

$$q_2 = 8,72 + 0,0011P - 0,22H - 0,0001PH + 0,00001P^2 + \\ + 0,0019H^2 \quad (H = 48-55 \text{ м}).$$

Указанные методика и подход аналитического определения характеристик ГЭС в целях оптимизации и дооптимизации режима энергосистемы по активной мощности могут быть применены и для других энергосистем.

### ВЫВОДЫ

1. Предложена методика аналитического построения расходных характеристик и характеристик относительного прироста расхода воды на ГЭС с применением метода планирования эксперимента и регрессионного анализа.

2. Проанализированы погрешности линейной и квадратичной моделей и показано, что для необходимой точности аппроксимация характеристик должна осуществляться не менее чем для двух диапазонов изменения напора в зависимости от крутизны функции расхода воды от напора  $Q = f(H)$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гусейнов, Ф. Г. Планирование эксперимента в задачах электроэнергетики / Ф. Г. Гусейнов, О. С. Мамедяров. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 150 с.
2. Мамедяров, О. С. Регрессионный анализ установившихся режимов электрической системы / О. С. Мамедяров // Электричество. – 1982. – № 5. – С. 10–24.

Представлена Ученым советом

Поступила 10.11.2005

УДК 666.9

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖИГА КАЛЬЦИТА

**Инж. КОЖЕВНИКОВ А. Г.**

*РУП «Белорусский металлургический завод»*

В металлургических процессах удельный расход извести (1 кг на 1 т продукции) составляет: при конверторном способе производства стали – 80–100, мартеновском – 15–50, электросталеплавильном – 40–60, агломерация шихты – 20–60. Использование высококачественной извести при выплавке металла увеличивает производительность металлургических агрегатов, снижает удельный расход топлива и повышает срок службы футеровки. Следовательно, решение научно-технических задач по модернизации и оптимизации на существующих заводских мощностях по производству извести позволяет увеличить выпуск основной продукции металлургического предприятия.

Промышленное производство металлургической извести методом термической диссоциации известняков полностью определяется тепловыми процессами подвода теплоты от греющих газов к поверхности фронта диссоциации, что связано со скоростью подвода теплоты диссоциации и характером температурного поля системы. Происходит разложение молекулы  $\text{CaCO}_3$  на газообразный  $\text{CO}_2$  и твердый  $\text{CaO}$ . При этом затрачивается значительное количество теплоты, подводимой от греющих газов, что не может не сказаться на ходе температурных кривых нагрева (на отдельных этапах прохождения кусковым материалом зоны обжига шахтной печи график может замедляться или ускоряться в зависимости от соотношения количества подводимой теплоты к незатронутой диссоциацией массе  $\text{CaCO}_3$ ). Кроме того, по мере продвижения куска шихты в зоне обжига происходит его обрастание «шубкой»  $\text{CaO}$  с теплопроводностью, сильно отличающейся от теплопроводности сырьевого материала  $\text{CaCO}_3$ . В конечном итоге управляющая роль процессом «шубки» преобладает над ролью внутреннего источника (стока теплоты), и процесс начинает зависеть в основном от соотношения  $\lambda_{\text{CaO}}/\lambda_{\text{CaCO}_3}$ .

Принимая во внимание сказанное, ответы на многие вопросы, связанные с энергозатратами в зоне обжига печи, могут быть получены в результате анализа (численного и натурного) температурных графиков нагрева.

В [1] представлена математическая модель процесса теплообмена для условий шахтной печи, на основе которой был разработан алгоритм [2], позволяющий рассчитывать температурное поле внутри обжигаемого кускового кальцита. Для анализа влияния температуры в печи  $t_{\text{г.г}}$  и размеров куска  $X$  на выход  $\text{CaO} + \text{MgO}$  и на производительность печи (времени обжига) была разработана машинная программа на ЭМВ. Для идентификации полученной математической модели и тестирования программы выполнен ряд данных натурного и лабораторных экспериментов.

Важность этих экспериментов объясняется рядом причин. В частности, исходная влажность кальцита, используемого в качестве технологического сырья на РУП «БМЗ», составляет величину  $W_{\text{CaCO}_3} < 0,5 \%$ , что позволило при дальнейшем рассмотрении исключить влияние внутреннего источника в интервале температур  $0-t_{\text{дис}}$ . Также по ходу кривых нагрева (результаты опыта по нагреву  $\text{CaCO}_3$  в интервале температур  $t_{\text{дис}}-t_{\text{г.г}}$ ) удалось скорректировать данные численного эксперимента в части роли процессов диссоциации (теплота диссоциации) и теплопроводности образующегося слоя  $\text{CaO}$  на поверхности куска  $\text{CaCO}_3$  во времени обжига.

Для изучения (оценки) полноты обжига и положения фронта диссоциации в существующей на заводе теплотехнологии производился отбор рабочих проб извести на выходе из печей обжига РУП «БМЗ». Типичные образцы (пробы целевого продукта) представлены на рис. 1 (образцы 1, 2 и 3). Образцы 1–3 получены после обжига в печи ППР при обжиге  $\text{CaCO}_3$  в теплотехнологии, отвечающей 24-часовому циклу при температуре греющих газов  $t_{\text{г.г}} = 1150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Куски пробы имеют различный эквивалентный диаметр  $d_{\text{эkv}}$ . Для пробы 1 ( $d_{\text{эkv1}} = 70 \text{ мм}$ ) отчетливо видна зона, не затронутая обжигом. Для проб 2 ( $d_{\text{эkv2}} = 45 \text{ мм}$ ) и 3 ( $d_{\text{эkv3}} = 20 \text{ мм}$ ) эта зона значительно уступает по размерам зоне пробы 1, что свидетельствует о возможном перегреве кусков  $\text{CaCO}_3$  небольших размеров и возможном их спекании при дальнейшем росте температуры (диссоциация уже не сдерживает процесс роста температуры).

Фактическое время обжига по существующей теплотехнологии при равномерном продвижении в шахте печи кускового материала  $\tau_{\text{факт}} = 6-8$  ч. Время обжига, равное 6–8 ч, может быть объяснено крайне неудачной загрузкой кускового материала шихты по размерам куска. Как видно из рис. 1, шихта состоит из кусков размерами от 100–120 до 10–15 мм. Видно, что мелкие куски  $\text{CaCO}_3$  полностью разложились (диссоциация закончилась, внутренний источник поглощения теплоты иссяк), а крупные (образец 1) в это же время требуют дополнительного подвода теплоты для продолжения диссоциации, что в равных условиях подвода теплоты к шихте (кусковому материалу) может приводить к спеканию отдельных участков шихтового пространства при одновременном росте времени полного обжига (рост удельного расхода теплоты на теплотехнологию производства  $\text{CaO} + \text{MgO}$ ), так как температура греющих газов (обжига) оказывается чрезмерно завышенной для мелких фракций ( $\text{CaCO}_3$ ). В итоге при обжиге по существующей на заводе 24-часовой теплотехнологии имеется значительный перерасход топлива.

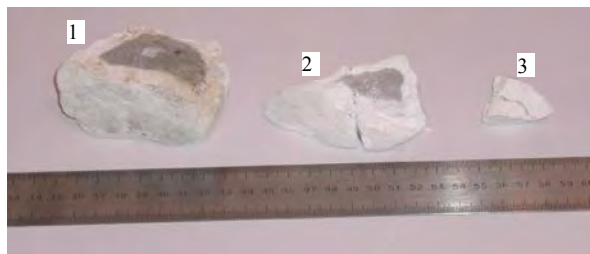


Рис. 1. Образцы извести, отобранные в конце теплотехнологии 24-часового цикла обжига  $\text{CaCO}_3$  в печи обжига извести № 2 РУП «БМЗ»: 1–3 – образцы извести размерами 70, 45 и 20 мм (соответственно  $d_{\text{экв}} = 25$  мм – для первого образца;  $d_{\text{экв}} = 15$  мм – для второго); зона  $\text{CaCO}_3$  в образце № 3 просматривается в виде небольшой полоски (образцы отобраны 28 мая 2004 г.)

Таким образом, мелкие куски обжигаемой шихты оказываются перегретыми, а более крупные в своей сердцевине содержат значительное количество  $\text{CaCO}_3$  (содержание кальцита при гранулометрическом составе (рис. 1) в конце обжига может достигать до 30 и более процентов), что убедительно подтверждается опытом эксплуатации печи ППР РУП «БМЗ» и лабораторным экспериментом (табл. 1).

Таблица 1

Протокол результатов испытаний № 587 от 2.06.2004

Наименование материала	Дата поступления пробы	№ вх.	Заказчик	$\text{CaO} + \text{MgO}, \%$	$\text{MgO}, \%$	$S, \%$	ППП, %
Известь (проба 1)	05.04.2004	6198	БНТУ	66,2	0,7	0,004	32,3
Известь (проба 2)				71,9	0,4	0,004	25,7

При известных размерах куска кальцита и его необожженной зоны по эквивалентным размерам для шара можно определить выход извести  $K_{\text{CaO}}$  (степени обжига)

$$K_{CaO} = 1 - \frac{r_2^3}{r_1^3},$$

где  $r_1$  и  $r_2$  – радиусы эквивалентного куску шара и необожженной зоны куска шара.

В табл. 2 приведены расчеты степени обжига для опытных образцов 1–3 (рис. 1): образец 1 и расчетные сравнительные данные для одного из кусков.

Следует отметить, что механические свойства образцов 1–3 (рис. 1) будут существенно отличаться. Это подтвердили лабораторные исследования, которые показали наличие разломов в стыке зон извести и кальцита.

Анализ экспериментальных данных нагрева куска  $CaCO_3$  свидетельствует о том, что на участке подогрева материал ведет себя как массивное тело с  $Bi \approx 0,5$ . Видимого влияния внутреннего источника не обнаруживается, и поэтому рост температуры на поверхности быстрый. Все это дает основание выполнять расчет процесса нагрева (зона подогрева) по упрощенной методике, хотя предложенная математическая модель [1] позволяет производить расчеты и в зоне подогрева.

Таблица 2

Доля CaO + MgO в образцах разного размера			
Эквивалентный диаметр, мм	70	45	20
Эквивалентный диаметр необожженной зоны, мм	25	15	1
Выход, %	95,4	96,3	100
Доля CaO + MgO при разной степени обжига			
Эквивалентный диаметр, мм	70	70	70
Относительный размер необожженной зоны, %	90	60	20
Эквивалентный диаметр необожженной зоны, мм	63	42	14
Выход, %	27,1	78,4	99,2

При достижении на поверхности температуры  $900\text{ }^\circ\text{C}$  ее рост резко замедляется. С одной стороны, это связано с сокращением перепада температуры между греющими газами и поверхностью куска нагреваемого кальцита, но наиболее ощутимый вклад в этот механизм вносит все возрастающее значение источника (теплоты диссоциации) и коэффициента теплопроводности нарастающего слоя CaO. Это дает основание сделать вывод о том, что желание сокращения времени обжига не может быть удовлетворено за счет повышения температуры греющих газов. Аналогичные выводы, как будет показано далее, были сделаны и по результатам численного анализа.

На рис. 2 приводится закономерность нагрева куска  $38 \times 38 \times 38$  мм при температурах греющих газов  $1100$ ,  $1150$  и  $1220\text{ }^\circ\text{C}$ . Как видим, влияние изменения температуры обнаруживается лишь в зоне предварительного подогрева печи (интервал температур – до  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ ). В зоне обжига включается механизм диссоциации (ввиду небольших размеров опытного образца она невелика) и малотеплопроводной «шубки», состоящей из CaO + MgO, и

существенного ускорения процесса (при  $t_{г.г} = 1150\text{ °C}$  и выше) с ростом температуры не наблюдается. Серия экспериментов с кубом  $38 \times 38 \times 38\text{ мм}$  при разных температурах греющей среды 1100, 1150 и 1220 °C подтвердила тот факт, что увеличение температуры греющих газов не приводило к существенному сокращению пребывания куска в зоне обжига. Сокращение времени пребывания кусков в печи достигалось лишь в зоне подогрева (рис. 2).

Аналогичные эксперименты (в лабораторных условиях) выполнялись с куском  $80 \times 80 \times 80\text{ мм}$  при температуре греющей среды 1100, 1150 и 1220 °C. В этой серии опытов зона диссоциации выделялась наиболее четко (рис. 3), что не противоречит физике процесса диссоциации. При этом она оказывалась более размытой, так как фактор массы куска сказывался ярче, чем это имело место в опытах с куском  $38 \times 38 \times 38\text{ мм}$ .

Проведенные серии опытов наглядно показали, что сократить время пребывания (снизить энергозатраты) материала за счет повышения температуры греющих газов нельзя. В процессах обжига помимо фактора массы куска при росте температуры греющих газов ускоряется рост толщины слоя малотеплопроводной «шубки» и в целом скорость процесса мало увеличивается.

На рис. 4 приводятся зависимости, полученные при численном моделировании и показывающие профили температуры внутри нагреваемого куска в различные моменты времени  $t = f(\tau, x)$ , где  $x$  – геометрическая координата с отсчетом от центра куска. Как следовало ожидать, получен традиционный температурный график процесса с источником теплоты (теплота диссоциации  $L$ ).

Рис. 5 и табл. 3, 4 иллюстрируют результаты численного расчета зависимостей между временем обжига, выходом  $\text{CaO} + \text{MgO}$ , эквивалентным размером куска и температурой греющих газов в печи. Графики получены

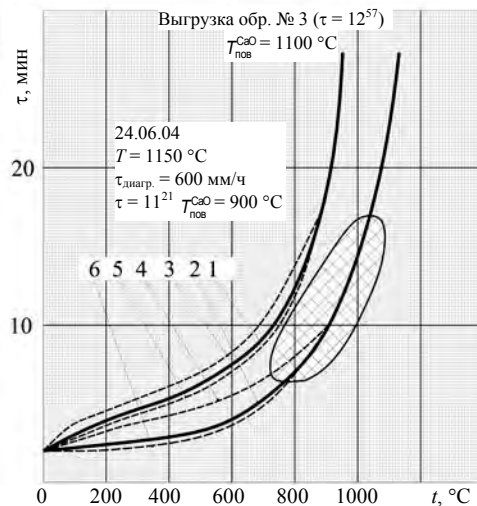


Рис. 2. Влияние температуры греющих газов  $t_{г.г}$  на время процессов производства извести (кусок размерами  $38 \times 38 \times 38\text{ мм}$ ): 1 и 2 –  $t^{u(n)}$  соответственно при  $t_{г.г} = 1150\text{ °C}$ ; 3 и 4 –  $t^{u(n)}$  соответственно при  $t_{г.г} = 1100\text{ °C}$ ; 5 и 6 –  $t^{u(n)}$  соответственно при  $t_{г.г} = 1220\text{ °C}$

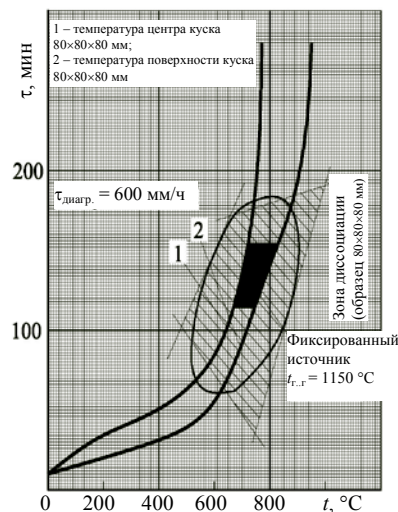


Рис. 3. Время нагревания куска шихты размерами  $80 \times 80 \times 80\text{ мм}$  (куб) при температуре греющих газов  $t_{г.г} = 1150\text{ °C}$

для кусков сырьевого материала  $\text{CaCO}_3$  размером  $d_{\text{экв}} = 60\text{--}90$  мм, изменения температуры греющих газов от 1080 до 1200 °С и выхода целевого материала от 82 до 94 %.

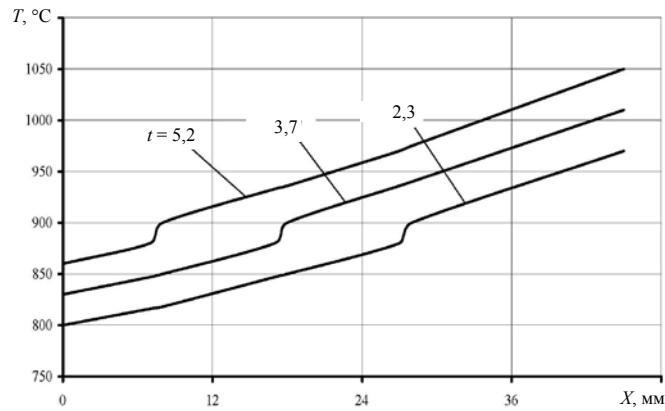


Рис. 4. Профили температуры внутри куска размером 90 мм при температуре обжига 1200 °С:  $t$  – время обжига, ч

Рис. 5. Зависимости времени обжига от содержания в куске извести и размеров куска известняка  $X$  при разных температурах в зоне обжига

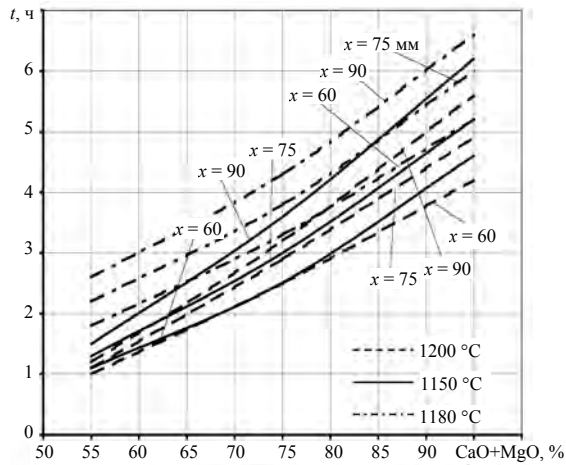


Таблица 3

**Влияние продолжительности обжига  $\tau$  на степень выхода извести (содержание  $\text{CaO} + \text{MgO}$ ) при температуре обжига 1150 °С**

Средний размер кусков кальцита $X_c = 50$ мм						
CaO + MgO, %	48,4	48,6	53,2	57,8	62,0	67,0
$\tau$ , ч	0,56	0,88	1,22	1,58	1,94	2,32
CaO + MgO, %	76,1	78,7	80,7	85,3	90,0	94,0
$\tau$ , ч	2,72	3,12	3,55	3,98	4,43	4,57
Средний размер кусков кальцита $X_c = 70$ мм						
CaO + MgO, %	48,4	48,6	53,2	57,8	62,0	67,0
$\tau$ , ч	0,72	1,09	1,47	1,87	2,29	2,71
CaO + MgO, %	76,1	78,7	80,7	85,3	90,0	94,0
$\tau$ , ч	3,15	3,61	4,07	4,55	5,05	5,36

Таблица 4

**Влияние среднего размера кусков кальцита  $X_c$  на продолжительность обжига  $\tau$  при температуре обжига 1150 °С**

Содержание CaO + MgO – 90 %						
$X_c$ , мм	40,0	44,2	48,3	52,5	57,0	61,0
$\tau$ , ч	0,98	1,22	1,48	1,76	2,04	2,34
$X_c$ , мм	65,0	69,2	73,3	77,5	82,0	86,0
$\tau$ , ч	2,66	2,98	3,32	3,68	4,05	4,25
Содержание CaO + MgO – 92 %						
$X_c$ , мм	40,0	44,2	48,3	52,5	57,0	61,0
$\tau$ , ч	1,26	1,54	1,84	2,15	2,47	2,80
$X_c$ , мм	65,0	69,2	73,3	77,5	82,0	86,0
$\tau$ , ч	3,16	3,52	3,90	4,29	4,70	5,06
Содержание CaO + MgO – 94 %						
$X_c$ , мм	40,0	44,2	48,3	52,5	57,0	61,0
$\tau$ , ч	1,47	1,78	2,10	2,44	2,79	3,15
$X_c$ , мм	65,0	69,2	73,3	77,5	82,0	86,0
$\tau$ , ч	3,53	3,92	4,33	4,75	5,18	5,30

Анализ результатов численного моделирования подтверждают тот факт, что для повышения выхода CaO + MgO (производительности печи обжига) увеличивать температуру в печи (увеличение расхода топлива) выше 1150 °С (рис. 6) не имеет смысла, так как это приводит только к росту расхода топлива. Это объясняется тем, что ограничивающим фактором при обжиге является термическое сопротивление слоя CaO, образующегося на поверхности куска CaCO<sub>3</sub>. При этом ускорение продвижения фронта диссоциации не происходит, эффект от незначительного роста  $\lambda_{CaO}$  в интервале температур 1150–1200 °С не компенсирует увеличение толщины наружного слоя CaO («шубки»). В результате эффект от интенсификации обжига за счет повышения температуры газов практически сводится только к росту удельного расхода топлива.

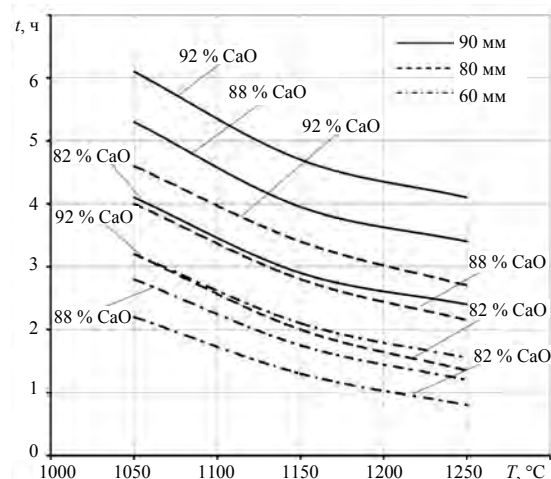


Рис. 6. Время обжига в зависимости от температуры греющих газов и степени диссоциации для кусков различных размеров

В то же время изменение температуры греющих газов в диапазоне от 900 до 1150 °С значительно влияет на время обжига, что позволяет использовать данный фактор при управлении процессом обжига (производитель-

ности печи). Как видно из графика на рис. 6, изменение температуры греющих газов с 1050 до 1150 °С приводит к снижению времени обжига куска

с эквивалентным размером 90 мм на 1,4 ч, а с 1150 до 1250 °С – менее на 0,5 ч. Однако снижение эквивалентного размера с 90 до 80 мм позволяет уменьшить время обжига  $\approx 30\%$ .

Результаты численного эксперимента подтвердили то обстоятельство, что предложенный и реализованный в виде машинной программы алгоритм, учитывая тонкости процессов, происходящих при обжиге кальцита  $\text{CaCO}_3$  и получении металлургической извести  $\text{CaO} + \text{MgO}$ , позволяет управлять этими процессами и оптимизировать параметры теплотехнологии обжига извести.

## ВЫВОДЫ

1. Результаты выполненного достаточно представительного натурального эксперимента позволили идентифицировать параметры математической модели и разработанной на ее базе компьютерной программы. Выполнен вычислительный эксперимент по оценке влияния на время обжига кальцита температуры греющих газов, размера куска обжигаемого материала и выхода целевого продукта. Полученные данные могут были использованы для оптимизации размеров зоны предварительного подогрева, обжига и других характеристик теплотехнологии обжига  $\text{CaCO}_3$ , реализуемой в шахтных печах.

2. Экспериментально и в ходе численного эксперимента исследовано влияние трех основных факторов (размера куска известняка, температуры греющих газов и процента выхода извести) на время процесса обжига. Показано, что при заданном проценте выхода готовой продукции наиболее сильное влияние на время процесса имеет размер фракции обрабатываемого материала. Тем самым подтверждено требование о необходимости предварительной подготовки сырья перед его подачей в печь (сортировка и разделение на фракции  $\pm 10\%$  среднего эквивалентного диаметра). Оптимизация параметров теплотехнологии обжига извести может обеспечить увеличение производительности печи на 10–20 %, снижение удельного расхода топлива – не менее чем на 5–10 %, снижение выбросов окислов азота – не менее чем 10–20 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. С е д н и н, В. А. Теплофизическая модель процесса обжига кальция / В. А. Седнин, А. Г. Кожевников, И. В. Мельников // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2004. – № 4. – С. 41–45.

2. С е д н и н, В. А. Расчет продолжительности обжига кусков  $\text{CaCO}_3$  / В. А. Седнин, А. Г. Кожевников, И. В. Мельников // Вестник БНТУ. – 2004. – № 5. – С. 53–57.

Представлена кафедрой  
ПТЭ и ТТ

Поступила 7.07.2006