

МОДЕРНИЗАЦИЯ И ОТРАБОТКА РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДВУХШАХТНОЙ ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОТОЧНОЙ РЕГЕНЕРАТИВНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ОБЖИГА ИЗВЕСТНЯКА ТИПА PFR

В.В. Мадисон², В.Т. Рязанов¹, А.А. Набоких¹,
С.С. Шульгин¹, И.В. Кинер³, А.Н. Кудрявцев³

¹ОАО «ВНИИМТ» (г. Екатеринбург, Россия)

²ООО «Научно-производственное предприятие Урализвесть-М»
(г. Екатеринбург, Россия)

³ОАО «Первоуральский новотрубный завод»
(г. Первоуральск, Россия)

Результаты освоения режимов обжига на известковообжиговой печи типа PFR после ее технического перевооружения показали возможность достаточно эффективно обжигать также и известняки, имеющие качественные и прочностные характеристики ниже заявленных разработчиком печи. Получена мягкообожженная известь с активностью $(CaO+MgO)_{акт}$ не менее 92–94 % и удельным расходом природного газа в зависимости от типа известняка и производительности в пределах 105–115 м³/т извести.

Ключевые слова: производство извести, шахтная печь типа PFR, техническое перевооружение, пусковая горелка, режимы обжига.

The study of burning conditions in a PFR lime shaft kiln after its re-equipment has shown the possibility of a sufficiently effective burning of limestone possessing quality and strength characteristics which are lower than those specified by the kiln manufacturer. The produced soft-burnt lime has $CaO+MgO$ activity of at least 92–94 % and natural gas burning rate varying from 105 to 115 m³ per ton of lime depending on the type of lime and productivity.

Keywords: lime production, PFR-limes haft furnace, technical re-equipment, start-up burner, firing conditions.

Для удовлетворения потребности в качественной извести электростале-плавильного комплекса ОАО «ПНТЗ» (входит в группу компаний «ЧТПЗ») турецкая фирма «HALILYILMAZ Makina» в 2008 г. разработала базисный инжиниринг и поставила оборудование и футеровочные материалы для строительства двухшахтной параллельно-поточной регенеративной печи типа НУМ PFR (производительность до 300 т/сут). Монтаж оборудования и футеровки осуществлен в 2011 г. В декабре того же года компанией «LUCKS Feuerfesttechnik GmbH» (г. Мюльхайм, Германия) было проведено обследование смонтированного огнеупора в целях определения качества монтажа и оценки рисков при запуске и эксплуатации печи для обжига известняка. В результате обследования отмечен ряд критических конструктивных ошибок, по причине которых огнеупоры могут быть существенно повреждены уже в течение первого года эксплуатации, а некоторые из них могут вызвать разрушение колонн, арок или шахты во время нагрева. Ошибки связаны в основном с поставкой и использованием некоторых несоответствующих типу печи фасонных изделий, нарушениями технологии кладки и геоме-

трии отдельных зон печи, повреждением мертеля и бетона вследствие их заморозки, произошедшей дообжига печи. Частичная замена неправильно установленных участков футеровки невозможна. Специалистами компании «LUCKS Feuerfesttechnik GmbH» было рекомендовано полностью поменять кладку, либо запускать печь, но быть готовыми к ее быстрому разрушению. При запуске печи отмеченные недостатки футеровки в сочетании с проявившимися проблемами в системе контроля и управления пусковой горелкой привели к частичному нарушению целостности кладки в районе переточного и кольцевых каналов и арочных систем. ОАО «ПНТЗ» было принято решение о полной замене футеровки.

В связи со сменой сырьевой базы, особенностями организации производства и условиями эксплуатации, в предпусковой и пусковой период сформировался ряд изменений в требованиях к технологическому процессу и оборудованию, к сетям инженерно-технического обеспечения, к АСУ ТП и т.д.

ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники – ВНИИМТ» (генеральный подрядчик) и ООО «НПП «Урализвесть-М» по техническому заданию ОАО «ПНТЗ» разработали технологический регламент на техническое перевооружение, в котором обоснованы основные технологические, режимные, конструктивные и организационные решения. Реализация решений, принятых в регламенте, обеспечила запуск печи в промышленную эксплуатацию с выводом на необходимые режимы производства извести и технико-экономические показатели.

В процессе технического перевооружения были внесены изменения в проект и заменена часть поставленного оборудования печи, не соответствующего климатическим условиям, произведена теплоизоляция трубопроводов системы гидроприводов, дымоходов, скорректированы параметры узлов разбавления дымовых газов перед тканевыми фильтрами и ряд других работ, не связанных непосредственно с конструкцией печи PFR и технологией обжига.

Далее представлены результаты технического перевооружения печи PFR, обжига ее футеровки, розжига и освоения технологических режимов в реальных условиях производства и сырьевой базы.

Футеровка шахт печи

Масса футеровочных материалов на печь превышает 500 т. Физико-химический анализ и исследования огнеупорных характеристик изделий, примененных на печи типа НУМ PFR ОАО «ПНТЗ», показал, что имеются отечественные аналоги для замены поврежденной футеровки. Главная проблема заключалась в том, что в конструкции футеровки используется свыше 40 видов фасонных изделий достаточно сложной формы, в частности, с замковыми соединениями, воспроизведение которых ограниченными партиями экономически нецелесообразно.

Наиболее напряженной в тепловом отношении и сложной по конструкции частью печи (рис. 1) является зона переточного 1 и кольцевых 2 каналов, арок 3, поддерживающих цилиндрические стенки 4, отделяющие зоны обжига от кольцевых каналов и перекрытия 5 переточного и кольцевых каналов. Все эти элементы конструкции первично были выполнены с применением

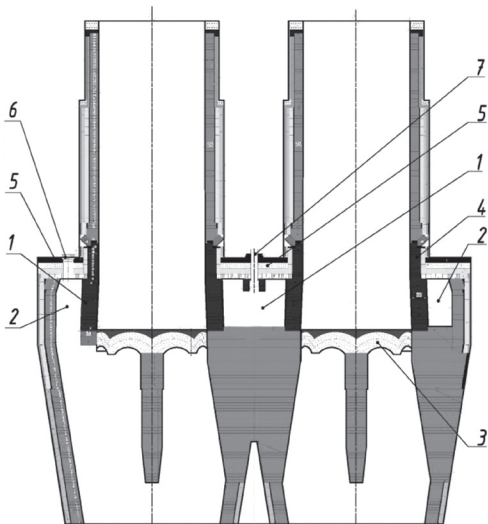


Рис. 1. Общий вид футеровки шахт печи.
Усл. обозначения см. в тексте

замковых соединений фасонных изделий между собой, что должно было удерживать конструкцию от горизонтальных деформаций. Однако анализ характера разрушений кладки в этой зоне печей при авариях, вызванных нарушением схода шихты и локальным перегревом, показывает, что замковые соединения не способны противостоять боковому давлению шихты при ее термическом расширении. Цилиндрическая стенка, не имеющая никакой поддержки со стороны кольце-

вого канала, крупными блоками выдавливается в кольцевой канал. При этом арки деформируются, из них выпадают отдельные кирпичи, и они теряют несущую способность.

Подготовлена рабочая документация на замену футеровки с применением отечественных материалов, не уступающих по основным характеристикам оригинальным. Доля нестандартизированных фасонных изделий специального заказа минимизирована, в основном, это блоки перекрытия переточного и кольцевых каналов. Для уменьшения бокового давления шихты на цилиндрическую стенку проектом предусмотрено незначительное плавное расширение шахты от мораторного кольца вниз до арок переточного канала. Кладка в этой зоне печи произведена на СВС-мертеле КР-ХП1 с покрытием поверхности укрепляющей обмазкой М-1 (производство ООО «Мавр»).

В целях упрочнения перекрытия кольцевых каналов сокращено количество шуровочных отверстий *b* до восьми на каждую шахту (по одному на каждую арку переточного канала), что достаточно для визуального контроля за состоянием этой напряженной в тепловом отношении зоны и производства рыхления шихты в случае сварообразования.

Срок службы примененных огнеупорных материалов так же, как и в оригинальном варианте существенно зависит от соблюдения определенного технологией температурного режима – прежде всего недопущения перегревов и нештатных теплосмен.

Разработанные графики разогрева, сушки и обжига кладки, а также алгоритмы их реализации с использованием пусковой горелки, оборудования КИП и возможностей АСУ ТП согласованы с поставщиками огнеупорных изделий.

Узел загрузки известняка

В загрузочный бункер загружается до 4500 кг известняка. После открытия заслонки загрузочного бункера известняк по наклонной течке и короткой вертикальной трубе диаметром 1 м с высокой скоростью поступает в верх-

ную часть одной из шахт печи. По первоначальной схеме материал распределяется по поверхности засыпи неравномерно, что отрицательно сказывается на газодинамике процесса. Существующие в практике решения в виде расположенного в вертикальной части загрузочной трубы стабилизатора-отбойника и распределительного стационарного конуса на выходе из нее ситуацию не исправляют. По всей высоте шахты формируются сектора с повышенной и пониженной газопроницаемостью, вследствие чего воздух горения (и соотношение газ–воздух) распределяется неравномерно по сечению.

Для повышения равномерности распределения фракций по сечению шахты вместо стационарного распределительного конуса в нижней части вертикальной трубы был установлен (рис. 2) вращающийся распределительный лоток 1 с приводом от мотор-редуктора 2, скорость вращения – до 0,5 об/с. На выходе материала из загрузочного бункера предусмотрен ограничительный шибер для обеспечения времени выгрузки материала в печь в течение 15–25 с, за которые лоток совершает 7–10 оборотов, распределяя известняк равномерно по окружности шахты. При этом практически исключается фракционная неравномерность по секторам, что подтверждается равномерностью поля давлений (разрежений) по горизонтальным сечениям шахты печи.

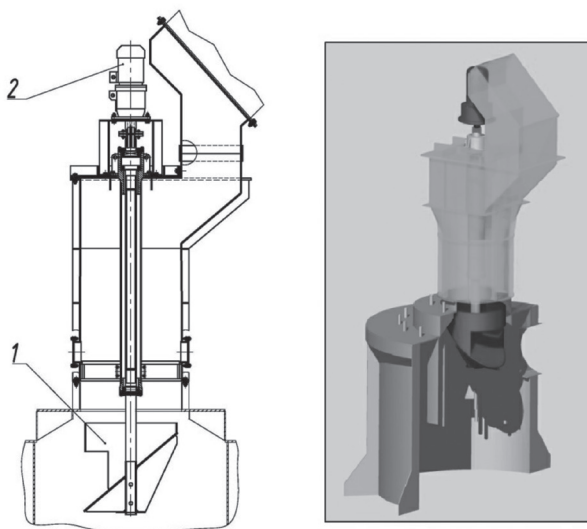


Рис. 2. Загрузочное устройство известняка.
Усл. обознач. см. в тексте

Контроль теплового и газодинамического состояния печи

В первоначальном варианте печи тепловое состояние контролировалось по показаниям двух термопар и пирометра, установленных в переточном канале и фиксирующих температуру газов, перетекающих из одной шахты в другую и температуру поверхности футеровки переточного канала. Также контролировалась температура отходящих газов и температура извести на выгрузке. Давление (разрежение) измерялось в переточном канале в верхней и нижней частях печи. Для ведения процесса обжига в стационарном режиме при работе печи на сырье требуемых гранулометрических и прочностных параметров и номинальной производительности этой информации минимально достаточно.

Необходимость реализации и поддержания тепловых, температурных и газодинамических режимов получения качественной извести в широком диапазоне изменения производительности (150–300 т/сут), на сырье с повышенным содержанием мелких фракций и повышенной разрушаемостью потребовала более подробной информации о распределении температур и давлений (разрежений) по высоте и горизонтальному сечению печи.

В дополнение к имеющимся средствам измерения в канале, на колошнике шахт печи, на выгрузке, а также по тракту дымовых газов и на газоочистке установили закладные для отбора импульсов давления (разрежения) и закладные для термопар (всего 16 термопар и 16 устройств отбора импульсов). Дополнительные средства измерения установлены в каждой шахте на горизонте +400 мм от мораторного кольца и на горизонте нижнего среза газовых сопел. Термопары установлены по четыре в каждом ярусе: над переточным каналом, на противоположной стороне и между этими точками. Закладные для установки термопар выполнены из жаропрочной стали, вварены в корпус печи и вмурованы в огнеупорную футеровку таким образом, чтобы рабочий спай находился на границе футеровки и материала в печи. Информация о температурах и давлении (разрежении) поступает на АРМ оператора. На период розжига, сушки, обжига футеровки и разогрева печи до рабочих температур устанавливались дополнительные термопары в кольцевых каналах шахт в точках, противоположных переточному каналу. Закладные для установки этих термопар вваривались в крышки шуровочных люков. При необходимости эти термопары (вместе с крышками) переставлялись в другие люки. Информация о температуре определялась переносным прибором.

В программном обеспечении предусмотрена сигнализация для оператора:

- по температурам: два уровня (устанавливаемых при наладке), первый – допустимое значительное отклонение, второй – предельное отклонение;
- по давлениям (разрежениям) – предельный перепад между точками в одном ярусе и между точками отбора друг под другом (в разных ярусах).

Печь типа PFR оснащена воздуходувками, обеспечивающими давление до 40–50 кПа. Такого давления достаточно для преодоления локальных сопротивлений, возникающих в местах концентрации мелкой фракции, в образующихся сварах и по другим причинам, вызванным недостаточной фракционной подготовкой сырья, повышенной разрушаемостью при высоких температурах, наличием глинистых и сланцевых примазок и т.п.

При сохранении общего на печь расхода дутья происходит перераспределение его по сечению обратно пропорционально сопротивлениям в отдельных участках. Природный газ распределяется по сечению намного более равномерно, поскольку подается на сопла под давлением на порядок выше давления воздуха. Возникают зоны с различным соотношением газ–воздух и соответственно с различными температурами, которые в одних участках приводят к пережогу и даже к сварообразованию, в других – к недожогу. Такая дифференциация практически никак не отражается на температуре газа в переточном канале, поскольку последняя является усредненной по сечению и высоте шахты. Возможность контроля полей давлений (разрежений) и температур в объеме печи позволила оперативно отслеживать возникновение и развитие аномальных зон и принимать меры, направленные на стабилизацию состояния.

Опыт наладки режимов на минимальных производительностях показал, что вследствие низкой скорости схода материала и пониженного расхода топлива зона выгорания природного газа несколько сужается, а температуры в ней возрастают. Вышеупомянутая дифференциация теплового состояния в горизонтальном сечении на низкопроизводительных режимах иногда приводила к образованию зон с температурами, при которых прогорали жаропрочные закладные термопар, перегорали сами термопары, имеющие рабочую температуру до 1300 °С.

Пусковая горелка

Согласно первоначальному проекту пусковая горелка, установленная в специальное отверстие в перекрытии переточного канала (рис. 1, поз. 7), в соответствии с регламентом должна быть демонтирована после розжига печи. Она не имеет устройств розжига и контроля факела и, соответственно, не оснащена автоматикой безопасности. Контроль расходов воздуха и природного газа на горелку мог быть осуществлен только по показаниям штатных расходомеров, рабочий диапазон которых рассчитан на режим обжига и, соответственно, почти на порядок превышает требуемый для пусковой горелки. Таким образом, достоверной информации о расходах газа, воздуха и их соотношению получить, как правило, не удается. Переточный канал, где установлена пусковая горелка и сопряженные с ним кольцевые каналы, и арочные системы до 600–700 °С должны разогреваться с ограниченной скоростью плавно во избежание термических ударов и механических деформаций. Штатная пусковая горелка была не приспособлена для решения данных задач. В случае необходимости подогрева материала в печи до температуры воспламенения природного газа после остановки, которыми изобилует период пуска-наладки, штатную горелку вновь необходимо монтировать на печь, что создает определенные неудобства.

Для решения всех указанных выше задач была изготовлена и установлена стационарная пусковая горелка (рис. 3) максимальной тепловой мощностью 2,5 МВт, оборудованная устройствами электророзжига, контроля пламени и автоматикой безопасности. В корпус горелки встроены пирометр, который позволяет контролировать температуру кладки в переточном канале как в период работы горелки (на розжиге печи), так и при отключенной горелке в основном режиме работы печи. Для предохранения горелки и объектива пирометра от пере-

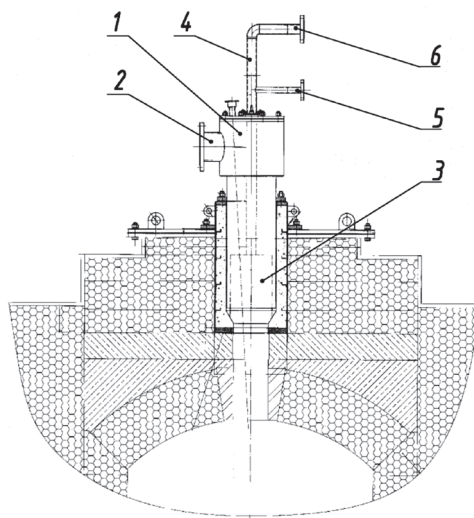


Рис. 3. Пусковая горелка:
1 – корпус с воздушным патрубком; 2 – воздушный патрубок; 3 – огневая камера;
4 – газовое сопло; 5 – патрубок первичного газа; 6 – патрубок вторичного газа

грева во всех режимах работы печи производится их обдув небольшим количеством воздуха. Предусмотрена возможность пуска горелки как в ручном режиме с местного пульта, так и дистанционно с АРМ оператора. Природный газ на газовую стойку пусковой горелки поступает с ГРП печи. Воздух подается от резервной воздуходувки системы охлаждения фурм.

Поступающий в горелку воздух разделяется на два потока. Первичный воздух через распределительные патрубки поступает в огневую камеру, а вторичный воздух проходит по кольцевому зазору между обечайками корпуса и огневой камеры, охлаждает последнюю и далее истекает из горелки.

В режиме сушки футеровки и шихтового материала (удаления физической влаги) и прогрева до 350–400 °С первичный газ смешивается с первичным воздухом и сгорает в огневой камере. На выходе из огневой камеры первичные продукты сгорания смешиваются с потоком вторичного воздуха и образовавшийся теплоноситель с температурой от 100–150 до 450 °С истекает из горелки в переточный канал.

В режиме разогрева шихты и футеровки от 350–400 °С до рабочих температур (950–1100 °С) в горелку дополнительно подается вторичный газ, который догорает в факеле в объеме переточного канала.

В АСУ ТП предусмотрен автоматический вывод печи на рабочий режим в соответствии с заданными графиками и соблюдением ограничений по максимальной скорости разогрева и максимальным температурам.

Газовые сопла

Природный газ поступает в коллектор газовых сопел каждой шахты после регулирующего дросселя с давлением не менее 2–2,5 бар и за счет калиброванных отверстий в каждом сопле распределяется равномерно на каждое из 25 сопел, обеспечивая, таким образом, равномерность распределения топлива по горизонтальному сечению зоны обжига. Воздух, поступающий на горение сверху сквозь слой известняка, где он подогревается до 700–800 °С, должен быть распределен по сечению шахты также равномерно. Соответственно соотношение «газ–воздух» и температуры сгорания также будут примерно одинаковыми по сечению. Более или менее равномерное распределение воздуха возможно при использовании прочного, откалиброванного известняка, не склонного к механическому и температурному разрушению в печи. Так как используемый известняк не в полной мере соответствует данным требованиям, в шахте печи возможно формирование зон как с повышенной, так и с пониженной температурой из-за различия в соотношении «газ–воздух». Поскольку механизма перераспределения воздуха по сечению шахты нет, для выравнивания температур перед каждым соплом установлен ручной регулирующий дроссель с линейной характеристикой, посредством которого возможно корректировать расход газа, контролируя его по показаниям также дополнительно установленного показывающего манометра.

Система подогрева воздуха

Установленные на печи роторно-поршневые воздуходувки фирмы «AERZEN» по своему исполнению не рассчитаны на работу при температуре нагнетаемого воздуха ниже –10 °С. Разница между температурой горячего,

нагревшегося вследствие сжатия отходящего от роторного блока воздуха, и холодного воздуха на входе приводит к неприемлемым напряжениям в корпусе вентилятора и к образованию трещин.

Воздуходувки расположены в специальном здании, забор воздуха производится с улицы. Для обеспечения безаварийной работы воздуходувок необходимо обеспечить подогрев максимум 37000 м³/ч воздуха (при –40 °С) на 35–40°.

В ходе технического перевооружения к шести воздухозаборным окнам со стороны улицы вдоль стены пристроен распределительный коллектор сечением около 1,5 м². Перед ним установлена камера сгорания с теплогенератором, отапливаемым природным газом максимальной мощностью 0,6 МВт с собственным воздушным вентилятором первичного воздуха. Вторичный воздух подсасывается воздуходувками и смешивается в смесительном коллекторе с продуктами сгорания природного газа в атмосфере первичного воздуха. Температура смеси контролируется и поддерживается на заданном уровне в автоматическом режиме. Содержание кислорода в смеси не ниже 20,6 %, содержание оксидов углерода и азота не превышает допустимых норм. Теплогенератор снабжен собственным шкафом управления, устройствами электророзжига и контроля факела, автоматикой безопасности, датчиком и регулятором температуры нагретого воздуха. Информация о состоянии и параметрах работы теплогенератора передается на АРМ оператора. Работа установки подогрева воздуха осуществляется только в зимнее время при температуре воздуха ниже –5 °С. При температуре воздуха во внутреннем коллекторе на всасе воздуходувок –5 °С подается светозвуковой сигнал на пульте оператора печи о необходимости включения системы подогрева воздуха. Оператор производит розжиг горелки в режиме ручного управления. Температура воздуха во внутреннем коллекторе на всасе воздуходувок автоматически поддерживается около 0°С регулированием расхода газа. Общий расход природного газа на печь при этом не увеличивается, так как нагретый воздух передает свою энергию в форме физического тепла материалу в печи, уменьшая расход топлива на сопла на соответствующую величину.

Недостатки сушки и обжига футеровки печи, заполненной известняком

Сушка – удаление физической влаги (150–200 °С) и последующее удаление гидратной влаги (400–550 °С) должны производиться в соответствии с имеющимися для различных огнеупоров и мертелей графиками. Особо ответственным этапом является реализация графика разогрева и выдержки при температуре синтеза СВС-мертеля (950–1000 °С).

В соответствии с руководством по эксплуатации печи НУМ PFR процесс сушки и обжига футеровки должен был производиться в печи, заполненной известняком. Известняк, загруженный в печь, имеет массу одного порядка с массой огнеупоров и, как правило, достаточно высокую (от 2 до 7 %) влажность. Необходимость разогрева всей массы известняка до соответствующих температур с заданной скоростью, затраты тепла на испарение его влаги крайне затрудняют реализацию требуемых графиков обжига – подвод тепла локальный, в месте расположения одной или нескольких горелок, а поверхности, на которых должен соблюдаться режим, рассредоточены в объеме

и изолированы от источника тепла известняком. Также сложно (или даже невозможно) контролировать температуру именно огнеупорной кладки, а не какую-то интегральную.

В начальный период процесса сушки, особенно в холодное время года, происходит не процесс испарения влаги, содержащейся в известняке и кладке, а напротив, конденсации влаги, образующейся при сжигании природного газа (до двух кубометров пара на каждый кубометр сожженного природного газа). Конденсат стекает по стенкам, вымывает отдельные компоненты непросушенного и необожженного мертеля, что далее сказывается на прочности швов.

Также в процессе разогрева печи с известняком во избежание слеживания, образования сваров и для обеспечения достаточной газопроницаемости необходимо производить разгрузку с минимальной производительностью и одновременно догрузку, что вносит эффект похолодания в шахту печи.

Кроме того, пока полностью не прошли процессы дегидратации и спекания мертелей и прочность швов еще невелика, возможны горизонтальные смещения кладки вследствие бокового давления известняка, которое многократно увеличивается в процессе его разогрева и температурного расширения при замедленной выгрузке.

Таким образом, сушку и обжиг футеровки целесообразно производить на печи, свободной от шихтовых материалов.

Процесс сушки

Процесс сушки осуществлялся установленными в один из люков на уровне разгрузочного стола переносными газовыми горелками (по одной на шахту), оборудованными устройствами розжига и контроля факела.

Обжиг (удаление гидратной влаги) и инициация высокотемпературного синтеза СВС-мертеля

Шахты обжигались поочередно с помощью пусковой горелки. Обжигаемая шахта заполнялась мелкой фракцией известняка на 1,5–2 м от разгрузочных столов для предохранения их от высокотемпературного излучения из шахты во время высокотемпературного обжига. Для охлаждения газовых сопел к ним по временной схеме подводился компрессорный воздух. Для разбавления отходящих газов в верхней части печи в целях снижения их температуры до значений, допустимых для нефутерованной верхней части печи, использовался «воздух горения», который подавался в шахту по штатной схеме. Удаление газов из шахты осуществлялось посредством временного дымохода Ø700 мм, врезанного в кожух в основании нефутерованной части печи и выведенного за пределы ограждения площадки. В течение всего периода обжига футеровки пусковая горелка работала на максимальном расходе воздуха 2400–2600 м³/ч (поступающим от резервной воздухоудвки «воздух охлаждения фурм»). Температура теплоносителя – продуктов сгорания от пусковой горелки – регулировалась в диапазоне от 300 до 1200 °С в автоматическом режиме в соответствии с графиком разогрева только за счет изменения расхода природного газа. «Воздух горения» (на охлаждение верха печи) подавался в количестве, не допускающем повышения температуры отходящих газов более 300 °С. По завершению

синтеза СВС-мертеля горелка и вентиляторы подачи воздуха отключались. Временный дымоход перекрывался листом-заглушкой, труба перемонтировалась на вторую шахту. Шахта остывала естественным образом при полностью закрытых отверстиях, по достижении температуры в нижнем ярусе термопар порядка 450 °С открывались люки на уровне механизма выгрузки и отверстие временного дымохода, охлаждение продолжалось за счет естественной тяги.

Обжиг второй шахты производился аналогичным образом.

Наладка режимов и гарантийные испытания

В период пуска и нескольких месяцев отработки режимов на ОАО «ПНТЗ» использовались известняки трех месторождений, существенно отличающихся по прочностным, физико-химическим характеристикам и по оптимальному для обжига температурному интервалу, определенному в лабораторных условиях. Так, известняк Тургойского месторождения имеет высокую прочность на сжатие, при нагреве до температуры обжига разрушается незначительно, оптимальная температура его обжига выше на 100–120 °С, чем температура обжига известняка Крылосовского месторождения, который при лучшей обжигаемости имеет значительно худшие прочностные характеристики. При его обжиге образуется больше мелкой фракции извести. Известняк Михайловского месторождения как по температурному интервалу обжига, так и по прочностным характеристикам находится между названными известняками. Перевод печи с одного вида известняка на другой производился в экстренном порядке в связи с перебоями в поставках. Производительность печи была ограничена собственными потребностями, поскольку в тот период не было технической возможности реализации избытков извести на сторону или накопления ее в пределах предприятия и колебалась в пределах 150–200 т/сут, что составляет от 1/2 до 2/3 от максимальной паспортной производительности печи.

На всех известняках были отработаны режимы в указанном выше интервале производительностей с получением мягкообожженной извести с активностью $(\text{CaO} + \text{MgO})_{\text{акт}}$ не менее 92–94 % и удельным расходом природного газа в зависимости от типа известняка и производительности в пределах 105–115 м³/т извести.

Гарантийные испытания были проведены на известняке Михайловского месторождения при производительности извести 200 т/сут. Активность $(\text{CaO} + \text{MgO})_{\text{акт}}$ составила 93 % и удельный расход природного газа 105 м³/т извести.

Вследствие работы на пониженной производительности время пребывания материала в высокотемпературной зоне печи возросло с 7–8 до 12–16 ч, в течение которых в соответствии с технологией печи PFR происходит нагрев поверхности кусков в периоды обжига и охлаждение в периоды регенерации с циклом около 12 мин и амплитудой колебания температуры газов около 500 °С. Отсюда повышенная разрушаемость извести и выход мелкой фракции (особенно Крылосовского и Михайловского месторождений), снижение газопроницаемости отдельных зон печи и, как следствие, локальные перегревы, получение пережога в одних секторах печи и недожога в других.

Печь PFR обладает очень большой тепловой инерционностью, что является следствием как большой массы обрабатываемого материала, так и особенностями тепломассообменных процессов, определяющих протекание диссоциации карбоната кальция. К поверхности каждого куска необходимо провести конкретное количество газа-теплоносителя, имеющего высокую температуру. Интенсивность процесса подвода газа ограничивается газопроницаемостью слоя.

Скорость проникновения тепла от поверхности куска внутрь ограничена значением коэффициентов теплопроводности известняка и в особенности образовавшегося на поверхности куска слоя извести, который постоянно увеличивается. Проникновению тепла внутрь куска также противодействует встречный поток образующегося диоксида углерода, масса которого составляет до 44 % от массы известняка и который уносит значительную долю поступающего с поверхности тепла.

Перечисленные обстоятельства и определяют тепловую инерционность агрегата. Время переходного процесса, т.е. установления более или менее стабильного состояния после нанесения управляющего или возмущающего воздействия (изменения расхода газа, скорости выгрузки и т.д.), составляет не менее 3–4 сут.

Подстраивая производительность печи под часто меняющиеся потребности, иногда приходилось резко увеличивать или сокращать производство на 30–50 т/сут. Оказалось, что даже незначительные (на 10–12 %) резкие изменения производительности, особенно в сторону ее повышения, приводят к существенным и длительным расстройством теплового состояния. Приложение управляющего воздействия – увеличения расхода топлива – носит локальный характер, температуры вблизи среза газовых фурм резко возрастают, иногда превышают допустимые для данного известняка значения, что приводит к сварообразованию или разрушению кусков.

Для обеспечения безаварийной работы печи с получением извести стабильно высокого качества процессы перевода печи из одного режима в другой (соответствующий той или иной режимной карте по производительности и типу известняка) необходимо производить постепенно, в соответствии с инерционными характеристиками печи. Для этого необходимо увеличить емкость бункера готовой продукции, в котором следует производить накопление извести в случае резкого сокращения ее потребления и, если это сокращение достаточно длительное, плавно снижать производительность печи. И наоборот, если возникает потребность в увеличении производительности печи, повышать ее плавно, без скачкообразных изменений параметров, а дополнительную потребность в извести до окончания переходного процесса удовлетворять за счет накоплений в бункере.

Существуют проблемы с поставкой известняка. Периодически и, как правило, неожиданно приходилось переводить печь с одного известняка на другой, зачастую с существенно отличающимися свойствами и характеристиками. Склад известняка не приспособлен для приема и отдельного хранения известняков. На складе новый известняк сгружается на остатки старого. В итоге в печь поступает смесь в неопределенном соотношении различных известняков. Например, температурный интервал обжига у Тургоякского известняка примерно на 100 °С выше, чем у Крылосовского. Соответственно,

при обжиге смеси происходит либо недожог Тургоряжского, либо пережог и сварообразование Крылосовского известняка. Такая ситуация продолжается по нескольку суток. При организации приема и раздельного хранения известняков резкий перевод с одного вида известняка на другой может быть реализован в короткое время без аварийных ситуаций и существенных потерь качества и производительности.

Выводы

1. Известково-обжиговая печь типа PFR является высокотехнологичным агрегатом, обеспечивающим высокое качество обжига известняка при минимально возможном удельном расходе топлива при строгом соблюдении требований разработчика печи к физико-химическим, прочностным характеристикам сырья, к его фракционной подготовке и очистке от примесей и примазок.

2. Дооборудование печи дополнительными устройствами контроля параметров и управления ими, разработка и внедрение соответствующих алгоритмов и ограничений по динамике процесса, установка модернизированной пусковой горелки и проведение тщательной режимной наладки позволяют достаточно эффективно обжигать на этой печи также и известняки, имеющие качественные и прочностные характеристики ниже заявленных разработчиком печи.

3. В случае необходимости перепутеровки печей типа PFR могут быть успешно применены отечественные огнеупорные и связующие материалы с минимальным количеством фасонных изделий индивидуального изготовления при условии строго регламентированного процесса их сушки и обжига.