании выражений (3) и (5) необходимо задаться эффективной температурой стенки для определения лучистого коэффициента теплоотдачи по формуле (6) и движущей силы процесса. Как показывает численное решение, средняя температура охлаждающей стенки может быть принята равной 160,5°C, т.е. чрезвычайно близкой к температуре охлаждающей среды, что следовало ожидать так, как термическое сопротивление чугунной стенки мало, а интенсивность теплоотдачи от «пирога» стенке значительно меньше теплоотдачи от стенки охлаждающей среде. Этот же вывод можно сделать, проведя анализ соотношения коэффициентов теплоотдачи и теплопроводности при помощи критерия Био.

В табл. 1 приводятся результаты численного решения, в табл. 2 — решения по формуле (3).

Таблица 1. Распределение температур по ширине коксового «пирога» при охлаждении, численное решение (средняя ширина «пирога» 410 мм)

Время от начала охлаждения, ч	Расстояние от боковой поверхности, м					Средняя температура, °C
	0,00	0,051	0,102	0,154	0,205	
	Температура, °C					
0,00	1090	1080	1070	1060	1050	1070
0,25	504	975	1065	1059	1056	932
0,50	433	865	1032	1059	1058	889
0,75	394	790	990	1053	1057	857
1,00	371	735	951	1040	1051	830
1,25	355	693	914	1024	1039	805
1,50	344	660	882	1004	1023	783
1,75	334	632	853	983	1005	761
2,00	326	609	826	961	985	742
2,25	320	590	802	939	964	723
2,50	314	572	779	918	942	705
2,75	308	557	758	896	921	688
3,00	304	542	739	875	900	672
3,25	299	529	721	855	879	657
3,50	295	517	704	835	859	642
3,75	291	506	687	816	840	628
4,00	287	495	672	797	821	615
4,25	284	485	657	779	802	602
4,50	281	476	643	762	785	589
4,75	278	467	629	746	768	577
5,00	275	458	616	730	751	566
5,25	272	450	604	715	736	555
5,50	269	442	592	700	720	544
5,75	266	435	580	686	706	535
6,00	264	428	569	672	692	525
6,50	259	414	548	646	665	506
7,00	254	401	528	622	640	489
7,50	250	390	510	599	617	473
8,00	246	378	493	578	594	458
9,00	238	358	462	539	554	430
10,00	231	340	435	504	517	406

Таблица 2. Распределение температур по ширине коксового «пирога» при охлаждении, аналитическое решение (средняя ширина «пирога» 410 мм)

Время от начала охлаждения, ч	Расстояние от боковой поверхности, м					Средняя температура, °С
	0,00	0,051	0,102	0,154	0,205	
	Температура, °С					
0,00	1090	1080	1070	1060	1050	1070
0,25	362	952	1064	1061	1057	899
0,50	516	832	1021	1058	1058	897
0,75	443	773	971	1043	1054	857
1,00	429	721	928	1023	1946	829
1,25	409	681	889	1000	1031	802
1,50	393	647	855	976	1013	777
1,75	380	619	823	951	993	753
2,00	368	594	795	926	970	731
2,25	357	573	768	901	947	709
2,50	347	553	744	876	923	689
2,75	339	535	721	853	900	669
3,00	330	519	700	829	876	651
3,25	323	504	679	807	853	633
3,50	316	489	660	785	831	616
3,75	309	476	642	764	809	600
4,00	303	467	624	744	788	585
4,25	297	452	608	725	768	570
4,50	291	441	592	706	748	556
4,75	285	430	577	688	729	542
5,00	280	420	562	671	711	529
5,25	275	410	549	654	694	516
5,50	271	401	535	638	676	504
5,75	266	392	522	622	660	493
6,00	262	384	510	607	644	481
6,50	254	368	487	579	614	460
7,00	247	353	465	552	586	441
7,50	240	340	445	528	559	422
8,00	234	327	427	505	534	406
9,00	223	305	393	463	490	375
10,00	214	286	365	427	451	349

В силу симметричности распределения температур относительно оси коксового «пирога», распределение температур приводится для расстояния от боковой поверхности до оси, отсчет координат начинается от поверхности коксового «пирога».

При анализе результатов за наиболее точный расчет принималось численное решение.

Формула (5) дает чрезвычайно неточные результаты, в том числе при различных вариантах итерационного расчета. Эта формула не может быть использована для расчета рассматриваемого технологического процесса.

Формула (3) дает достаточно точные результаты, но при этом не требует разработки специального математического описания, как численное решение. Вычисление интеграла легко можно осуществить с помощью встроенных функций в прикладных программных математических пакетах, например, в пакете MathCad.

Как видно из полученных результатов, интенсивность контактного охлаждения значительно меньше конвективного. После первых трех часов скорость уменьшения температуры значительно снижается.

Можно сделать вывод, что для конструкции [2] коэффициент теплоотдачи достаточен для охлаждения всего объема кокса за время пребывания коксового «пирога» в камере тушения.

Для уменьшения общего времени охлаждения кокса можно рекомендовать двухстадийное тушение: сначала медленное контактное охлаждение, потом быстрое за счет орошения водой.

Представляет также интерес определить как изменение ширины «пирога» влияет на распределение температур и, следовательно, на необходимое время тушения. Для этого нами был проведен численный расчет охлаждения коксового «пирога» средней шириной 600 мм (табл. 3). Все остальные исходные параметры остались теми же, что и при расчете охлаждения «пирога» средней шириной 410 мм.

Таблица 3. Распределение температур по ширине коксового «пирога» при охлаждении, численное решение (средняя ширина «пирога» 600 мм)

Время от начала охлаждения, ч	Расстояние от боковой поверхности, м						Средняя температура, °С
	0,00	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	
	Температура, °С						
0,00	1090	1082	1074	1066	1058	1050	1076
0,25	505	1010	1072	1066	1059	1060	937
0,50	434	911	1054	1065	1061	1062	894
0,75	395	838	1024	1061	1062	1063	861
1,00	372	783	991	1052	1062	1064	834
1,25	356	740	960	1040	1060	1064	811
1,50	344	705	931	1026	1056	1063	790
1,75	335	676	904	1011	1051	1061	772
2,00	327	652	880	996	1044	1057	755
2,25	320	632	858	981	1036	1052	740
2,50	314	613	838	966	1027	1046	725
2,75	309	597	820	952	1017	1038	712
3,00	305	583	803	938	1007	1030	700
3,25	301	570	787	924	997	1021	688
3,50	297	558	772	911	986	1011	677
3,75	293	548	759	898	975	1001	667
4,00	290	538	746	885	964	991	657
4,25	287	529	733	873	953	980	647
4,50	284	520	722	861	942	969	638
4,75	282	512	711	850	931	958	630
5,00	279	505	700	838	919	948	621
5,25	277	497	690	827	909	937	613
5,50	275	491	681	817	898	926	605
5,75	273	484	671	806	887	915	598
6,00	271	478	663	796	876	905	591
6,50	267	467	645	776	856	884	577
7,00	263	456	630	758	836	863	564
7,50	260	447	615	740	816	843	551
8,00	257	438	601	723	798	824	539
9,00	251	421	575	691	762	787	517
10,00	246	406	551	661	729	753	497

Как видно, при увеличении ширины «пирога» в 1,46 раза средняя температура «пирога» после 10 ч охлаждения увеличивается непропорционально (в 1,2 раза). При этом температура в центре «пирога» значительно превышает температуру воспламенения кокса.

Литература

1. Гураль В. В. Производство металлургического кокса на базе трамбования шихты и сухого тушения — эффективная экологически чистая и энергосберегающая технология / Гураль В. В., Кривonos В. В., Рудыка В. И., Тарута А. А. // Кокс и химия, 2008. — № 8. — С. 23–31.

2. Патент на корисну модель 20907 Україна, МПК (2006) C10 B7/00. Коксова піч / Гребенюк О. Ф.; Збиковський Є. І.; Збиковський О. І.; Голубев А. В.; Коваленко Д. О. Заявники і власники – Гребенюк О. Ф.; Збиковський Є. І.; Збиковський О. І. Номер заявки – u200609539. Дата подачі заявки — 04. 09. 2006. Опубл. 15. 02. 2007, бюл. № 2.

3. Патент 2045565 RU, МПК (6-я редакция) C10 B39/02, C10 B39/12. Контейнер для сухого тушення кокса и способ сухого тушення кокса / Эдвард С. Кресс (US). Заявитель и собственник – Кресс Корпорейшн (US). Номер заявки — 5010001/05. Дата подачи заявки — 29. 03. 1990. Опубл. 10. 10. 1995.

4. Лыков А. В. Теория теплопроводности / Лыков А. В. — М.: Издательство «Высшая школа», 1967. — 599 с.

5. Исаченко В. П. Теплопередача / Исаченко В. П., Осипова В. А., Сухомел А. С. — М.: «Энергия». Изд. 2-е, 1969. — 440 с.

6. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии / 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).

7. Михеев М. А. Основы теплопередачи / Михеев М. А., Михеева И. М. — М.: Энергия, 1977. — 344 с.

8. Стахеев С. Г. Исследования в области разработки энерготехнологического агрегата для совмещенного процесса термической подготовки шихты и тушения кокса / Стахеев С. Г., Забежинский Л. Д., Ляхов Ю. Н. // Кокс и химия, 1992. — № 6. — С. 36–38.

9. Мильштейн М. Н. Определение теплофизических характеристик слоя кокса при охлаждении / Мильштейн М. Н., Стахеев С. Г., Забежинский Л. Д. // Кокс и химия, 1991 — № 4 — С. 13–15

10. Агроскин А. А. Теплофизика твердого топлива / Агроскин А. А., Глейбман В. Б. — М.: Недра, 1980. — 256 с.

О Збиковский Е.И., Голубев А.В., 2010

Поступила в редакцию 11.10.2009 г.

УДК 66.011:532.5

Языков Н.А., Топоров А.А., Рублева Л.И., Левандовский В.Ю. (ДонНТУ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РЕАКТОРЕ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ФЕНОЛОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ SolidWorks Flow Simulation

С помощью программного модуля SolidWorks Flow Simulation проведено моделирование процесса перемешивания в реакторе идеального смешения, который будет использоваться в технологии обесфеноливания. Разработана методика решения подобных задач и проведены соответствующие расчеты. Результаты показали несостоятельность первоначальной конструкции и необходимость её рационализации.

Ключевые слова: обесфеноливание сточных вод, параметры движения жидкости, траектории движения потоков.

Постановка задачи

В ДонНТУ разработана технологическая схема процесса обесфеноливания сточных вод химическим способом [1,2], которая заключается в их гетерогенной обработке аренсульфохлоридами с образованием нетоксичных товарных субстратов. Для интенсификации процесса необходимо максимально увеличить площадь контакта между водой и