

А.Б. Бирюков /д.т.н./, П.А. Гнигиёв /к.т.н./, П.С. Приймачов.
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПРОКАЛКИ АНТРАЦИТА ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

Проведен анализ существующих математических моделей и методик расчета прокали углеродистых материалов во вращающейся печи. Отмечено, что существующие математические модели, описывающие процесс с достаточной точностью, нерационально применять на практике ввиду наукоёмкости и сложности в реализации. Предложена методика расчета прокали антрацита во вращающейся печи, включающая расчет материального и теплового баланса печи, с определением требуемого для реализации технологии количества топлива и воздуха. Разработанная методика позволит рассчитать материальный баланс процесса прокали антрацита, а также определить ориентировочные значения расходов топлива и воздуха для реализации технологии. В дальнейшем методика может быть усовершенствована с целью повышения точности расчетов.

Ключевые слова: антрацит, вращающаяся печь, прокаливание, расчет, углеродные материалы.

Постановка проблемы

Антрациты представляют собой ценное сырьё для производства востребованных материалов различного назначения. В настоящее время антрацит, помимо использования в энергетике, находит применение в металлургии, а также является сырьём для производства ряда углеграфитовых изделий. Широкий разброс свойств антрацитов приводит к тому, что не все они могут быть использованы при производстве углеграфитовых изделий: основные препятствия – наличие золы и серы в составе сырого материала. В связи с этим развиваются технологии подготовки антрацитов и улучшения их свойств. Основными процессами при этом являются сортировка, обогащение, термообработка при различных режимах на специальных технологических установках [1,2]. Наибольшее распространение при прокаливании не только антрацита, но и других сыпучих материалов, получили вращающиеся печи [3]. С целью недопущения отставания от мирового уровня и замещения отечественной продукции в области переработки углей необходимо проведение обширных исследований.

Анализ последних исследований и публикаций

Ряд методик основан на зональном методе расчета лучистого теплообмена. В каждой из работ [4...9] описана математическая модель, по которой составляются системы нелинейных уравнений для решения с помощью ЭВМ. Методика параметрической идентификации математической модели процесса будет заключаться в том, что по известной части начальных условий и известной части параметров модели, варьируя неизвестные

параметры и неизвестные начальные условия, следует добиваться того, чтобы заданный критерий идентификации принял минимальное из возможных значений. При этом вычисления ведутся по следующему алгоритму [4]:

1. Расчет значений угловых коэффициентов излучения для всех зон системы теплообмена.
2. Расчет обобщенных коэффициентов излучения; расчет горения топлива, летучих веществ и материала с определением коэффициентов поглощения всех газовых зон.
3. Расчет разрешающих угловых коэффициентов и коэффициентов радиационного теплообмена.
4. Расчет коэффициентов конвективного теплообмена.
5. Составление и расчет системы нелинейных зональных уравнений теплового баланса с получением уточненного распределения зональных температур.
6. Проверка сходимости значений, при необходимости – проведение итерационных приближений.
7. Расчет качества прокаленного материала.

Как утверждается в работах [4...9], проверка адекватности и выполненная идентификация математических моделей показали, что модели достаточно точно соответствуют реальному процессу прокаливания углеродных материалов во вращающейся печи – отклонения значений расчетных параметров от реальных значений не превышают 5%.

Таким образом, данные методики позволяют проводить расчет прокали антрацита во вращающейся печи с высокой точностью, но

научности, требуют наличия вычислительных мощностей и навыков программирования у инженеров, а также значительного времени на реализацию. Другим решением может быть привлечение стороннего исполнителя для программной реализации модели, что влечет дополнительные затраты.

В работе [10] авторами во главе с Танатаровым М.А. предложена методика расчета прокаливания нефтяного кокса, которая может быть применена к прокаливанию антрацита. Согласно методике, печь делится на 6 зон: подогрева до 100 °С, сушки при 100 °С, подогрева до 500 °С, выделения летучих при 500-850 °С, прокалики от 850 °С до заданной температуры, топочная. В методике принят ряд допущений:

- унос пыли составляет 6-15% от массы материала;
- температура отходящих газов 750-850 °С, температура кокса на 50-150 °С ниже температуры прокалики;
- истинный выход летучих веществ в 1,3 раза больше условного (полученного в результате испытаний);
- потери в окружающую среду – 36-40 МДж/ч на 1 м² наружной поверхности печи;
- коксовая пыль сгорает в топочной зоне и зоне прокалики;
- тепловой эффект образования летучих – 2200 кДж/кг;
- время пребывания материала в печи 75-90 мин;
- производительность единицы реакционного объема печи 45-65 кг/м³ ч.
- нагреваемый слой материала принимается за пластину неограниченных размеров.

Расчет состоит из следующих частей:

1. Кинетический расчет, в ходе которого определяется требуемая температура нагрева и ориентировочные параметры печи. Ориентировочные длина и диаметр барабана приводятся в соответствие с ГОСТ 11895, по выбранному диаметру и длине уточняются остальные параметры.

2. Расчет общего теплового баланса печи и отдельных зон, в ходе которого определяется расход топлива и воздуха, количество и скорость дымовых газов, тепловой баланс печи в целом и тепловой баланс отдельных зон печи. Расчет ведется итерационным путем и завершается, когда разница между принятым и расчетным значением линейной скорости дымовых газов не больше 5%.

3. Расчет передачи тепла внутри нагреваемого слоя, в ходе которого определяется продолжительность нагрева материала в каждой зоне.

4. Расчет передачи тепла от дымовых газов к слою кокса, в ходе которого определяется

количество тепла, передаваемое коксу в каждой из зон. Рассчитанное количество тепла должно быть равно количеству тепла из теплового баланса; при отклонении более чем на 10% необходимо изменить длину зон, так чтобы сумма длин зон оставалась равна общей длине печи.

В целом, данная методика позволяет выполнить расчет вращающейся печи, но многие из представленных зависимостей являются эмпирическими, для расчета прокалики нефтяного кокса. Следовательно, для расчета прокалики антрацита данная методика может нуждаться в ряде правок.

Цель (задачи) исследования

Цель работы заключается в разработке методики расчета процесса прокалики антрацита, обеспечивающей возможность определения необходимого расхода топлива и воздуха, количества и состава дымовых газов для произвольного набора исходных данных.

Основной материал исследования

С целью разработки оптимальной методики расчета прокалики антрацита во вращающейся печи авторами был проведен анализ материального и теплового баланса процесса. В результате были получены формулы, на основании которых составлена методика, позволяющая при заданной производительности печи, характеристикам сырья и готового материала определить требуемый расход топлива и воздуха для реализации технологии.

В методике принят ряд допущений:

- сжигание топлива и разбавление до требуемой температуры производится в топке предварительного сжигания с КПД 85%;
- летучие содержат 30% метана, остальное – балласт;
- тепловой эффект образования летучих – 2200 кДж/кг;
- теплоемкости воздуха и продуктов сгорания принимаются средние для исследуемого диапазона температур;
- наружная температура кожуха печи принимается в диапазоне 80-220 °С, считая, что при изменении температуры внутренней поверхности печи на 100 °С температура кожуха изменяется соответственно на 10 °С [11];
- температура отходящих газов 300-400 °С;
- температура материала на выходе из печи на 50-100 °С ниже температуры прокалики;
- летучие сгорают полностью, при угаре материал окисляется до CO₂;
- подсосы в системе отсутствуют.

Температура прокалики принимается на основании лабораторных испытаний сырьевого

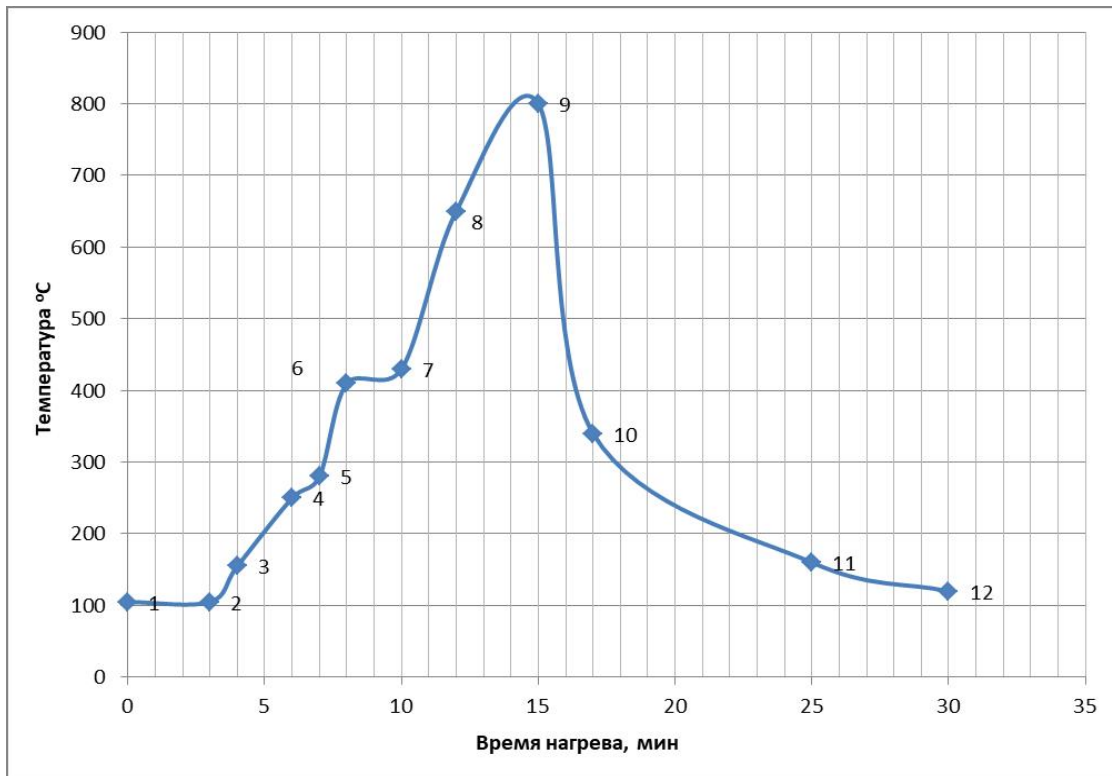


Рис. 1. Термограмма термической обработки антрацита

материала. В Донецком национальном техническом университете были проведены лабораторные испытания термической обработки антрацита. Образцы одновременно нагревались в муфельной печи, из которой вынимались по одному, через равные промежутки времени. Образцы, после измерения температуры, охлаждались, и направлялись в лабораторию для технического анализа. Термограмма, построенная для образца, нагретого до 800 °С, представлена на рисунке 1.

Участок 1-2 обусловлен удалением адсорбционной (внешней) влаги (105 °С). Участок 2-3-4-5 (диапазон температур от 105 °С до 300 °С) характеризуется отгонкой внутренней влаги (гигроскопической, молекулярной) и сопровождается раскрытием капиллярных пор. На участке 6-7 (410 °С) происходит удаление некоторых сорбционных газов – O₂; N₂; CO₂ и выход легколетучих органических компонентов. Физические изменения структуры антрацита с образованием микро- и макропор в результате возгонки летучих и серы происходят на участке кривой в точках 5-6-7-8. Участок 8-9 (650 °С – 800 °С) обусловлен выделением водорода, изменением пористости поверхности, объемным расширением и изменением кристаллической решетки. Резкий подъем в точке 8 связан с реакциями, затрагивающими изменения ядерных частей ароматических структур органической части с интенсивным выделением органических компонентов, размягчения и спекания угольных смол. Наблюдается изменение

электрических свойств (увеличивается электропроводность и снижается удельное электрическое сопротивление). Наблюдается петрографическое разрушение части объема обжигаемого материала за счет увеличения трещиноватости и повышение механической и термической прочностей оставшейся части материала. Участок 9-10 характеризуется снижением газовыделения, сужением капиллярных пор и улучшением теплоотдачи. Участок 10-11-12 характеризуется выравниванием кривой и остыванием [12].

Данная термограмма свидетельствует о характере высокометаморфизованного антрацита. Удельное электрическое сопротивление после термической обработки достигает значения 1250 Ом·мм²/м, содержание углерода – 94-96%. Основываясь на результатах проведенных исследований, а также на работе [13], проведенной авторами во главе с Безуглым В.А., можно предположить, что температура прокалики 800-1000 °С достаточна для получения термоантрацита с показателями качества соответствующими ГОСТ 4794.

Количество испаренной из материала влаги, удаленных летучих, угара, безвозвратно унесенной пыли и количество готового и исходного продукта связаны уравнением материального баланса прокалики:

$$G_1 = G_2 + G_{вл} + G_{лет} + G_{уг} + G_n, \quad (1)$$

где G_1 – количество материала, поступающего в печь, кг/ч; G_2 – количество материала, выходящего из печи, кг/ч; $G_{вл}$ – количество испаренной влаги, кг/ч; $G_{лет}$ – количество удаленных летучих, кг/ч; $G_{уг}$ – количество угоревшего материала, кг/ч; G_n – потери материала в виде унесенной пыли, кг/ч.

Количество материала, выходящего из печи:

$$G_2 = G_1 \frac{100 - \omega_1^r - V^r - K_{уг} - K_n}{100 - \omega_2^r}, \text{ кг/ч,} \quad (2)$$

где ω_1^r – начальная влажность материала на рабочую массу, %; ω_2^r – конечная влажность материала на рабочую массу, %; V^r – выход летучих веществ на рабочую массу, %; $K_{уг}$ – степень угара материала, %; K_n – степень безвозвратного пылеуноса материала, %.

Начальная влажность материала и выход летучих веществ определяются путем технического анализа сырьевого материала, конечная влажность принимается в пределах 1-2 %, степень угара и безвозвратного пылеуноса принимаются по производственным данным.

Количество испаренной в печи влаги:

$$G_{вл} = \frac{G_1 \omega_1^r - G_2 \omega_2^r}{100}, \text{ кг/ч.} \quad (3)$$

Количество летучих, удаленных в процессе прокалики антрацита:

$$G_{лет} = G_1 \frac{V^r}{100}, \text{ кг/ч.} \quad (4)$$

Так как показатели качества топлива обычно определяются не на рабочую массу, необходимо произвести пересчет, согласно ГОСТ 27313.

Количество угара:

$$G_{уг} = G_1 \frac{K_{уг}}{100}, \text{ кг/ч.} \quad (5)$$

Количество унесенной пыли:

$$G_n = G_1 \frac{K_n}{100}, \text{ кг/ч.} \quad (6)$$

Уравнение теплового баланса в общем виде:

$$\sum Q_{прих} = \sum Q_{расх}, \quad (7)$$

где $\sum Q_{прих}$ – количество тепла, поступившего в печь, кДж/ч; $\sum Q_{расх}$ – количество расходуемого в печи тепла, кДж/ч.

Количество тепла, поступившего в печь, включает в себя:

- физическая теплота воздуха:

$$Q_a = G_a \cdot t_a \cdot c_a, \text{ кДж/ч,} \quad (8)$$

где G_a – расход воздуха, кг/ч; t_a – температура приходящего воздуха, °С; c_a – средняя теплоемкость воздуха, кДж/(м³·К).

- физическая теплота загружаемого материала:

$$Q_{м1} = G_1 \cdot t_m \cdot c_m, \text{ кДж/ч,} \quad (9)$$

где t_m – температура загружаемого материала, °С; c_m – теплоемкость материала, кДж/(кг·К).

- физическая и химическая теплота топлива:

$$Q_m = Q_m^{\phi} + Q_m^x = B \cdot (t_m \cdot c_m + (Q_n^p)_m \cdot \eta), \text{ кДж/ч,} \quad (10)$$

где B – расход топлива, кг/ч; t_m – температура топлива, °С; c_m – теплоемкость топлива, кДж/(кг·К); $(Q_n^p)_m$ – удельная теплота сгорания топлива, кДж/кг; η – интегральный коэффициент полезного действия топки предварительного сжигания, участка смешения и подачи теплоносителя;

- химическая теплота угара материала:

$$Q_{уг} = (Q_n^p)_{уг} \cdot G_{уг}, \text{ кДж/ч,} \quad (11)$$

где $(Q_n^p)_{уг}$ – удельная теплота угара материала, кДж/кг.

- химическая теплота выделяющихся летучих веществ:

$$Q_{лет} = (Q_n^p)_{лет} \cdot G_{лет}, \text{ кДж/ч,} \quad (12)$$

где $(Q_n^p)_{лет}$ – удельная теплота сгорания летучих веществ, кДж/кг.

Количество расходуемого в печи тепла включает в себя:

- физическая теплота выгружаемого материала:

$$Q_{м2} = G_2 \cdot t_k \cdot c_m, \text{ кДж/ч,} \quad (13)$$

где t_k – температура выгружаемого материала, °С.

- теплота, расходуемая на образование летучих веществ:

$$\Delta Q_{лет} = H_{лет} \cdot G_{лет}, \text{ кДж/ч,} \quad (14)$$

где $H_{лет}$ – удельная теплота образования летучих, кДж/кг.

• теплота, расходуемая на испарение влаги из материала:

$$Q_{вл} = H_{вл} \cdot G_{вл}, \text{ кДж/ч}, \quad (15)$$

где $H_{вл}$ – удельная теплота образования влаги, кДж/кг.

• потери теплоты через футеровку:

$$Q_5 = \pi \cdot k_l \cdot L_{\bar{\sigma}}(t_{ноа} - t_{ос}), \text{ кДж/ч}, \quad (16)$$

где $L_{\bar{\sigma}}$ – длина печи, м; k_l – линейный коэффициент теплопередачи, Вт/(м·К); $t_{ноа} - t_{ос}$ – разница между температурами внешней стенки печи и окружающей среды, °С.

• физическая и химическая теплота продуктов сгорания:

$$Q_{\delta} = Q_{\delta}^{\phi} + Q_{\delta}^x = G_{\delta} \cdot (t_{\delta} \cdot \frac{c_{\delta}}{\rho_{\delta}} + (Q_n^p)_{\delta}), \text{ кДж/ч}, \quad (17)$$

где G_{δ} – количество образующихся продуктов сгорания, кг/ч; t_{δ} – температура продуктов сгорания на выходе из печи, °С; c_{δ} – средняя теплоемкость продуктов сгорания, кДж/(м³·К); ρ_{δ} – плотность продуктов сгорания, кг/м³; $(Q_n^p)_{\delta}$ – теплота сгорания дыма, как следствие неполного сгорания топлива, летучих, угара и уносимой пыли, кДж/кг.

• физическая теплота унесенной пыли:

$$Q_n = G_n \cdot (t_{\delta} \cdot c_m + (Q_n^p)_n), \text{ кДж/ч}. \quad (18)$$

Уравнение теплового баланса приобретает вид:

$$Q_e + Q_{м1} + Q_m + Q_{y2} + Q_{лет} = Q_{м2} + \Delta Q_{лет} + Q_{вл} + Q_5 + Q_{\delta} + Q_n \quad (19)$$

или

$$\begin{aligned} &G_e t_e c_e + G_1 t_m c_m + B \cdot (t_m c_m + (Q_n^p)_m \cdot \eta) + \\ &+ (Q_n^p)_{y2} \cdot G_{y2} + (Q_n^p)_{лет} \cdot G_{лет} = \\ &= G_2 t_k c_m + H_{лет} G_{лет} + H_{вл} G_{вл} + \\ &+ \pi \cdot k_l L_{\bar{\sigma}}(t_{ноа} - t_{ос}) + G_{\delta} (t_{\delta} \frac{c_{\delta}}{\rho_{\delta}} + (Q_n^p)_{\delta}) + \\ &+ G_n t_{\delta} c_m \end{aligned} \quad (20)$$

В данном уравнении неизвестными являются B , G_e , и G_{δ} .

Представим G_e , как сумму расхода воздуха на сжигание топлива, летучих и угара, кг/ч:

$$G_e = G_e^m + G_e^{лет} + G_e^{y2} \quad (21)$$

Тогда физическая теплота, вносимая воздухом, кДж/ч:

$$G_e t_e c_e = G_e^m t_e c_e + G_e^{лет} t_e c_e + G_e^{y2} t_e c_e \quad (22)$$

Продукты сгорания состоят из продуктов сгорания топлива, летучих, угара, а также удаленной из материала влаги в виде водяного пара. Исходя из этого, G_{δ} можно представить в следующем виде, кг/ч:

$$G_{\delta} = G_{\delta}^m + G_{\delta}^{лет} + G_{\delta}^{y2} + G_{вл} \quad (23)$$

Тогда физическая и химическая теплота, уходящая с продуктами сгорания, определяется по формуле, кДж/ч:

$$\begin{aligned} &G_{\delta} (t_{\delta} \frac{c_{\delta}}{\rho_{\delta}} + (Q_n^p)_{\delta}) = \\ &= (G_{\delta}^m + G_{\delta}^{лет} + G_{\delta}^{y2} + G_{вл}) (t_{\delta} \frac{c_{\delta}^i}{\rho_{\delta}^i} + (Q_n^p)_{\delta}^i) \end{aligned} \quad (24)$$

где c_{δ}^i – средняя теплоемкость соответствующих продуктов сгорания, кДж/(м³·К); ρ_{δ}^i – плотность соответствующих продуктов сгорания, кг/м³; $(Q_n^p)_{\delta}^i$ – химическая теплота соответствующих продуктов сгорания, кДж/кг.

Так как расход воздуха и количество образующегося дыма стехиометрически связаны с количеством сжигаемого топлива, то G_e и G_{δ} можно выразить следующим образом, кг/ч:

$$\begin{aligned} G_e^m + G_e^л + G_e^{y2} &= G_{e,y\delta}^m \cdot B + G_{e,y\delta}^{лет} \cdot G_{лет} + G_{e,y\delta}^{y2} \cdot G_{y2} \\ G_{\delta}^m + G_{\delta}^{лет} + G_{\delta}^{y2} + G_{вл} + G_n &= G_{\delta,y\delta}^m \cdot B + \\ &+ G_{\delta,y\delta}^{лет} \cdot G_{лет} + G_{\delta,y\delta}^{y2} \cdot G_{y2} + G_{вл} + G_n \end{aligned} \quad (25)$$

где $G_{e,y\delta}^m$, $G_{e,y\delta}^{лет}$, $G_{e,y\delta}^{y2}$ – удельные действительного количества влажного воздуха, требуемого для сжигания соответственно топлива, летучих и угара материала, кг/кг; $G_{\delta,y\delta}^m$, $G_{\delta,y\delta}^{лет}$, $G_{\delta,y\delta}^{y2}$ – удельные количества продуктов сгорания, образующихся при сжигании соответственно топлива, летучих и угара материала кг/кг.

Введем следующее обозначение:

$$\Delta Q = Q_{м2} - Q_{м1} + \Delta Q_{лет} - Q_{лет} + Q_{вл} + Q_5 + Q_n - Q_{y2} \quad (26)$$

Подставив зависимости (22, 24, 25, 26) в уравнение теплового баланса (19, 20), проводя сложные преобразования, получим формулу определения расхода топлива:

$$B = (\Delta Q + (G_{\delta}^{дем} + G_{\delta}^{yz} + G_{вл}) \times (t_{\delta} c_{\delta}^i + (Q_n^p)_{\delta}^i) + G_n \cdot (t_{\delta} \cdot c_m + (Q_n^p)_n) - (G_{\delta}^n + G_{\delta}^{yz}) t_{\delta} c_{\delta} / (G_{\delta, y\delta}^m t_{\delta} c_{\delta} + (t_m c_m + (Q_n^p)_m \cdot \eta) - G_{\delta, y\delta}^m (t_{\delta} \frac{c_{\delta}^m}{\rho_{\delta}^m} + (Q_n^p)_{\delta}^m)) \quad (27)$$

Зная B , можно определить G_{δ} и G_{δ} по формуле (25).

Проверка правильности расчета теплового баланса проводится по формуле:

$$\frac{\sum Q_{прис} - \sum Q_{расх}}{\sum Q_{прис}} \cdot 100 \leq 0,5\% \quad (28)$$

После определения расхода топлива, воздуха и количества образующихся продуктов сгорания, проводится проверка материального баланса процесса, с учетом горения:

$$\frac{(B + G_{\delta} + G_1) - (G_{\delta} + G_n + G_2)}{B + G_{\delta} + G_1} \cdot 100 \leq 2\% \quad (29)$$

Если диаметр и длина печи не заданы, они выбираются в соответствии с ГОСТ 27120, при этом, по производственным данным [3], длина печи обычно составляет 40-45 м. Частота вращения печи определяется по эмпирической формуле [3].

Скорость движения материала в печи:

$$v = \frac{4 \cdot G_1}{60 \cdot \rho_a \cdot K_{зан} \cdot \pi \cdot D_{\delta}^2}, \text{ м/мин}, \quad (30)$$

где ρ_a – насыпная плотность материала, кг/м³; $K_{зан} = 0,06-0,15$ – коэффициент заполнения печи; D_{δ} – внутренний диаметр барабана печи, м.

Частота вращения печи:

$$n = \frac{v}{105 \cdot R_{\delta} \cdot tg(2\alpha)}, \text{ об/мин}, \quad (31)$$

где R_{δ} – радиус барабана печи, м; $\alpha = 2,5-5^{\circ}$ – угол наклона печи.

Расчет производится в следующем порядке:

1. Расчет материального баланса по формулам (2...6), в ходе которого определяются часовое количество угара, безвозвратного пылеуноса, удаляемой влаги, удаляемых летучих, выходящего из печи материала.

2. Расчет горения топлива, с определением коэффициента расхода воздуха, обеспечивающего разбавление продуктов сгорания до требуемой температуры прокалики. В ходе расчета определяются низшая теплота сгорания 1 кг топлива, требуемое количество воздуха для сжигания 1 кг топлива, количество образующихся при этом продуктов сгорания и их состав.

3. Расчет угара, как горения углерода, и расчет горения летучих, с определением коэффициента расхода воздуха, обеспечивающего разбавление продуктов сгорания и поддержание температуры прокалики. В ходе расчета определяются количество тепла, выделяемого при сгорании 1 кг материала и летучих, требуемое количество воздуха для сгорания 1 кг углерода и летучих, количество образующихся при этом продуктов сгорания и их состав.

4. Расчет составляющих теплового баланса по формулам (8...18).

5. Определение расхода топлива, воздуха и количества продуктов сгорания по формулам (25, 27). Проверка точности расчета по формулам (28, 29).

6. Расчет частоты вращения печи по формулам (30, 31).

По разработанной методике был проведен проверочный расчет, для разных температур прокалики ($t_{пр}$).

Исходные данные: $G_1 = 6000$ кг/ч; $\omega_1^r = 7\%$; $\omega_2^r = 1\%$; $K_{yt} = 7\%$; $K_{п} = 8\%$; содержание летучих на сухую беззольную массу $V^{daf} = 6\%$; топливо – природный газ. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

При анализе полученной методики были выявлены недостатки:

- температуры в печи и на поверхности кожуха принимаются усредненно на основании производственных данных, вследствие чего некоторые составляющие теплового баланса могут быть вычислены неточно;

- теплоемкость прокаленного материала оказывает значительное влияние на тепловой баланс, однако изменение теплоемкости материала в процессе прокалики исследовано недостаточно, что снижает точность расчетов;

- на практике продукты сгорания содержат в себе горючие компоненты, свидетельствующие о неполноте сгорания, что противоречит принятому в методике допущению;

- состав выделяющихся летучих принят условно и требует уточнения.

Учитывая вышеуказанные недостатки, дальнейшие исследования планируется направить на:

- анализ распределения температур в печи;

Табл. 1. Результаты расчета по разработанной методике

№	$t_{пр}, ^\circ\text{C}$	$G_2, \text{кг/ч}$	$G_{уг}, \text{кг/ч}$	$G_{п}, \text{кг/ч}$	$V, \text{м}^3/\text{ч}$	$G_{в}, \text{м}^3/\text{ч}$
1	900	4345,5	420	480	672,5	31188,8
2	1000				673,7	27556,4
3	1100				678,0	24712,3
4	1200				692,2	22478,4
5	1300				708,4	20653,7
6	1400				729,1	19094,8
7	1500				754,8	17823,7
8	1600				784,5	16778,9

- детальное исследование характера тепловых потерь через футеровку печи, с целью определения линейного коэффициента теплопередачи;
- детальное исследование угара материала в печи и влияющих на него параметров, с целью корректного определения степени угара материала и степени окисления углерода при угаре;
- исследование состава выделяемых летучих, удельной теплоты образования летучих и полноты их сгорания в печи;
- исследование изменения теплоемкости материала в процессе прокалики;
- определение степени влияния подсосов воздуха на работу вращающихся печей и необходимости их учета при расчетах;
- анализ кинетики процесса, определение оптимальной скорости нагрева.

Выводы

В работе представлена и апробирована методика расчета прокалики антрацита во вращающейся печи. В основе предложенной методики лежат полученные аналитическим методом формулы материального и теплового баланса процесса прокалики. Температуру прокалики предлагается определять путем предварительных лабораторных испытаний.

Результаты расчетов, проведенных по разработанной методике, приближенно соответствуют производственным данным. Таким образом, учитывая ряд допущений, методика может быть использована для проведения предварительного расчета прокалики антрацита во вращающейся печи.

Список литературы

1. Удовицкий, В.И. Антрацит. Сравнение технологий обогащения. Методы оценки эффективности разделения углей и антрацитов в гравитационных аппаратах с тяжелой средой / В.И. Удовицкий, А.С. Кирнарский, А.Н. Корчевский, А.А. Бегунов, В.А. Кандинский, Л.Н. Плотникова // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. – №4. – с. 49-65.
2. Шариков, Ю.В. Роль и значение управляемых параметров в процессе обжига нефтяного кокса в трубчатых вращающихся печах / Ю.В. Шариков, Ф.Ю. Шариков, К.А. Крылов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – №11. – с. 34-42.
3. Чалых, Е. Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий / Е. Ф. Чалых. – Москва: «Металлургия», 1972. – 432 с.
4. Зурабов, А.Т. Совершенствование технологии прокалики углеродистого сырья во вращающихся печах электродного производства : Специальность 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов» : автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук / Зурабов Александр Тевандросович ; ФГБОУ ВО "СКГМИ (ГТУ)". – Владикавказ, 2007. – 23 с.
5. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология: справ. изд. В 2 книгах. Книга 1 / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев ; под ред. В.Г. Лисиенко – Москва : Теплотехник, 2004. – 688 с.
6. Герасименко, Т.Е. Совершенствование и идентификация математической модели прокалики углеродных материалов в барабанной вращающейся печи / Т.Е. Герасименко, Е.И. Мешков, А.А. Томилина // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2016. – Т.14. – №2. – с. 116-124.
7. Patisson, F. Coal pyrolysis in a rotary kiln: Part II. Overall model of the furnace / F. Patisson, E. Lebas, F. Hanrot, D. Ablitzer, J.L. Houzelot // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2000. – №31b, – pp . 391-402.
8. Bui, R.T. Mathematical Modeling of the Rotary Coke Calcining Kiln / R.T. Bui, G. Simard, A. Charette, Y. Kocaefe, J. Perron // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – 1995. – №73. – pp. 534-545.
9. Martins, M.A. Modelling and simulation of petroleum coke calcination in rotary kilns / M.A.

- Martins, L.S. Oliveira, A.S. Franca // Fuel. – 2001. – №80. – pp. 1611-1622.
10. Технологические расчеты установок переработки нефти: учеб. пособие для вузов / М.А. Танатаров, М.Н. Ахметшина, Р.А. Фасхутдинов [и др.] – Москва: Химия, 1987. – 352 с.
11. Цыбуля, Е.И. Особенности распределения температур в футеровке вращающейся печи для прокаливания антрацита / Е.И. Цыбуля // *Металлургическая теплотехника: сб. науч. тр. Национальной металлургической академии Украины.* – Днепропетровск: Новая идеология, 2014. – Вып. 6 (21). – С. 95-100.
12. Priimachov, P.S. Experimental research of anthracite properties change during its heat processing / P.S. Priimachov, A.N. Korchevskiy, A.B. Biryukov // *Scientific Conference Abstracts “Topical issues of rational use of natural resources”.* – Saint-Petersburg, – 2020. – vol.1. – pp. 182-183.
13. Безуглый, В.А. Экспериментальное исследование удельного электрического сопротивления насыпного слоя термоантрацита / В.А. Безуглый, М.В. Губинский, А.С. Коверя, В.П. Коноваленко, П.В. Кондратенко // *Металл и литье Украины.* – 2019. – № 5-6. – С. 40-47.

A.B. Biryukov /Dr. Sci. (Eng.), P.A. Gnitiev /Cand. Sci. (Eng.), P.S. Priimachov
Donetsk National Technical University (Donetsk)

DEVELOPMENT OF CALCULATION METHODS FOR ANTHRACITE CALCINATION IN A ROTARY KILN

Background. Anthracite is a valuable raw material for the production of carbon materials for various purposes, with the most widely used process of anthracite calcination in a rotary kiln. The existing mathematical models and calculation methods are science-intensive, which makes it difficult to use them in production, so the aim of the work is to create a methodology that allows for a simpler calculation with sufficient accuracy.

Materials and/or methods. A method for calculating the calcination of anthracite in a rotary kiln is proposed, including the calculation of the material and heat balance of the kiln. This takes into account the processes of moisture removal, release of volatiles, dust formation, combustion of volatiles in the volume of the furnace, waste of anthracite and heating of the main part of anthracite.

Results. Using the developed technique, the main parameters of the anthracite calcination technology for calcination temperatures from 900 to 1600 °C were determined. The fuel and air costs obtained as a result of the calculation (in terms of specific indicators) sufficiently correspond to the known practical data.

Conclusion. The proposed method allows, for given values of the amount of material loaded into the furnace, the results of the technical analysis of the material, the degree of waste and dust entrainment of the material in the furnace, to determine the fuel and air consumption for the implementation of the technology, as well as to determine the amount and composition of the resulting smoke.

Keywords: anthracite, rotary kiln, calcination, calculation, carbon materials.

Сведения об авторах

А.Б. Бирюков

SPIN-код: 3186-0680
 ORCID iD: 0000-0002-8146-2017
 Телефон: +380 (71) 405-89-73
 Эл. почта: birukov.ttf@gmail.com

П.С. Приймачов

SPIN-код: 2260-8250
 Телефон: +380 (71) 359-07-59
 Эл. почта: pasha.priymachov98@gmail.com

П.А. Гнитиёв

SPIN-код: 1943-4196
 ORCID iD: 0000-0001-9266-7969
 Телефон: +380 (71) 321-50-15
 Эл. почта: paul.gnitiev@mail.ru

Статья поступила 04.05.2022 г.

*©А.Б. Бирюков, П.А. Гнитиёв, П.С. Приймачов, 2022
 Рецензент д.т.н. Н.И. Захаров*