

УДК 666.92

О СНИЖЕНИИ НОРМЫ РАСХОДА ТОПЛИВА В РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ПЕЧАХ С ДВИЖУЩИМСЯ ПРОДУВАЕМЫМ СЛОЕМ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗВЕСТИ ИЗ КАЛЬЦИТА CaCO_3

Канд. техн. наук, доц. СЕДНИН В. А.,
докт. техн. наук, проф. НЕСЕНЧУК А. П.,
инженеры КОЖЕВНИКОВ А. Г., МЕЛЬНИКОВ И. В.

*Белорусский национальный технический университет,
РУП «Белорусский металлургический завод»*

Принципиально новым подходом при анализе работы печей является разработанная в бывшем СССР общая теория печей, успешно развитая в работах М. А. Глинкова. Ее отличительной особенностью явилось комплексное рассмотрение проблем, возникающих при необходимости оценки оптимальных режимов работы и выбора теплотехнологии.

На рис. 1 показана обжиговая известковая печь с регенеративным теплоиспользованием. Тепловая работа таких печей характеризуется взаимосвязанностью физико- и химикотермических взаимодействий, протекающих в продуваемом слое обжигаемого сырьевого материала (CaCO_3), а также регенеративных зон подогрева с зоной обжига кальцита.

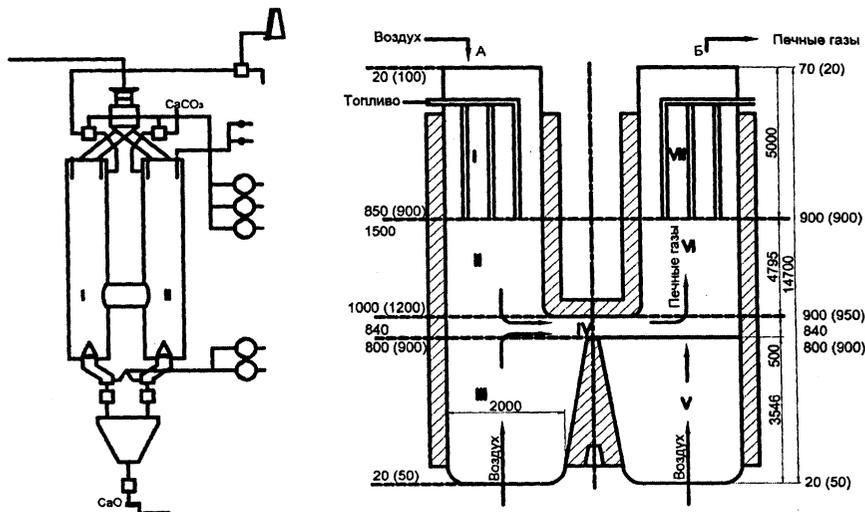


Рис. 1. Схема регенеративной шахты печи с движущимся слоем для производства CaO из кальцита CaCO_3 : А – шахта прямоточная; Б – шахта противоточная; I, VII – зоны подогрева; II, VI – обжига; III, V – охлаждения; IV – переточный канал. Температуры газообразной и твердой (по поверхности куска CaCO_3) соответственно указаны без скобок и в скобках в $^{\circ}\text{C}$

Регенеративное теплоиспользование, в частности подогрев и охлаждение сырьевого материала, характеризуется коэффициентом эффективности $\eta_{\text{эф}}^p$, $\eta_{\text{эф}}^p = \eta_{\text{т.э}} \mathcal{E}_{\text{под}}$, где $\eta_{\text{т.э}}$ – тепловой эквивалент подогрева (охлаждения), $\eta_{\text{т.э}} = \frac{1}{\eta_{\text{и.т}}}$; $\mathcal{E}_{\text{под}}$ – теплота, введенная в теплотехнологию в результате использования тепловых отходов известковой печи,

$$\mathcal{E}_{\text{под}} = \frac{h_{\text{в}}}{h_{\text{т}} + h_{\text{в}} - h_{\text{т.ух}}}$$

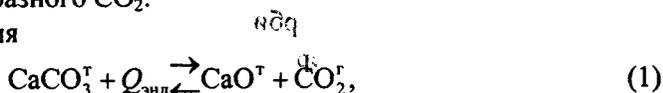
(здесь $h_{\text{в}}$ – энтальпия подогретого воздуха, идущего на горение; $h_{\text{т}}$ – пирометрическая характеристика используемого топлива, $h_{\text{т}} = \sum V_i Q_i^p$; $h_{\text{т.ух}}$ – энтальпия продуктов сгорания, покидающих зону обжига).

Наряду с желанием сократить расход топлива на 1 т целевого продукта (CaO), для электрометаллургических процессов существует необходимость получения извести (CaO) с очень низким остаточным содержанием диоксида углерода (CO₂), что наряду с возрастающими технологическими трудностями обеспечивает снижение расхода электроэнергии в дуговых печах (конечное содержание CaO в целевом продукте (CaO) не должно быть ниже 98 % (мас.)).

Получение извести из кальцита CaCO₃ связано с разукрупнением молекулы CaCO₃ до CaO и CO₂. Разукрупнение молекулы CaCO₃ за счет термической диссоциации сопряжено с большими энергетическими затратами, которые покрываются в результате сжигания в слое газообразного органического топлива. Как известно, в производстве извести энергозатраты сопряжены с нагревом кускового материала кальцита (CaCO₃) до температуры реакции термической диссоциации порядка 900 °С, некоторым перегревом куска по отношению к этой температуре и диссоциацией. При оценке энергозатрат пристального внимания в плане их снижения заслуживает перегрев куска от его периферии к центру в процессе обжига. При этом термическая диссоциация CaCO₃ состоит из стадий:

- разрушения твердого кальцита с образованием пересыщенного раствора CaO в CaCO₃;
- образования кристаллов CaO при распаде пересыщенного твердого раствора;
- десорбции газообразного CO₂.

Конечная же реакция



где CaCO₃^T, CaO^T и CO₂^г соответственно равны 100, 56 и 44 кг.

В (1) $Q_{\text{энд}}$ – величина теплового эффекта термического разложения ($\Delta H_{\text{CaCO}_3}^\circ$) кальцита. Значение $\Delta H_{\text{CaCO}_3}^\circ$ достаточно велико и составляет

$$\Delta H_{\text{CaCO}_3}^\circ = -3185 \text{ кДж/кг (CaO)}; \Delta H_{\text{CaCO}_3}^\circ = -1780 \text{ кДж/кг (CaCO}_3\text{)}$$

соответственно в пересчете на конечный и сырьевой продукт.

Первая стадия (разрушение CaCO_3 , рис. 2) протекает при температуре порядка 900°C и характеризуется отрывом иона O^{2-} от анионита CO_3^{2-} .

Для реализации такого процесса частицы CaCO_3 должны обладать известным запасом кинетической энергии, необходимой для разрушения связей молекулы CaCO_3 и образования новых связей. Помимо распада анионита CO_3^{2-} в процессе диссоциации важную роль играет разрушение кристаллической решетки сырьевого продукта CaCO_3 .

Согласно кинетической теории процесса зарождения новой фазы [1] в любой молекулярной или атомной системе, находящейся в состоянии теплового равновесия, в различных ее точках происходят отклонения различных параметров от наиболее вероятных значений. Эти отклонения непрерывно возникают и исчезают; они могут изменяться в широких пределах. Начиная с некоторой величины, называемой критической, отклонения становятся более устойчивыми и не исчезают со временем, а продолжают расти, в результате чего образуются центры кристаллизации новой фазы. В зависимости от заданных условий изменяется уровень критических отклонений. Возникновение последних сопровождается изменением «свободной энергии» системы не только вследствие различия химических потенциалов частиц в новом μ_2 и старом μ_1 состояниях, но также и за счет образования поверхности раздела s . Наиболее благоприятные условия для распада создаются там, где имеются наибольшие искажения решетки и связь между частицами сильно ослаблена, а запас свободной энергии достаточно высок. Такие места являются активными центрами, где начинается и осуществляется распад анионитов.

По мере развития процесса распада CO_3^{2-} вблизи активных центров происходит накопление адсорбированных молекул CO_2 и увеличение концентрации ионов O^{2-} в поверхностном слое, следствием чего являются искажение этого участка кристаллической решетки и образование пересыщенного раствора CaO в CaCO_3 , так как растворимость первого в последнем невелика. Также следует помнить, что появление границы раздела фаз $\text{CaO} - \text{CaCO}_3$ твердого раствора служит ускоряющим фактором, процесс термической диссоциации CaCO_3 приобретает автокаталитический характер. Однако управление энергетическими затратами на первой и второй стадиях путем изменения температуры процесса обжига кальцита может привести к спеканию CaO .

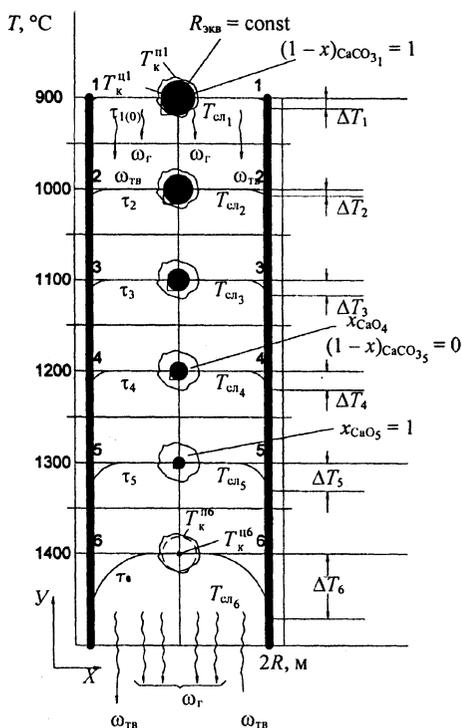


Рис. 2. Геометрическая модель процесса обжига CaCO_3 : 1...6 – сечения зоны обжига для моментов времени $\tau_0 \dots \tau_6$

Как уже отмечалось, наряду с сокращением энергетических затрат (органического топлива) в производстве извести существует естественное стремление получить при обжиге достаточно чистый конечный продукт с остаточным содержанием примесей (CaCO_3 , CaO_2 и др.) на уровне 2 % (мас.) и значительным выходом CaO (порядка 98 %), что, безусловно, связано с необходимостью догрева центра куска CaCO_3 (сырьевого продукта) до температуры термической диссоциации, равной 900°C . При этом сегодня происходит неуправляемый перегрев его периферийных слоев по отношению к температуре обжига кальцита (рис. 3). В результате повышение температуры на всех стадиях процесса (течение термической диссоциации и интенсификация процесса десорбции CO_2), перегрев куска CaCO_3 от периферии до центра приводят к увеличению расхода теплоты по отношению к оправданной расчетной норме на 1 т извести.

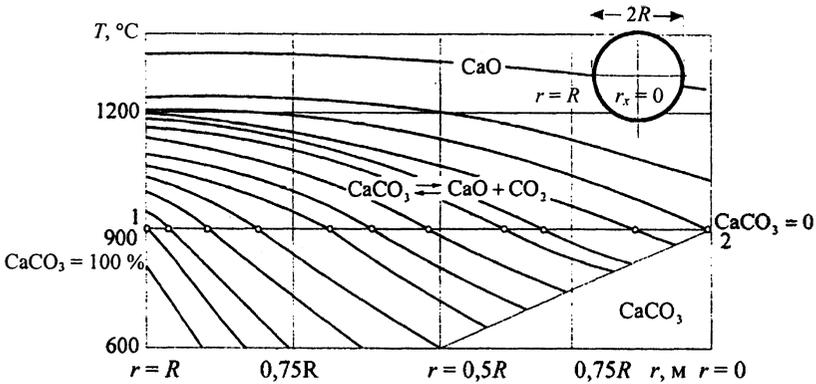
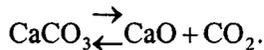


Рис. 3. Температурный график нагрева куска CaCO_3 в зоне обжига для моментов времени $\tau_0 \dots \tau_n$

В таких случаях разработка оптимальных технологических режимов обжига, оправданных в свете технологического качества целевого продукта и энергетических затрат, возможна только на основании разработки тепловой модели процесса и ее численного решения. На базе ее решения и анализа производится создание оптимизационной программы ведения оптимального режима обжига, обеспечивающего как оправданные технологические свойства CaO , так и минимальные энергозатраты [2].

В свете сказанного (не отвлекая внимания на процессы, протекающие на молекулярном уровне на первой и второй стадиях обжига) тепловая модель (макромодель) процесса обжига CaCO_3 должна быть записана только для третьей стадии теплотехнологии, где происходит конечный процесс десорбции CO_2 согласно формуле



Процессы, происходящие на этой стадии обжига, могут быть описаны кинетическими уравнениями для газовой и сорбированной фаз системы. Кроме того, уравнение энергии должно содержать, помимо энтальпии системы, тепловой эффект диссоциации, приводящий систему в равновесие.

В итоге математическая модель должна содержать два кинетических уравнения сорбированной (в CaCO_3) и газовой фаз (CO_2 в продуктах сгорания, рис. 2 и 3).

Кинетические уравнения сорбированной и газовой фаз могут быть получены в соответствии с законом сохранения массы в зоне обжига шахты печи. Уравнение энергии дополняется тепловым эффектом, учитывающим изменение энтальпии системы.

Согласно закону Кирхгофа [3] изменение энтальпии системы (тепловой эффект диссоциации CaCO_3) в зависимости от температуры реакции можно записать

$$\Delta H_{\text{CaCO}_3}^T = \Delta H_{\text{CaCO}_3}^\circ + \int_0^T \Delta c_p dT, \quad (2)$$

где Δc_p – разность теплоемкостей конечных и начальных продуктов реакции $\Delta c_p = c_{\text{CaO}} - c_{\text{CaCO}_3}$ (здесь $c_{\text{CaO}} = \frac{1}{56} \cdot (11,86 - 1,08 \cdot 10^{-3} T - 1,66 \cdot 10^5 T^{-2}) \times 4,19$ кДж/(кг · К) и $c_{\text{CaCO}_3} = 0,01 \cdot (24,98 + 5,24 \cdot 10^{-3} T - 6,2 \cdot 10^3 T^{-2}) \times 4,19$ кДж/(кг · К).

С учетом переменных теплофизических характеристик тепловой эффект составит

$$\Delta H_{\text{CaCO}_3}^T = \Delta H_{\text{CaCO}_3}^\circ + \int_0^T (2,53 - 8,38 \cdot 10^{-3} T - 0,525 \cdot 10^3 T^{-2}) dT \text{ ккал/моль.} \quad (3)$$

При написании модели должны учитываться тепловые потери шахтой (рис. 4, 5).

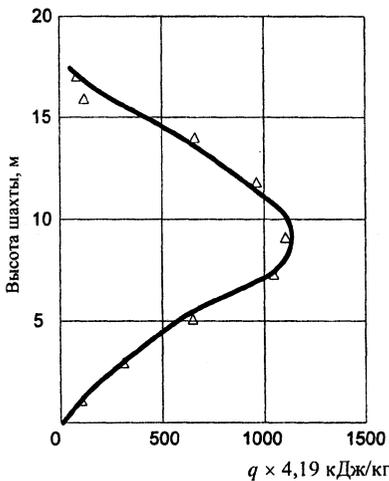


Рис. 4. Потери теплоты ограждающей конст- рукцией зоны обжига печи [3]

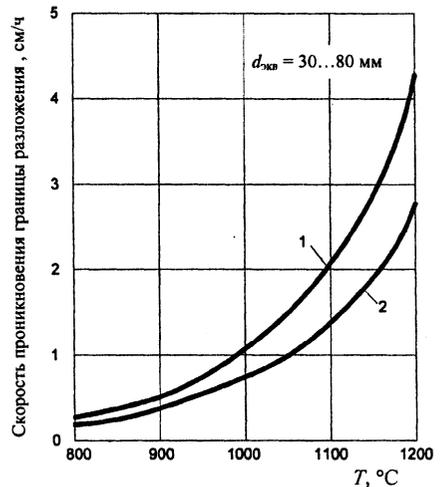


Рис. 5. Зависимость средней скорости проникновения границы разложения от температуры [3]: 1 – для CaO ; 2 – для CaCO_3

Кроме всего сказанного, абстрагируясь от химических преобразований, происходящих в кристаллической решетке на молекулярном уровне, и, следовательно, отбрасывая первые две стадии обжига, сохраняя лишь макропроцесс десорбции, в первом приближении может быть использована модель для температурного поля с постоянно действующим источником теплоты [4] и дополненная конкретными теплофизическими свойствами материалов реакции (рис. 6).

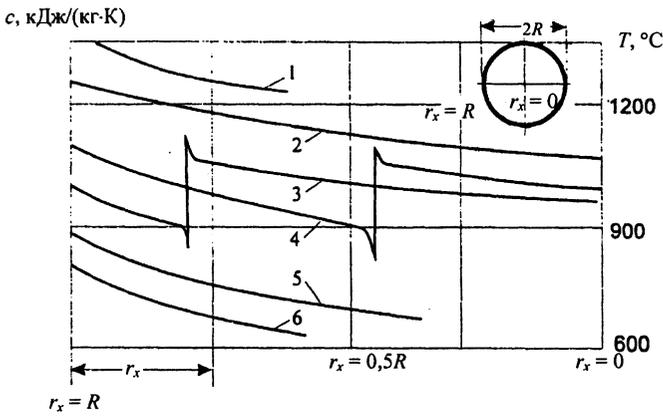


Рис. 6. Характер изменения теплофизических характеристик (массовой изобарной теплоемкости) при нагревании куска $\text{CaCO}_3 - \text{CaO}$ от температуры и скорости проникновения границы разложения: 1...6 – для моментов времени $\tau_1 \dots \tau_6$

Тогда задачу, связанную с обжигом CaCO_3 , можно описать

$$\frac{\partial [r_x T(r_x, \tau)]}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 [r_x T(r_x, \tau)]}{\partial r_x^2} + \frac{H r_x}{c p}, \quad \tau > 0; 0 < r_x < R; \quad (4)$$

$$T(r_x, 0) = T_0; \quad T(0, \tau) \neq \infty; \quad \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial r_x} = 0,$$

а также

$$-\frac{\partial T(R, \tau)}{\partial r_x} + d[T_c - T(R, \tau)] = 0$$

и дополняющие систему (4) условия:

$$c_{\text{CaCO}_3} = 0,01 \cdot (24,98 + 5,24 \cdot 10^{-3} T - 6,2 \cdot 10^3 T^{-2}) \cdot 4,19;$$

$$\lambda_{\text{CaCO}_3} = (1,71 - 0,0013 T) \cdot 1,163;$$

$$c_{\text{CaO}} = \frac{1}{56} \cdot (11,86 + 1,08 \cdot 10^{-3} T - 1,66 \cdot 10^5 T^{-2}) \cdot 4,19;$$

$$\lambda_{\text{CaCO}_3} = (-1,011 - 0,66 \cdot 10^{-3} T + 1,513 \cdot 10^{-3}) \cdot 1,163.$$

Решение (4) может быть получено в виде [4]

$$\frac{T(r, \tau) - T_0}{T_c - T_0} = 1 + \frac{1}{6} \text{Po} \left(1 + \frac{2}{\text{Bi}} - \frac{r_x^2}{R^2} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{\text{Po}}{\mu_n^2} \right) A_n \times$$

$$\times \frac{R \sin \mu_n \frac{r_x}{R}}{r_x \mu_n} \exp(-\mu_n^2 \text{Fo}),$$

где $Po = \frac{HR^2}{\lambda(T_c - T_0)}$; H – теплота диссоциации; T_c и T_0 – соответственно

температура газов в зоне обжига и начальная температура CaCO_3 , поступающего в зону обжига печи; r_x – текущая координата (рис. 6).

ЛИТЕРАТУРА

1. Х а н н е й Н. // Химия твердого тела. – М.: Мир, 1971.
2. С т а л ь н о й слиток: В 3 т. – Т. 3: Нагрев / В. И. Тимошпольский, Ю. А. Самойлович, И. А. Трусова и др.; Под общ. ред. В. И. Тимошпольского, Ю. А. Самойловича. – Мн.: Бел. наука, 2001.
3. Х в а т И. Б., Б а р а н о в а Р. И., Т а б у н щ и к о в Н. П. Исследование шахтных известково-обжигательных печей. – М.: Химия, 1964.
4. Л ы к о в А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1967.

Представлена кафедрой
ПТЭ и ТТ

Поступила 19.01.2004

УДК 536.25

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ В ВОЗДУШНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ОРЕБРЕННЫХ ЦИЛИНДРОВ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООТДАЧИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИЕЙ

Докт. техн. наук, проф. КУНТЫШ В. Б.,
канд. техн. наук, доц. САМОРОДОВ А. В., канд. техн. наук ПОЗДНЯКОВА А. В.

*Белорусский государственный технологический университет,
Архангельский государственный технический университет*

Трубы цилиндрической формы с накатными спиральными алюминиевыми ребрами являются основным сборочным элементом широко применяемых газожидкостных теплообменников в различных отраслях техники и промышленности. В ряде теплообменников из труб этого конструктивного типа встречается свободно-конвективное течение воздуха, например в одно- и двухрядных охлаждающих батареях холодильных камер [1], одно- и двухрядных подогревателях воздуха аппаратов воздушного охлаждения энергоносителей и технологических сред, калориферах воздушного отопления промышленных цехов, общественных зданий и сооружений, воздухоохлаждаемых конденсаторах холодильных машин, различного рода теплоутилизаторах сбросной теплоты вентиляционных систем, сушильных установок, радиаторно-охладительных башен («сухих градирен»).

Одно из действенных направлений реализации энергосберегающих технологий как способа повышения энергоэффективности оборудования и