ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 662.8.057

А.Р. Богомолов, Н.В. Тиунова, Е.Ю. Темникова

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ПРОЦЕСС ОХЛАЖДЕНИЯ КАМЕННОУГОЛЬНОГО ПОЛУКОКСА

Актуальность работы обусловлена необходимостью перехода с «мокрого» на «сухое» тушение каменноугольного полукокса с целью улучшения его качества.

Цель работы: обоснование способа охлаждения полукокса, улучшающего его качество, и разработка технического решения способа дополнительного «тушения», гарантирующего окончательное охлаждения до температуры окружающей среды.

Методы исследования: использование аналитического описания процесса нестационарной теплопроводности кускового материала для случая теплообмена с окружающей средой при охлаждении поверхности тела по закону Ньютона с заданной постоянной температурой, а также процесса нестационарной теплопроводности в неподвижном слое при условии, что температура окружающей среды определяется изменением ее в направлении потока среды конвекцией.

Полукоксование угля на некоторых заводах производится в вертикальных шахтных печах с внутренним обогревом. Каждая шахта печи разделена перегородкой, которая не доходит до верха печей на 2 м. Шахта печи имеет сверху вниз три зоны: подсушки, полукоксования, охлаждения полукокса. Печи по технологическому процессу представляют собой аппараты непрерывного действия с периодической загрузкой угля и выгрузкой полукокса. Полукоксование осуществляется за счет тепла газа-теплоносителя, поступающего в печь с температурой 550-750°С. Полукокс из нижней части печи выгружается через выгрузочные устройства, имеющие гидрозатвор (рис.1). Высота гидрозатвора составляет h = 200 мм, обусловленная давлением газа и влажностью полукокса, и поддерживается поплавковым регулятором. Из гидрозатвора полукокс толкателем выгружается через течку на ленточный транспортер. Тушение производится технической водой. После тушения полукокс имеет влажность, превышающую 20% даже при содержании летучих около 15% – это капиллярная влага и влага смачивания. Для оперативного контроля за качеством выпускаемой продукции, регулярно производят отбор полукокса для определения размера кусков, содержания влаги, летучих веществ, зольности и других показателей.

При таком способе выгрузки полукокса исключается возможность его самовозгорания даже такого размера кускового продукта в поперечнике, как 100 мм. Кроме того, этот способ выгрузки обеспечивает плотность внутренней полости шахтной печи с внешней средой и достаточно хорошо ограничивает выбросы в атмосферу. Однако, качество полукокса по таким показателям как структурная прочность (метод ВУХИН) снижена, а влажность его повышена. В процессе использования такого полукокса в различных тепловых процессах, где необходима гарантированная его прочность для прохождения выделяющихся газов через слой зернистого материала, например, в литейных цехах, производстве минеральной ваты, происходят внештатные технологические остановы. Остаточная значительная влажность полукокса снижает его реакционную способность, а в холодное время года при транспортировке в полувагонах, разрушает полукокс и, как следствие, снижает нижний предел фракции класса.

Для оценки качества полукокса и кокса у поставщика и потребителя в настоящее время выбраны и используются следующие пять основных показателей: зольность, влажность, гранулометрический состав, механическая прочность [1].

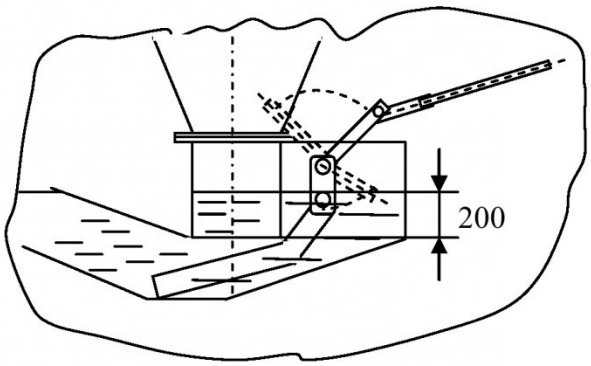

Рис. 1. Существующее выгрузочное устройство с гидрозатвором

Для повышения качества продукции некоторые заводы по производству полукокса переходят

на так называемое «сухое» тушение водяным паром с температурой 120°С или водой в пирамидальном бункере, расположенном в нижней части шахтной печи. Подвод воды или водяного пара может быть осуществлен через трубы с перфорацией в нижней части с углом раскрытия 60° при сквозном прохождении этими трубами поперечного сечения бункера в два яруса: два ввода расположены в нижней части и 3 ввода в верхней части бункера. Бункер представляет собой усеченную пирамиду, конусом направленным вниз. Верхняя часть пирамиды имеет размер 1800×1800 мм, нижняя – 600×400 мм, а высота – 2120 мм. Объем бункера V = 3,1 м^3. При плотности полукокса ρ = 1000 кг/м^2. и средней порозности ε = 0,4 его масса в бункере составляет 1,87 т. По существующей технологии, обеспечивающей проектную производительность, время охлаждения полукокса составляет около 17 мин.

При расчете количества теплоты, которую необходимо отвести от полукокса в процессе его охлаждения, важной характеристикой является его теплоемкость. Трудности экспериментального определения теплоемкости топлива, особенно в процессе нагрева, мешают получению достоверных значений. Обобщение большого числа опытных данных приводит к получению приемлемых для расчета зависимостей. В работе [2] представлено уравнение Л.И. Гладкова и А.Н. Лебедева для подсчета средней теплоемкости горючей массы угля и полукокса в зависимости от температуры t (°С) и выхода летучих веществ V_r (%):

$$c = \left[0,2 + 9\cdot 10^{-6}\left(13 + V_r\right)\left(130 + t\right)\right]\cdot 4,1868,$$

кДж/(кг·К). (1)

Уравнением можно пользоваться в интервале температур от 0 до 250°С. При температурах выше 250°С пользование уравнением (1) приводит к ошибочным результатам. В [2] приведено сравнение рассчитанных по уравнению (1) теплоемкостей полукокса с V_r = 14,6% с экспериментальными результатами Бачелера, Яворского и Горина при различных диапазонах температур. В табл. 1 представлены результаты сравнении.

Таблица 1. Теплоемкость полукокса, полученная опытным путем и рассчитанная по (1) [2]

Испытуемый материал	Температура, °С		Теплоемкость, кДж/(кг·К)	
	предел	средняя	эксперимент	расчет
Полукокс	25–250	162,5	1,130	1,110
	25–300	212,5	1,275	1,150
	25–400	237,3	1,340	1,171
	25–500	262,5	1,422	1,194

Из таблицы видно, что теплоемкость полукокса возрастает с повышением температуры.

В данной работе рассматриваем процесс охлаждения полукокса в диапазоне температур от t_1 = 300°С до t_2 = 120°С. При температуре 120 °С продукт не подвержен тлению и самовозгоранию на воздухе при атмосферных условиях. В связи с этим из табл. 1 принимаем среднюю теплоемкость полукокса в рассматриваемом интервале температур охлаждения c = 1,275 кДж/(кг·К).

Количество теплоты, отнимаемое от полукокса ($m_{\text{пк}}$ = 1 кг) вычислим по формуле:

$$Q_{\text{пк}} = c\left(t_1 - t_2\right) = 1,275\left(300 - 120\right) = 229,5$$

кДж/кг.

Рассмотрим два варианта «тушения» полукокса: водяным паром и водой, подаваемыми с температурой 120°С и 20°С, соответственно. Расчет необходимого количества охлаждающего теплоносителя выполним на 1 кг полукокса.

Для первого варианта «тушения» водяным паром примем из [3] энтальпию водяного пара атмосферного давления при 120°С i_{120} = 2716,8 кДж/кг. Как показывает практика, температура пара при охлаждении полукокса может достичь 250°С, тогда его энтальпия, также при атмосферном давлении, i_{250} = 2974,2 кДж/кг.

Для «тушения» 1 кг полукокса необходимо водяного пара:

$$m_{w1} = Q_{\text{пк}} / \left(i_{250} - i_{120}\right) = 229,5 / \left(2974,2 - 2716,8\right)$$

=0,89 кг *пара*/кг *полукокса*.

Для второго варианта «тушения» водой примем из [3] энтальпию воды при 20°С i_{20} = 83,86 кДж/кг, а энтальпию водяного пара при температуре 150°С атмосферного давления i_{150} = 2776,4 кДж/кг, выходящего из верхней части бункера в зону газификации (полукоксования).

Для «тушения» 1 кг полукокса необходимо воды:

$$m_{w1} = Q_{\text{пк}} / \left(i_{150} - i_{20}\right) = 229,5 / \left(2776,4 - 83,86\right)$$

=0,085 кг *воды*/кг *полукокса*.

Из приведенных расчетов видно, что экономически выгоднее вторая схема «тушения» полукокса – водой, так как массовый расход воды на охлаждение 1 кг полукокса на порядок меньше, чем массовый расход водяного пара.

Полукокс, получаемый в шахтных печах, имеет среднестатистический фракционный состав, представленный в табл. 2.

Таблица 2. Фракционный состав полукокса

Средний размер кусков, мм	Содержание, % (масс)
10	17
25	53
40	20
100	10

Из табл. 2 видно, что более 50% по массе по-

лукокс имеет размер в поперечнике 25 мм, близкий к сферической форме. Почти половину в сумме составляют куски полукокса среднего размера 10 и 40 мм. Незначительное количество кусков полукокса имеют размер 100 мм.

Процесс охлаждения полукокса в бункере водяным паром при подаче воды через подводящие установленные в бункере перфорированные трубы является нестационарным и перенос теплоты происходит за счет теплопроводности при отсутствии внутренних источников теплоты. Задача охлаждения одиночных тел, помещенных в среду с заданным тепловым состоянием, достаточно подробно рассмотрена в [4]. Теплообмен в неподвижном слое кусковых материалов с принятыми допущениями, которые в ряде случаев хорошо согласуются с опытом, описан в [5]. В [6] А.В. Лыков рассмотрел задачу теплообмена поверхности тел с окружающей средой с постоянными параметрами по закону Ньютона (тепловой поток от газа к частицам в любой точке поверхности или слоя пропорционален разности температур между газом и поверхностью частиц), а также случай, когда температура среды – линейная функция времени.

А. Рассмотрим охлаждение одиночного сферического куска полукокса (для рассматриваемого случая примем, что кусок полукокса имеет сферическую форму) в среде водяного пара с постоянной температурой $t_ж$ = 100°С. Эта температура принята из соображения, что давление в шахтной печи соответствует атмосферному давлению. Отметим, что давление в печи всего на 1,5 кПа превышает атмосферное давление. Физическая модель процесса охлаждения показана на рис. 2.

Охлаждение полукокса происходит с постоянным коэффициентом теплоотдачи α на его поверхности [4]. В начальный момент времени при τ = 0 все точки сферы полукокса с радиусом r_0 имеют одинаковую температуру t_0 = 300°С. Принятая температура выбрана из соображений ее соответствия промышленным условиям полукоксования в шахтных печах в зоне охлаждения полукокса. При заданных условиях, температура для любой точки сферы полукокса будет функцией только времени и радиуса, т.е. $t = t(r, \tau)$.

При избыточной температуре $\vartheta = t - t_ж$ для любой точки полукокса дифференциальное уравнение теплопроводности сферы полукокса запишется как

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial \vartheta}{\partial r}\right). \qquad (2)$$

Избыточная температура является функцией только времени и радиуса, т.е. $\vartheta = \vartheta(r, \tau)$ На поверхности сферы полукокса при $r = r_0$ теплообмен происходит с граничными условиями третьего рода

$$\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial r}\right)_{r=r_0} = -\frac{\alpha}{\lambda}\vartheta_{r=r_0}.$$

Из условий симметрии задачи в центре шара при τ = 0 градиент температуры равен $\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial r}\right)_{r=0} = 0$. Начальные условия, при τ = 0, запишутся в виде: $\vartheta = \vartheta_0 = t_0 - t_ж$ для $0 \le r \le r_0$.

Здесь $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ и λ – коэффициент температуропроводности и теплопроводности полукокса, соответственно. Коэффициент теплопроводности полукокса мало зависит от температуры, поэтому в диапазоне температур 100÷300 °С примем λ = 0,49 Вт/(м·К).

В результате решения дифференциального уравнения теплопроводности (2) методом разделения переменных и подчинения его принятым условиям однозначности, получают [4]:

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(\sin\mu_n - \mu_n \cos\mu_n)\sin(\mu_n R)}{(\mu_n - \sin\mu_n \cos\mu_n)\mu_n R} \exp(-\mu_n^2 \mathrm{Fo}), \qquad (3)$$

где $\theta = \vartheta/\vartheta_0 = (t - t_ж)/(t_0 - t_ж)$; $R = r/r_0$.

Величина μ в уравнении (3) является корнем характеристического уравнения, которая для сферического тела имеет вид:

$$\mathrm{tg}\mu = -\frac{\mu}{\mathrm{Bi} - 1}.$$

Здесь $\mathrm{Bi} = \frac{\alpha r_0}{\lambda}$ – критерий Био, отвечающий за соотношение внешних и внутренних термических сопротивлений; $\mathrm{Fo} = \frac{a\tau}{r^2}$ – критерий Фурье, характеризующий темп изменения температуры в окружающей среде и внутри тела, в нашем случае, внутри сферы полукокса. Отметим, что в рассматриваемом случае температура окружающей среды принята постоянной.

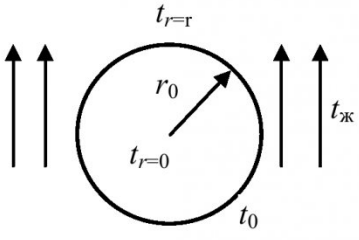

Рис. 2. Модель одиночной шарообразной частицы полукокса: $t_{r=0}$ – температура в центре куска после охлаждения; $t_{r=r}$ – температура на поверхности куска после охлаждения; $t_ж$ – температура водяного пара; t_0 – температура точек шара в начальный момент времени; r_0 – радиус куска полукокса

Последнее уравнение является трансцендентным, имеет бесчисленное множество корней при заданном значении Bi. Значения первых четырех корней этого уравнения для различных Bi приведены в [6].

Анализ уравнения (3) показывает, что при значениях Fo ≥ 0,25 ряд становится быстросходящимся и для нахождения температурного поля внутри сферы полукокса можно ограничиться первым членом ряда.

При определении чисел Био для различных размеров полукокса необходимо рассчитать коэффициент теплоотдачи от окружающей среды к поверхности сферы полукокса. Согласно физической модели охлаждения (рис. 2) определим скорость движения водяного пара с температурой 100°С из следующих соображений. Расход подаваемого пара на охлаждение полукокса от 300 до 120°С при производительности одной секции шахтной печи полукоксования 20 т/сутки примерно равен 0,022 кг/с. При расчете расхода пара учитывались нагрев воды от 20 до 100°С и ее теплота парообразования при атмосферном давлении. Удельный объем пара при 100°С равен 1,6738 $м^3$/кг, тогда объемный расход водяного пара равен 0,036 $м^3$/с. Для расчета скорости обтекания сферических кусков полукокса примем расчетную скорость пара на площадь среднего сечения пирамидального бункера, которая составляет 1,24 $м^2$. При порозности полукокса в бункере ε = 0,4 скорость водяного пара в свободном сечении составит ω = 0,075 м/с.

Расчет коэффициента теплоотдачи при стационарном обтекании сферических частиц выражается эмпирической формулой [7]

$$\mathrm{Nu} = 2 + 0,03\,\mathrm{Pr}^{0,33}\,\mathrm{Re}^{0,54} + 0,35\,\mathrm{Pr}^{0,356}\,\mathrm{Re}^{0,58}, \quad (4)$$

где физические свойства среды отнесены к средней температуре потока.

Температуры поверхности и температуры в центре средних размеров кусков полукокса в процессе охлаждения рассчитывали по истечении времени 17 мин (1020 с) по характерным вычисленным значениям чисел критериев Био и Фурье. Время охлаждения принято из условий работы промышленных установок.

Температурное поле, определяемое выражением для центра сферы $\theta_{R=0} = f_0(\mathrm{Bi},\ \mathrm{Fo})$ и для поверхности сферической частицы $\theta_{R=1} = f_1(\mathrm{Bi},\ \mathrm{Fo})$, при различных значениях Bi и Fo, представлено функциями в [4]. Рассчитанные значения параметров процесса, функций и температур представлены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, по истечении 17 мин процесса охлаждения полукокса в бункере температура поверхности сферических кусков полукокса удовлетворяет условию достижимого и необходимого охлаждения до температуры t_2 = 120°С. Температура в центре кусков полукокса остается достаточно высокая, около 200°С для среднего размера частиц. Отметим, что расчетная температура поверхности куска полукокса размером 100 мм имеет 120°С, что ниже на 4°С куска размером 40 мм, хотя должна быть выше 124°С. Это объясняется тем, что в расчете мы ограничились только первым членом ряда уравнения (3), что соответствует условию $\mathrm{Fo} \geq 0,25$. В нашем случае для куска полукокса 100 мм $\mathrm{Fo} = 0,14$. В этом случае следовало необходимо привлечь два члена ряда уравнения (3).

При выгрузке полукокса, имеющего такие температуры внутри тела, особенно кусков размером 100 мм, происходит интенсивное окисление на воздухе, его тление и горение. При горении полукокса происходит увеличение его температуры, негативно влияющее на ленточную транспортерную ленту, на которой образуются очаговые «прожоги». Срок службы транспортерных лент, работающих в таких условиях, сокращается в 3-4 раза. Необходимо разрабатывать технические решения, позволяющие исключать окисление полукокса, выгруженного после «сухого» тушения. Кроме того, технические приемы должны обеспе-

Таблица 3

d, диаметр куска полукокса, м	α, коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К)	Bi	Fo	$\theta_{R=0}$ безразмерная температура в центре	$t_{r=0}$, °С	$\theta_{R=1}$, безразмерная температура на поверхности	$t_{r=r_0}$, °С
0,010	12,30	0,126	14,28	–	–	0,09	118
0,025	6,99	0,178	2,28	0,35	170	0,1	120
0,040	5,35	0,218	0,89	0,52	204	0,12	124
0,100	3,29	0,336	0,14	0,9	280	0,1	120

чить дальнейшее охлаждение полукокса до средней температуры по массе или объему не выше 120°С с целью исключения окисления полукокса и сохранения технических характеристик транспортерной ленты.

Б. При рассмотрении охлаждения кускового полукокса в слое, а не одиночной сферы, исходят из допущений, которые в ряде случаев хорошо согласуются с опытом [5, 8]: 1) слой полукокса однороден по фракционному составу; 2) тепловой поток от кусков полукокса к водяному пару определяется законом Ньютона; 3) коэффициент теплоотдачи от водяного пара к частицам полукокса одинаков не только для всех точек поверхности частиц, но также по всей высоте и сечению слоя полукокса; 4) теплофизические свойства частиц слоя полукокса и пара не зависят от температуры, они принимаются средними; 5) передача теплоты в паре и в слое от частицы к частице путем теплопроводности отсутствует; 6) изменения объема водяного пара и слоя, связанные с изменением температуры, невелики, что позволяет пренебречь ими; 7) поток пара равномерно распределен по поперечному сечению слоя и расход его во времени постоянен; 8) стенки бункера, где размещается слой полукокса, непроницаемы для пара и теплоизолированы.

Такие допущения позволяют описать тепло-

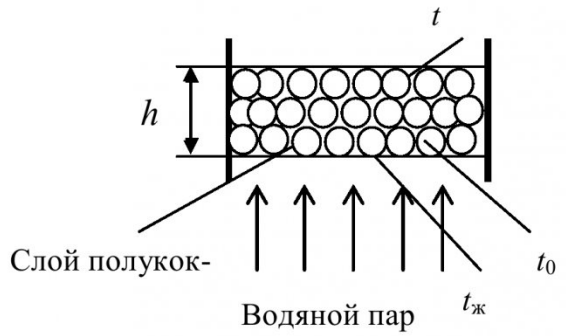

Рис. 3. Теплообмен в неподвижном слое

обмен в слое полукокса относительно простыми аналитическими зависимостями. Физическая модель теплообмена в слое показана на рис. 3.

Решая задачу по слою для кусков полукокса d = 40 мм, высота слоя h = 200 мм, определили изменение температуры по слою через каждые 5 см в течение 17 мин, данные расчета представлены в табл. 4.

В [5, 8] представлены графики результатов решения системы уравнений: изменения энтальпии газа (пара) и количества теплоты, которую газ (пар) получает за счет охлаждения насадки слоя (в нашем случае за счет охлаждения полукокса). Эта система уравнений дополнена граничными и начальными условиями. Графики построены в координатах $\theta = \dfrac{t_0 - t}{t_0 - t_ж}$ от Z. При расчете теплообмена для неподвижного плотного слоя наибольшее распространение получили формулы В.Н. Тимофеева [8]:

$$\mathrm{Nu} = 0{,}106\,\mathrm{Re} \text{ при } \mathrm{Re} < 200;$$

$$\mathrm{Nu} = 0{,}106\,\mathrm{Re}^{0{,}67} \text{ при } \mathrm{Re} > 200,$$

где $\mathrm{Nu} = \alpha d/\lambda$; $\mathrm{Re} = \omega d/\nu$.

По этим зависимостям в соответствие режима течения газа (пара) в свободном сечении рассчитывали коэффициент теплоотдачи, отнесенный к 1 м^2 поверхности. Величиной, определяющей интенсивность теплообмена в слое, является объемный коэффициент теплоотдачи, который рассчитывали по формуле:

$$\alpha_V \cdot 1 = \frac{\alpha\Phi(1-\varepsilon)}{d},$$

где Ф – коэффициент формы насадки, равный 6,0 для частиц сферической формы.

Переменная Z вычислялась по формуле

$$Z = \frac{\alpha_V \tau}{c\rho(1-\varepsilon)}.$$

Таблица 4. Расчетная средняя температура по массе по высоте слоя от времени (d = 40 мм)

h, см	Время охлаждения, мин				
	0	4	8	12	17
	Средняя температура по массе, °С				
0	300	260	230	204	170
5	300	260	232	218	180
10	300	262	250	230	202
15	300	264	258	232	218
20	300	280	270	250	222

Из табл. 4 видно, что средняя температура по массе для куска полукокса размером 40 мм достаточно высокая, чтобы не происходило окисление на воздухе после выгрузке из бункера. Модель охлаждения одиночной сферы значительно занижает результаты расчета по температурному полю в теле. В практических расчетах промышленных установок охлаждения следует использовать модель теплообмена в слое.

В заключении необходимо отметить, что более приемлемым способом охлаждения полукокса может быть подачей воды, а не водяного пара, так как воды расходуется на порядок меньше.

Анализ расчетов показывает, что, не снижая производительности шахтных печей полукоксования, температура даже для куска полукокса размером 40 мм достаточно высока и на воздухе может происходить его тление и горение. Техническим решением может быть устройство промежуточного бункера, в который ленточным конвейером будет загружаться предварительно охлажденный полукокс в зоне охлаждения шахтной печи. В промежуточном бункере не будет достаточного доступа воздуха для тления и самовозгорания.

Другим техническим решением может быть

создание устройства рециркуляции технологического газа для пассивации реакционноспособного полукокса, как в [9], имеющему низкую влажность (до 8%). Вместо технологического газа обработка сухого реакционноспособного полукокса может быть осуществлена инертной смесью, чтобы способствовать процессу хемосорбции, который препятствует полукоксу адсорбировать дополнительные количества кислорода, достаточные для самовозгорания, когда полукокс находится на складе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сухоруков, В. И.* Научные основы совершенствования техники и технологии производства кокса / В. И. Сухоруков. – Екатеринбург: Редакция «АЛЛО», 1999. – 393 с.

2. *Агроскин, А. А.* Теплоемкость углей / А. А. Агроскин, Е. И. Гончаров // Кокс и химия. – 1965, № 7. – С. 8–13.

3. *Ривкин, С. Л.* Теплофизические свойства воды и водяного пара / С. Л. Ривкин, А. А. Александров. – М.: Энергия, 1980. – 424 с.

4. *Исаченко, В. П.* Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.

5. *Телегин, А. С.* Тепломассоперенос / А. С. Телегин, В. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко. М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 455 с.

6. *Лыков, А. В.* Теплопроводность нестационарных процессов / А. В. Лыков. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1948. – 232 с.

7. *Кутателадзе, С. С.* Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – М.-Л.: Гос-ное науч.-техн. изд-во машиностр. лит-ры, 1962. – 456 с.

8. Промышленные тепломассообменные процессы и установки / А. М. Бакластов, В. А. Горбенко, О. Л. Данилов [и др.. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 328 с.

9. Пат. №: 2098449 Российская Федерация, МПК^{6} C10B49/04, C10L9/06. Непрерывный способ обработки угля с получением стабильного полукокса / Франклин Джордж Ринкер [US], Дин Авент Хорн [US], Деннис Уэйн Кулидж [US], Эрнст Питер Эштергар [US]; Патентообладатель Компания Тек-Кол (US). – 96105953/04; Заявл. 27.03.1996; опубл. 10.12.1997, Бюл. № 6. – 14 с. : ил. 4.

Авторы статьи:

Богомолов
Александр Романович,
докт.техн.наук, профессор, зав.каф. теплоэнергетики КузГТУ,
с.н.с. института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН.
Email: barom@kuzstu.ru
т. 39-63-32

Тиунова
Наталья Владимировна,
старший преподаватель каф. энергосберегающих процессов в химической и нефтегазовой технологиях КузГТУ, старший преподаватель каф. металлургия черных металлов ЮТИ ТПУ.
Email: tascha.05@mail.ru

Темникова
Елена Юрьевна,
доцент каф. теплоэнергетики КузГТУ.
Email: teu.pmahp@kuzstu.ru