

ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЙ ПРОИЗВОДСТВА МАРОЧНОЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ИЗВЕСТИ ДЛЯ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

И.Н. Белоглазов¹, В.О. Голубев², В.Е. Никольский², Б.С. Абезгауз²

¹ Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет), Санкт-Петербург

² ЗАО «Концерн «Струйные технологии», Санкт-Петербург

Указаны условия производства марочной металлургической извести, соответствующей стандартам ISO и EN, приведены результаты анализов и требования к химическому составу известняков, итоги испытаний реакционной способности извести, предложено объяснение кинетической сущности процесса диссоциации кускового известняка.

Российские металлургические предприятия, поставляющие свою продукцию за рубеж, заинтересованы в ее соответствии системам международных (ISO) и европейских (EN) стандартов. Химический и дисперсный состав, свойства сырья и вспомогательных материалов, используемых в производстве металла, также строго нормируются. Часто эти требования значительно отличаются от российской системы стандартов, и, порой, не совсем точно истолковываются специалистами.

Важным металлургическим материалом является известь, используемая в качестве шлакообразующего компонента в плавильных печах черной металлургии; в процессах спекания и плавки, гидрометаллургических переделах цветной металлургии. Ввиду больших объемов производства и специфических требований к извести, производители металла идут по пути включения известковых производств в структуру своих предприятий.

После того, как российские металлургические компании вышли на мировой рынок, возникла необходимость в пересмотре нормативных документов, регламентирующих качество извести. Сегодня единого стандарта на известь для конкретных технологических процессов или для выпуска определенной продукции в нашей стране не существует. Каждое предприятие разрабатывает технические условия на известь для своих нужд. При этом одни заводы продолжают опираться на отечественные стандарты, другие берут за основу европейские. Зачастую предъявляемые к извести требования не обеспечиваются возможностями существующего оборудования и качеством исходного сырья, и тогда предприятие становится перед необходимостью реконструкции производства или смены сырьевого поставщика.

Остановимся более подробно на вопросах производства кальциевой извести для черной металлургии. Основными ее потребителями в этом секторе являются конвертерное, электросталеплавильное и ферросплавное производства. Для первых двух выпускается известь марок ИС-1 и ИС-2, в ферросплавном производстве чаще других применяют известь марок ИФ-0 и ИФ-1. Требования отдельных заводов к этим маркам извести различаются и, порой, противоречат друг другу. Для того чтобы сгладить эти противоречия, в табл. 1 и 2 приведен усредненный химический и гранулометрический состав извести, который составлен с учетом особенностей производства и диапазона возможных изменений в составе сырья.

Для конвертерного и ферросплавного производств также ограничивается реакционная способность, которая не должна превышать 2 минут для извести марок «ИС-1» и «ИФ-0» и 5 минут для марок «ИС-2» и «ИФ-1».

Количество месторождений известнякового камня в России, из которого путем обжига может быть получена металлургическая известь надлежащего качества, весьма ограничено. У предприятий, переходящих на международные стандарты, выбор еще уже, т.к. многие из ранее пригодных месторождений по показателям состава и свойств известняка придется отсеять. Химические составы известняков, из которых может быть получена известь, удовлетворяющая требованиям табл. 1, зависят не только от состава сырья, но и от

степени превращения карбонатов кальция и магния в оксиды, взаимодействия образовавшихся оксидов с примесями, а, значит, от условий проведения обжига и типа применяемых обжиговых печей.

Таблица 1

Известь марок ИС-1, ИС-2, ИФ. Химический состав

Массовая доля, %	Норма марки «ИС-1»		Норма марки «ИС-2»		Норма марки «ИФ»	
	I сорт	II сорт	I сорт	II сорт	ИФ-0	ИФ-1
CaO + MgO, не менее	92	90	88	85	-	-
CaO _{общ}	-	-	-	-	95	93
CaO _{акт}	-	-	-	-	80	80
MgO, не более	6	6	6	6	1	3
SiO ₂ , не более	1,8	2,0	2,0	2,5	1,0	1,8
S, не более	0,06	0,08	0,08	0,08	0,03	0,05
P, не более	0,10	0,10	0,10	0,10	0,01	0,01
ППП ¹ , % не более	3,5	5	6	8	2,5	3,5

Таблица 2

Известь марок ИС-1, ИС-2, ИФ. Гранулометрический состав по видам производств

Наименование	Норма марки								
	«ИС-1»			«ИС-2»			«ИФ-0», «ИФ-1»		
	класс крупности, мм	ниже нижнего предела	выше верхнего предела	класс крупности, мм	ниже нижнего предела	выше верхнего предела	класс крупности, мм	ниже нижнего предела	выше верхнего предела
Конверторное производство	0-40	-	10	0-80	-	10	-	-	-
Электросталеплавильное производство*	5-60	10	10	0-80	10	10	-	-	-
Приготовление рафинирующих смесей	0-40	-	10	0-80	-	10	-	-	-
Производство ферросплавов	-	-	-	-	-	-	5-40	15	10

* В дуговых сталеплавильных печах также применяется порошкообразная известь марки ИСП, производимая на основе марок ИС-1 и ИС-2, имеющая крупность 0-5 мм, с ограничением на массовое содержание зерен свыше верхнего предела не более 10 %.

Известно, что из двух основных типов печей, используемых при производстве металлургической извести: шахтных и вращающихся, во вторых обеспечивается наименьшее остаточное содержание диоксида углерода в извести, т.е. наибольшая степень обжига. В тоже время, удельные затраты тепла на единицу продукции в них всегда выше, чем в шахтных печах, даже, если для интенсификации теплообмена используются подогреватели сырья и холодильники различных типов.

Остаточное содержание диоксида углерода в извести, полученной во вращающейся печи, составляет около 1 %, нередко достигая 0,5 % и менее. Случаи ведения процесса до полного обжига редки из-за опасности пережога извести. В отечественных шахтных печах старого образца, в основном, удается производить известь с остаточным содержанием CO₂ от 5 до 12 %. Иностранные производители шахтных печей такие, как: Maerz, RCE и Cimprogetti гарантируют содержание CO₂ в извести не более 2 %.

В представленных ниже таблицах указаны диапазоны химических составов сырья, из которого может быть произведена металлургическая известь важнейших марок. Дан-

¹ ППП – потери массы при прокаливании продукта, эквивалент остаточному содержанию углекислого газа.

ные табл. 3 относятся к обжигу известняка во вращающейся печи (остаточное содержание CO_2 после обжига составляет 0,5 %), а в табл. 4 – к обжигу в шахтной печи (остаточное содержание CO_2 в извести равно 2 %). Представленные значения получены обратным пересчетом, исходя из требуемых составов извести, и рекомендуются к использованию как минимально допустимые при разработке внутренних технических условий предприятий.

Таблица 3

**Известняк для производства извести марок ИС-1, ИС-2, ИФ во вращающейся печи.
Химический состав**

Массовая доля, %	Норма марки «ИФ»		Норма марки «ИС-1»		Норма марки «ИС-2»	
	ИФ-0	ИФ-1	I сорт	II сорт	I сорт	II сорт
CaO + MgO, не менее	54,7 - 54,8	53,9 - 54,1	53,3 - 53,8	52,6 - 53,1	52,6 - 53,1	51,9 - 52,5
MgO, не более	0,57 - 0	1,72 - 0	3,4 - 0,0	3,4 - 0,0	3,4 - 0,0	3,5 - 0,0
SiO ₂ , не более	0,56 - 0,57	1,03 - 1,04	1,04	1,16 - 1,17	1,16 - 1,17	1,17 - 1,18
R ₂ O ₃ , не более	1,56 - 1,55	2,16 - 2,32	2,65 - 2,8	3,77 - 3,91	3,77 - 3,91	4,96 - 4,97
S, не более	0,017	0,029	0,034	0,046	0,046	0,046
P, не более	0,0058	0,0058	0,057	0,058	0,058	0,058
Нерастворимый в HCl осадок, %, не более	0,67 - 0,68	1,23 - 1,24	1,30	1,45 - 1,46	1,45 - 1,46	1,46 - 1,48

Таблица 4

**Известняк для производства извести марок ИС-1, ИС-2, ИФ в шахтной печи.
Химический состав**

Массовая доля, %	Норма марки «ИФ»		Норма марки «ИС-1»		Норма марки «ИС-2»	
	ИФ-0	ИФ-1	I сорт	II сорт	I сорт	II сорт
CaO + MgO, не менее	55,8 - 55,9	54,9 - 55,2	54,3 - 54,9	53,7 - 54,3	53,0 - 53,6	52,0 - 52,5
MgO, не более	0,56 - 0,00	1,72 - 0,00	3,4 - 0,0	3,5 - 0,0	3,5 - 0,0	3,5 - 0,0
SiO ₂ , не более	0,16 - 0,10	1,03 - 1,04	1,03 - 1,04	1,1 - 1,2	1,17 - 1,18	1,48 - 1,50
R ₂ O ₃ , не более	0,16 - 0,10	0,38 - 0,35	0,87	1,92 - 1,73	3,00 - 3,05	4,49 - 4,65
S, не более	0,018	0,029	0,034	0,047	0,047	0,048
P, не более	0,0057	0,0058	0,057	0,058	0,059	0,060
Нерастворимый в HCl осадок, %, не более	0,22 - 0,24	1,22 - 1,24	1,29 - 1,30	1,32 - 1,5	2,06 - 1,48	1,82 - 1,85

В силу многих причин подбор качественного известнякового камня - трудоемкая задача. Это объясняется не только повышенными требованиями к химическому составу, но и другими причинами: особенностями транспортной инфраструктуры; ограниченным количеством компаний, добывающих флюсовый известняк; колебаниями состава в силу разработки различных пластов; занижением характеристик известняка в технических условиях карьера по отношению к фактически поставляемому из-за боязни рекламаций и др. В такой ситуации перед заключением договора поставки желательно проконсультироваться у специалистов или собственноручно проводить отбор проб и все необходимые анализы.

В ходе лабораторных испытаний был проанализирован химический состав 10 флюсовых известняков, поставляемых 6 горными предприятиями России и Украины. Результаты этой работы отражены в табл. 3, где каждый известняк помечен своей маркировкой. Производители известняка из соображений этики не называются.

Сравнивая таблицы 3,4 и 5, можно заметить, что примерно половина из выбранных известняков может быть использована для получения извести марки ИС-2 (любой сорт) и ИС-1 (сорт 2) в печах обоих типов. Весьма узок ассортимент известняков, пригодных для выпуска 1 сорта марки ИС-1. Производить известь для ферросплавов марки ИФ-1 смогут только те предприятия, которые располагают вращающимися печами. Особняком в нашем исследовании оказалась марка извести ИФ-0, для выпуска которой не подошла ни одна из

проб. Большинство известняков заняло низкие позиции из-за высокого содержания серы (табл. 6).

Таблица 5

Химический состав флюсовых известняков

Наименование показателя	Результаты испытаний									
	Д1-1	Д1-2	К1-1	К1-2	П1-1	П1-2	Ж1-1	Ж1-2	Р1-1	К2-1
Массовая доля, %										
CaO + MgO, не менее	53,3	54,1	54,2	54,8	54,4	53,3	53,9	54,4	53,6	55,5
MgO, не более	0,48	0,55	0,56	0,42	0,61	0,51	0,28	0,27	0,94	0,42
SiO ₂ , не более	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 0,5	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1,49	0,51
S, не более	0,056	0,025	0,049	0,019	0,039	0,060	0,038	0,023	0,03	0,06
P, не более	0,002	0,003	0,004	0,004	0,001	0,001	0,001	0,002	0,03	0,003
Массовая доля нерастворимого в HCl осадка, % не более	0,47	0,18	0,33	0,19	1,30	1,40	0,48	0,75	1,86	0,66

Таблица 6

Пригодность известняков к обжигу

Марка известняка	К1-2		Д1-2		Ж1-2		П1-1		Ж1-1		Р1-1		К2-1		К1-1		Д1-1		П1-2	
	В	Ш	В	Ш	В	Ш	В	Ш	В	Ш	В	Ш	В	Ш	В	Ш	В	Ш	В	Ш
ИФ-0																				
ИФ-1	+		+		+															
ИС-1 (1 сорт)	+	+	+		+															
ИС-1 (2 сорт)	+	+	+	+	+	+	+	+	+											
ИС-2 (1 сорт)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+										
ИС-2 (2 сорт)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+								

Результаты исследования наводят на мысль, что известковое производство металлургического завода должно работать на нескольких компонентах сырья, а в число технологических операций могут входить шихтовка и усреднение известняка на складе. При таком подходе появится больше возможностей для использования известняков с повышенным содержанием серы, но большей долей полезных оксидов в смеси с малосернистыми.

Химический состав исходной породы – не единственная характеристика, принимаемая во внимание при оценке возможности обжига в печах с получением заданных свойств. С разных сторон на работе обжиговой печи сказывается фракционный состав известняка, влияя на кинетику протекающих реакций, скорость продвижения материала и газораспределение.

Во вращающихся печах мелкие куски известняка располагаются внутри пересыпающегося слоя и движутся по укороченным траекториям, в результате чего время пребывания частицы материала с крупностью в 2 раза меньше среднего размера оказывается в 4 раза выше. В тоже время, приходящий в центр слоя тепловой поток, значительно ниже, чем на поверхности, из-за чего известковая мелочь выходит из печи недостаточно обожженной [1]. По этим причинам рекомендуется выдерживать отношение характерных размеров крупной и мелкой фракций в составе сырья не более 2 раз, а перед загрузкой осуществлять отсев мелкой крошки из известняка во избежание образования намазки в печи.

Заметные изменения в последнее время произошли во взглядах на дисперсный состав сырья для шахтных печей, т.к. удалось решить две главные проблемы обжига материала в плотном слое: преодолеть высокое гидравлическое сопротивление слоя при работе на мелких фракциях, а также неравномерность загрузки и выгрузки породы. Применяемые сегодня винтовые компрессоры для подачи воздуха выдерживают перепады давлений в шахтной печи вплоть до 20 кПа, благодаря чему стал возможен обжиг известняка с крупностью 10-20 мм [2]. В тоже время, рекомендуемое отношение размеров крайних фракций

(не более 2 раз) не изменилось. Сегрегация материала по крупности и неравномерность заполнения по сечению (для скиповых подъемных устройств) устраняется использованием нескольких отклоняющих лотков, поворотных воронок и многоконусных загрузочных устройств [3, 4]. Проблема же, связанная с устранением различия в скоростях выгрузки материала в сечении печи отечественным шахтным печам, оборудованным разгрузчиком кареточного типа или механизмом Антонова, в большинстве не свойственна, чего нельзя сказать о некоторых иностранных системах выгрузки.

Пристальное внимание при подборе известняка и режима обжига следует уделять реакционной способности извести, которая зависит от кристаллической структуры известняка, размеров зерен, содержания примесей, но, наиболее существенно на реакционной способности металлургической извести сказывается температура, достигаемая материалом в процессе обжига. С ростом температуры происходит укрупнение кристаллов извести, усиливается взаимодействие примесей со свободными оксидами (происходит пережог) и, как следствие, снижается реакционная способность [5]. Допустимая температура обжига, таким образом, является опосредованной характеристикой, присущей известняку.

Металлургическая известь нуждается в «мягком» обжиге, протекающем при низких температурах. В тоже время излишнее снижение температуры обжига влечет повышенный расхода топлива, усложнение конструкции печи и стоимости ее сооружения. Поэтому значительную экономию капитальных и эксплуатационных затрат может обеспечить выбор известняка, обладающего высоким порогом спекаемости. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

В нашей стране, как и в Европе, металлургическую известь принято анализировать методами, используемыми в строительной отрасли (ГОСТ 22688-77 и EN 459-2), хотя в методиках конкретных испытаний существуют различия [6, 7]. Способ определения реакционной способности извести является одним из таковых.

В стандарте EN 459-2 под реакционной способностью (скоростью гашения извести водой) подразумевается отрезок времени, за который температура реагирующей смеси достигает 60 °С, а в ГОСТ 22688-77 за длительность гашения принимают время с момента добавления воды до начала периода, когда рост температуры не превышает 0,25 °С в минуту, т.е. до достижения максимальной температуры реагирующей смеси. Несоответствие в этом понятии часто приводит к ошибкам в толковании свойств извести и гарантируемых показателей ее качества между российскими и зарубежными партнерами. Поэтому целесообразно в ходе исследования реакционной способности также провести сопоставление результатов анализов по этим альтернативным методикам.

Поскольку руководящих документов по проведению контрольных обжигов известняка найти не удалось, стоит кратко пояснить суть испытаний. Для их проведения отбирались куски известняка, массой от 70 до 100 г. Они помещались в муфельную печь, где выдерживались при фиксированной температуре в течение 8 часов, – времени, достаточного для полного завершения диссоциации карбонатов и равномерного прогрева куска на всю глубину до температуры муфеля. После выемки и охлаждения в эксикаторе выполняли анализ реакционной способности параллельно по ГОСТ 22688-77 (общее время) и DIN/EN 459-2 (до достижения температуры 60 °С). Обжиг проводился при температурах от 900 до 1300 °С в трех повторных опытах.

Анализам были подвергнуты известняки с маркировками К1-2, Д1-2, Ж1-2 и П1-1, по химическому составу удовлетворяющие требованиям к производству металлургической извести марки ИС-1 в печах обоих типов (табл. 6). Результаты работы, представленные в виде графиков на рис. 1, дают представления о влиянии температуры обжига на реакционную способность продукта. По ним несложно определить и рекомендуемую температуру обжига известняка, гарантирующую получение извести со скоростью гашения менее 2 мин (для марки ИС-1, 1 сорт) и менее 5 мин (для марки ИС-1, 2 сорт). Результаты этих вычислений помещены в табл. 7.

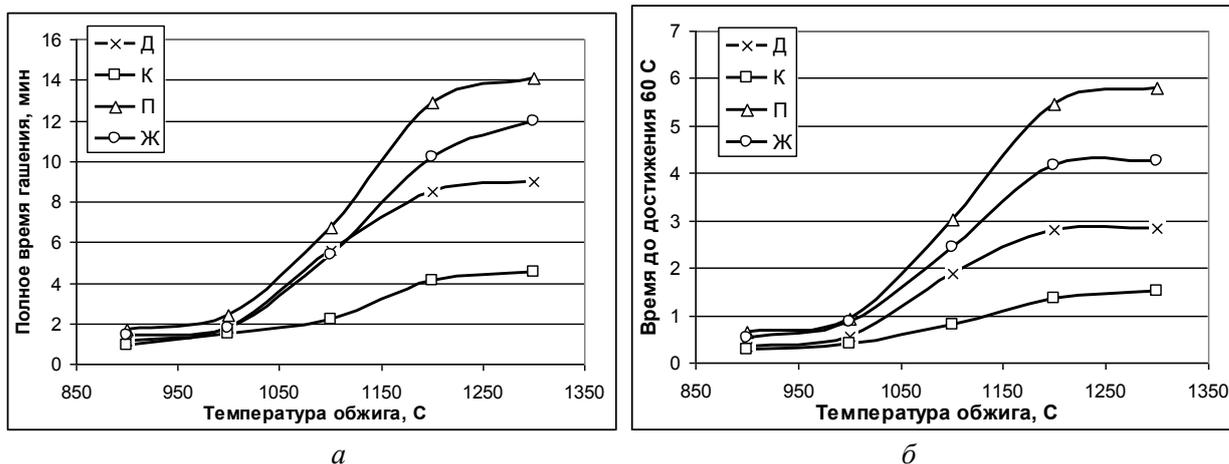


Рис. 1. Показатели времени гашения извести разных месторождений в зависимости от температуры обжига:
 а по ГОСТ 22688-77, б – по DIN/EN 459-2; Д – Д1-2, К – К1-2, П – П1-1, Ж – Ж1-2.

Таблица 7

Средняя температура обжига для получения извести марки ИС-1

Проба	Температура обжига, °С, не более	
	ИС-1, 1 сорт $\tau_{\text{react}} = 2$ мин	ИС-1, 2 сорт $\tau_{\text{react}} = 5$ мин
К1-2	1083	> 1300
Д1-2	1001	1091
Ж1-2	1010	1081
П1-1	943	1056

Отметим, что температура обжига для получения извести марки ИС-1 для первого сорта на 70-100 градусов ниже, чем для 2-го сорта. С повышением концентрации примесей в исходном известняке четко прослеживается тенденция к увеличению длительности гашения извести водой, что лишний раз подчеркивает важность химической чистоты сырья.

В проведенных опытах за счет удлинения выдержки достигался полный обжиг известняка и равномерный прогрев камня на всю глубину. При обжиге в реальных условиях поле температур по радиусу куска неравномерно. Наружный слой камня подвергается воздействию высоких температур омывающих его печных газов и падающего излучения, температура же во фронте реакции (при условии неполного завершения обжига), как показали наши численные расчеты, не превышает 920 °С [8]. Поэтому в случае с кусковым материалом, который находится в печи при разных температурах и разное время, прогнозировать реакционную способность извести необходимо для каждой печи индивидуально.

Математические описания нагрева и диссоциации кускового известняка довольно разнообразны. Известны модели С.Ф. Крылова, П.В. Гельда и В.К. Иванова, Б.И. Китаева, Н.П. Табунщикова, В.Г. Пивоварова. В работе [9] была предложена модель, с помощью которой можно рассчитывать распределение температур внутри куска, продвижение фронта диссоциации внутрь гранулы при нестационарных граничных условиях.

Кинетика обжига известняка является главным вопросом, решаемым при разработке концепции печи, системы отопления и назначении диапазонов регулирования. По отношению к грануле различают внутреннюю и внешнюю задачи обжига. Менее всего изучена внутренняя задача. Исследования показали, что обжиг известнякового камня протекает в нескольких кинетических областях, сменяющих друг друга в зависимости от того, какой из трех процессов: собственно химическая кинетика, теплопередача или диффузия становится лимитирующим.

Следует отметить, что существующие мнения о лимитирующих стадиях диссоциации гранулы известняка разнятся. Так, Моффат и Валмсли [10], подвергая обжигу гранулы размером 2-25 мм пришли к выводу, что при размере 2-6 мм обжиг лимитируется химической реакцией, а у гранул более крупного размера либо теплопереносом (при температурах до 1100 °С), либо массопереносом (при более высоких температурах). Гарсиа-Лабiano (Garcia-Labiano) показал, что у 90 мкм – 6 мм частиц обжиг лимитируется химической кинетикой и массообменом [11]. Ху и Скарони (Hu и Scaroni) решили, что у частичек размером более 20 мкм присутствуют все три стадии [12]. Хинаст (Khinast) заметил, что лимитирующей стадией является химическая реакция или массообмен в зависимости от размера частицы и парциального давления CO₂ [13].

Натурные исследования обжига кусков известняка размером 20-80 мм были проведены в муфельной печи, куда кусок помещался на подвесе из платиновой проволоки. Измерение текущей массы образца осуществлялось непрерывно. Для опытов отбирались пробы с различным содержанием полезных оксидов и примесей. В качестве примера на рис. 2 помещены результаты относительного изменения массы у двух проб: КЗ-1 (0,55 % MgO, 0,61 % инертных примесей) и УЗ (1,5 % MgO, 8,35 % примесей).

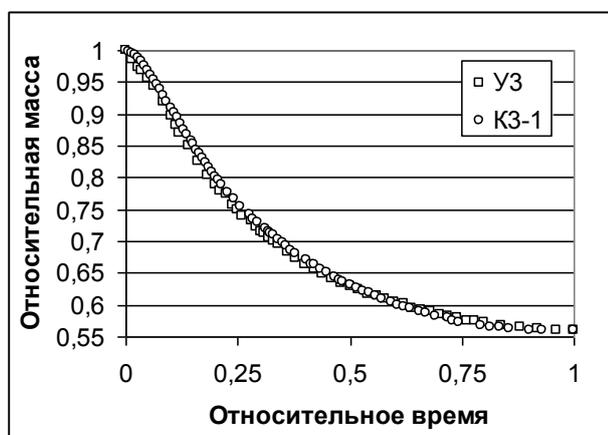


Рис. 2. Сравнение скорости убыли массы у известняков.

Несмотря на то, что известняки КЗ-1 и УЗ имели различную крупность (40 и 50 мм соответственно), различный химический состав и обжигались при разных температурах (1100 и 1000 °С соответственно), кривые убыли массы у них практически совпали. Это указывает на общность механизмов, лимитирующих обжиг.

Для оценки лимитирующих стадий обжига применена безразмерная модель Моффата и Валмсли [10]. Запишем относительные координаты x и y кинетики обжига для разных лимитирующих стадий:

- для стадии химической реакции (рис. 3а) $x = t/t_{\max}, \quad y = 1 - (1 - \psi)^{1/3};$
- для стадий тепло- и массообмена (рис. 3б) $x = t/t_{\max}, \quad y = 1 - 3(1 - \psi)^{2/3} + 2(1 - \psi),$

где ψ - объемная степень диссоциации (отношение объема разложившегося известняка к объему гранулы).

Абсцисса графика, изображенного на рис. 3а, пропорциональна радиусу куска, входит в уравнение химической кинетики. Пока относительное время разложения не достигнет значений 0,6-0,65, этот график аппроксимируется уравнением прямой (исключение составляет стартовый период, когда росла температура в печи). В тоже время, кривая на рис. 3б, отвечающая квадрату радиуса, не соответствует прямолинейной зависимости. На основании этого можно сделать вывод, что в начальный период разложения куска толщина оболочки оксидов у поверхности мала, и лимитирующей стадией процесса является химическая реакция. С дальнейшим течением времени график на рис. 3б становится прямолинейным, в то время как график на рис. 3а отклоняется от прямой, что говорит о

смене лимитирующей стадии на теплообменную или диффузионную. В период изменения лимитирующей стадии обжиг завершён на 80-85 %.

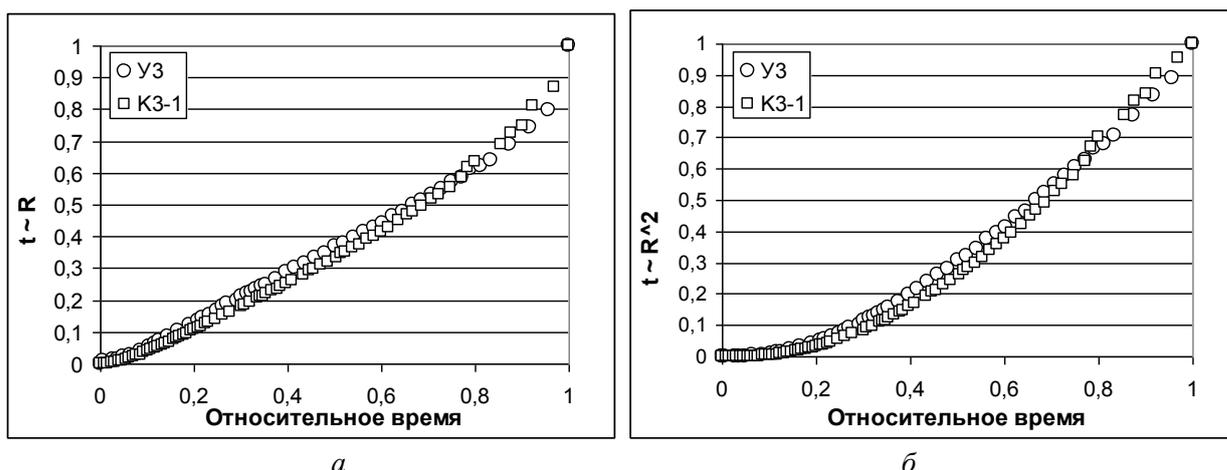


Рис. 3. К оценке лимитирующих стадий обжига гранулы:
а – для стадии химической кинетики; б – для стадии тепло- и массопереноса.

Одинаковая квадратичная зависимость от радиуса не позволяет таким же образом распознать, теплообменная или диффузионная стадия лимитирует завершающий период. Соотношение между скоростями теплообменного и диффузионного процессов определено с помощью критерия Льюиса. Значение коэффициента взаимной диффузии углекислого газа и воздуха для условий протекания реакции диссоциации в куске известняка оценивалось расчетным путем по известной методике [14]. Среднее значение коэффициента диффузии составило $2,89 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$. Теплопроводность извести λ [Вт/(м·К)] при температурах 850-1150 °С определялась по формуле

$$\lambda = 0,0087t - 7,17.$$

Теплоемкость извести c [Дж/(кг·К)] в диапазоне температур 273-1473 К рассчитывалась по формуле

$$c = 886,7 + 8,078 \cdot 10^{-2} t - 1,24 \cdot 10^{-7} t^{-2}.$$

Расчет показывает, что значение $Le = 1$ соответствует температуре 868 °С, при более высоких температурах лимитирующим процессом становится диффузия CO_2 в порах оболочки.

Значения энергии активации и предэкспоненциального множителя в уравнении константы скорости реакции оказались близки и, в среднем, составили: $E_a = 121,2 \text{ кДж/моль}$; $k_{s0} = 1.145 \cdot 10^4 \text{ моль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Рассчитанные значения коэффициентов диффузии отличались довольно существенно, и составили: $7,28 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ для пробы УЗ и $4,18 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ для пробы К1-3. Эти данные были использованы при выполнении численных расчетов на модели, описанной ранее [9].

Таким образом, качество металлургической извести обеспечивается обоснованным выбором сырья надлежащего химического и гранулометрического состава, и индивидуализированным подбором оборудования. При выборе печи и назначении тепловых режимов необходимо руководствоваться результатами контрольных обжигов известняка и анализов реакционной способности извести. Только комплексный учет всех этих факторов позволяет производить марочную металлургическую известь, соответствующую мировым стандартам.

Литература

1. Лисиенко В.Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология. Кн.1 / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев. М.: Теплотехник, 2004. – 688 с.
2. Maerz and RCE lime kilns. RCE calcining and sintering technology. Zurich: Maerz. – 2004. – 16 p.
3. Тарасов, В.П. Загрузочные устройства шахтных печей / В.П. Тарасов. – М.: Metallurgia, 1974. – 312 с.
4. Пат. РФ. Загрузочное устройство шахтной печи / Ф.-Й. Ирних. – № 2241183; опубл. 27.11.2004.
5. Boynton, R.S. Chemistry and technology of lime and limestone / R.S. Boynton. – New York: John Wiley & Sons, 1966.
6. ГОСТ 22688-77. Известь строительная методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 9 с.
7. DIN/EN 459-2: 2002 Building lime – Part 2: Test methods. – 21 p.
8. Голубев, В.О. Оптимизация режима работы и конструкции шахтной печи известкового производства черной металлургии: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.16.02 / В.О. Голубев. – СПб: СПГИ(ТУ), 2007. – 20 с.
9. Голубев В.О. Математическая модель диссоциации одиночной гранулы карбоната кальция / В.О. Голубев, И.Н. Белоглазов // Записки горного института, 2006. Т. 169. С. 104-107.
10. Moffat, W. Understanding lime calcinations kinetics for energy cost reduction / W. Moffat, M.R.W. Walmsley // 59th Appita Conference. – Auckland, 2006.
11. Adanez, J. Modelling for the High-Temperature Sulphation of Calcium-Based Sorbents with Cylindrical and Platelike Pore Geometries / J. Adanez, F. Garcia-Labiano, V. Fierro // Chemical Engineering Science, 2002. – Vol. 57. – Issue 13.
12. Hu, N. Calcination of Pulverized Limestone Particles Under Furnace Injection Conditions / N. Hu, A.W. Scaroni // Chem. Eng., 1996. – Vol.75. – № 2. – P. 177-186.
13. Khinast, J. Decomposition of Limestone: The Influence of CO₂ and Particle Size on the Reaction Rate / J. Khinast [et al] // Chem. Eng., 1996. – Vol. 51. – № 4. – P. 623-634.
14. Лыков, А.В. Теплообмен: Справочник / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1972. – 560 с.