

удк

А.В. НЕСТЕРОВ¹, доцент, канд. техн. наук, генеральный директор (anest126@mail.ru);
 Д.О. ДАТУКАШВИЛИ², генеральный директор

¹ ООО «КИАНИТ» (196105, г. Санкт-Петербург, пр. Юрия Гагарина, 1)

² ООО «МАГМА инжиниринг» (174411, Новгородская обл., г. Боровичи, ул. Александра Невского, 10)

Производство кальциевой извести в России

Приведен обзор производства кальциевой извести в России в шахтных и вращающихся печах различной конструкции. Даны основные технические характеристики печей, работающих на газовом топливе для обжига различных видов карбонатного сырья. Рассмотрены новые технические решения, позволяющие выполнить модернизацию печей с целью повышения сортности извести, производительности печей и снижения расхода топлива. Представлены новые решения по устройству энергосберегающей футеровки шахтных и вращающихся печей, позволяющие более чем в два раза уменьшить потери тепла через кожух печи. Рассмотрены различные конструкции горелочных устройств, загрузочных и разгрузочных узлов шахтных и вращающихся печей. Затронуты вопросы правильной эксплуатации печей и выбора оптимального режима обжига. Перечислены основные критерии, по которым выбирается тип и конструкция печей для обжига известняка или мела.

Ключевые слова: известь, известняк, мел, шахтная печь, вращающаяся печь.

Для цитирования: Нестеров А.В., Датукашвили Д.О. Производство кальциевой извести в России // *Строительные материалы*. 2017. № 3. С. 52–59.

A.N. NESTEROV¹, Docent, Candidate of Sciences (Engineering), General Director (anest126@mail.ru); D.O. DATUKASHVILI², General Director

¹ ООО «КИАНИТ» (1, Yuriya Gagarina Avenue, St. Petersburg, 196105, Russian Federation)

² ООО «MAGMA engineering» (10, A. Nevskogo Street, Borovichi, Novgorod Oblast, 174411, Russian Federation)

Production of High-Calcium Lime in Russia

A review of production of high-calcium lime in Russia in shaft and rotary kilns of different design is presented. Main technical characteristics of kilns operating on gas fuel for burning of different types of carbonate raw materials are given. New technical decisions which make it possible to modernize kilns in order to improve the lime grade, increase the productivity of kilns and reduce the fuel consumption are considered. New solutions on making the energy saving lining of shaft and rotary kilns which make it possible to reduce the heat loss through the kiln casing more than twice are presented. Various designs of burner devices, loading and unloading nodes of shaft and rotary kilns are considered. Issues of the correct operation of kilns and selection of the optimal roasting conditions are addressed. Main criteria for selection of the type and design of kilns for limestone or chalk burning are listed.

Keywords: lime, limestone, chalk, shaft kiln, rotary kiln.

For citation: Nesterov A.N., Datukashvili D.O. Production of high-calcium lime in Russia. *Stroitel'nye Materialy* [Construction materials]. 2017. No. 3, pp. 52–59. (In Russian).

Кальциевая известь производится из известняка или мела, содержащих не более 5% карбоната магния. Обжиг этих карбонатных пород осуществляется в шахтных или вращающихся печах при температуре 1000–1250°C с получением извести [1]. Реакция разложения карбоната кальция (известняка) эндотермическая, для получения 1 кг CaO требуется 3185 кДж тепла. Теоретически для получения 1 кг извести I сорта с активностью 94% требуется 2994 кДж (715 ккал) тепла, что равноценно сжиганию 0,089 м³ природного газа, или 0,102 кг усл. топлива. При обжиге карбонатных пород в промышленных печах расход тепла существенно больше и составляет:

- для шахтных печей 840–1050 ккал/кг;
- для вращающихся печей 1400–1600 ккал/кг.

Кальциевая известь применяется во многих отраслях промышленности и сельского хозяйства. Крупнейшими потребителями извести являются металлургические предприятия и строительная отрасль. Основные направления применения извести:

- в металлургии при выплавке стали для удаления соединений фосфора, серы и других примесей требуется 70 кг высокорекреационной извести I сорта на 1 т металла;
- в строительной отрасли для производства силикатных изделий (кирпича и газобетонных блоков) в сырьевую массу добавляют 7–10% извести II или III сорта; для производства сухих строительных смесей и полимерцементных материалов используется гашеная известь в количестве 3–8%;
- в химической промышленности известь используется для производства кальцинированной соды, кар-

бида кальция, хлорной извести, бертолетовой соли, синтетического каучука и др.;

- в горно-металлургической отрасли известь применяется для обогащения рудных полезных ископаемых (минералы железа, меди, золота, алюминия, марганца и др.);
- в пищевой промышленности – для производства сахара, соды;
- в различных отраслях промышленности – для очистки сточных вод и дымовых газов.

Качество извести (ГОСТ 9179–77 «Известь строительная») определяется следующими параметрами:

- активность (содержание активных CaO+MgO);
- содержание непогасившихся зерен (н. з.);
- остаточное содержание CO₂, степень декарбонизации;
- время и температура гашения.

Кроме того, при производстве извести в печах на газовом топливе важны следующие экономические показатели:

- расход топлива (природного газа);
- расход электроэнергии;
- стоимость добычи и подготовки сырья (известняка, мела);
- капитальные затраты;
- затраты на обслуживание и ремонт.

Анализ себестоимости извести показывает, что основные затраты (≈70%) приходятся на сырье и топливо, причем расходы на технологическое топливо могут составлять 50% и более, 15–20% составляют амортизационные отчисления и затраты на ремонт оборудования, все остальные расходы не превышают 10–15% себесто-

Таблица 1

Характеристики	Производительность, т/сут			
	50	100	150	200
Диаметр печи, м наружный внутренний	3,2 2	4,5 3,2	4,8 3,6	5,7 4,4
Высота шахты печи, м общая от разгрузочного квадрата до нижнего яруса между нижним и верхним ярусами ПГ от верхнего яруса ПГ до нижнего среза дымоотвода от дымоотвода до верхней крышки печи	20–22 4–6 – 8–10 3–4	20–22 4–6 2–3 10–12 2,5–3	20–24 4–6 2–3 10–12 2,5–4	22–24 4–6 2–3 10–12 2,5–4
Строительная высота печи, м	34	37	37	37–40
Удельный расход газа***, м ³ /т	115–130	110–125	120–130	120–130
Температура извести на выгрузке, °С	80	120	120	120
Температура дымовых газов, °С	180–200	180–230	180–230	180–230
Активность извести (СаО+МgО), %	87–91*	86–89* 82–84**	Нет данных	
Остаточное содержание СО ₂	2,5–3	3–3,5	Нет данных	
Примечания: * Известняк Касимовского месторождения. ** Известняк Угловского известкового комбината. *** Низшая теплота сгорания газа 33620 кДж/м ³ .				

имости [2]. Отсюда следует, что снижение стоимости сырья и расхода топлива являются наиболее важными задачами при производстве извести.

Обжиг известняка и мела осуществляется в шахтных или вращающихся печах. Тип и конструкция печей определяются в первую очередь качеством исходного сырья.

В шахтных печах обжигаются твердые породы известняка узкой фракции с размерами кусков не менее 30–40 мм. Чаще всего используют фракции 40–80 и 70–140 мм. Прочность известняка должна быть не менее 30 МПа. Не обжигаются в шахтных печах карбонатные породы, подверженные растрескиванию при нагревании, а также известняки, склонные к образованию в печи сваров (спеков).

Преимущества шахтных печей:

- относительно низкий расход топлива;
- компактное размещение печи на небольшой площади;
- высокая степень обжига (95–98%);
- длительный срок службы футеровки (до 8 лет).

Недостатки:

- необходимость использования узкой фракции известняка;
- повышенные требования к качеству известняка.

Шахтные печи имеют производительность от 40 до 250 т/сут.

Во вращающихся печах обжигаются мягкие породы известняка в виде узких фракций менее 50 мм либо меловой шлам с влажностью до 40%.

Преимущества вращающихся печей:

- большая единичная мощность;
- высокая степень обжига (95–98%), мало зависящая от качества сырья;
- возможность обжига мелких фракций;
- возможность обжига известняка и мела низкой прочности.

Недостатки:

- повышенный удельный расход топлива;
- срок службы футеровки меньше, чем в шахтных печах (менее трех лет);

– значительный пылевынос и соответственно большие затраты на аспирацию;

– большие капиталовложения, большая металлоемкость агрегатов.

Вращающиеся печи имеют производительность от 250 до 1000 т/сут.

Шахтные печи для производства извести

В настоящее время в России эксплуатируются шахтные печи, построенные в 1970–1990-х гг., которые хорошо себя зарекомендовали на протяжении многих десятилетий и стабильно выпускали и выпускают сейчас комовую известь II и III сорта.

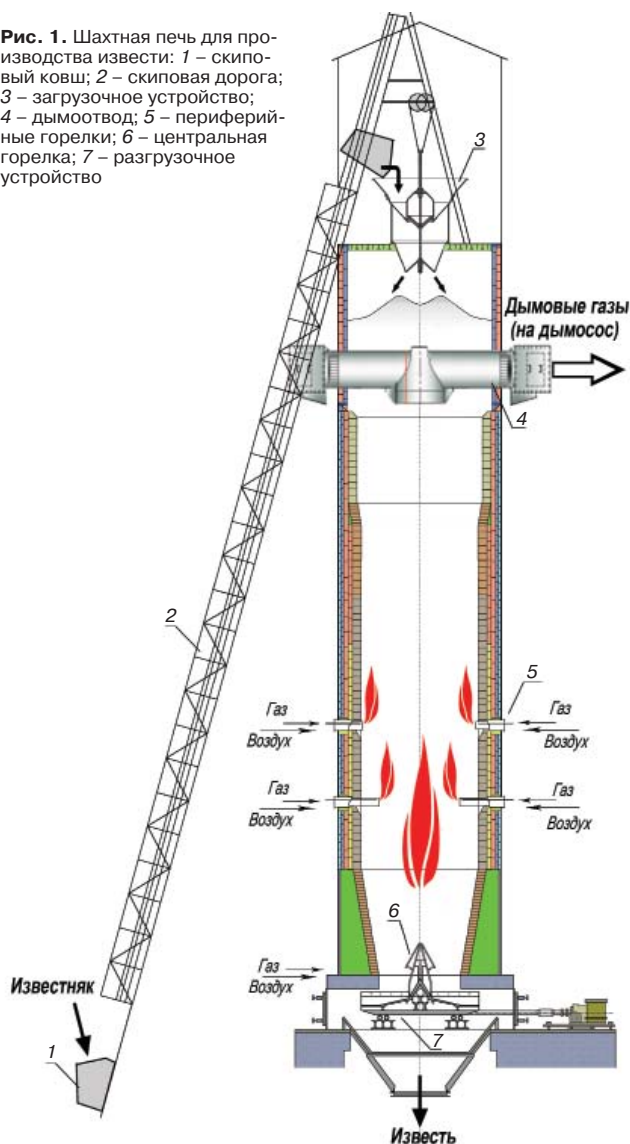
Ранее большинство производителей выпускали известь III сорта с активностью 70–75% и остаточным содержанием СО₂ 6–10%. Однако в настоящее время требования к качеству извести повысились. Многие зарубежные производители предлагают экономичные шахтные печи, позволяющие получить известь I и II сорта с остаточным содержанием СО₂ 1,5–2,5% (активность 85–95%).

Кроме того, важным показателем качества извести является время ее гашения. Для разных потребителей требуется разное время гашения. Поэтому возможность регулировать глубину обжига и время гашения (реактивность) извести является важным преимуществом современных известеобжигательных печей.

За последние десятилетия некоторые российские производители извести приобрели современные шахтные печи западных компаний, таких как Мерц (Maerz), Чимпроджетти (Cimprogetti), СИК (SiC), Терруцци Феркалькс (Terruzzi Fercalx) и др. Эти печи характеризуются низким расходом топлива, высоким качеством продукции. Однако стоимость возведения таких печей в несколько раз выше стоимости современных шахтных печей российского производства.

Многие предприятия пошли по пути реконструкции существующих шахтных печей и получили результаты, сравнимые с западными технологиями при существенно меньших затратах [3]. В России успешно

Рис. 1. Шахтная печь для производства извести: 1 – скиповый ковш; 2 – скиповая дорога; 3 – загрузочное устройство; 4 – дымоотвод; 5 – периферийные горелки; 6 – центральная горелка; 7 – разгрузочное устройство



работают шахтные печи, построенные в последние десятилетия по проектам российских компаний.

Основным преимуществом цилиндрических противоточных шахтных печей является простота их конструкции, экономичность, однако производительность шахтной печи ограничена максимальным диаметром 4–5 м, что соответствует максимальной производительности 200–250 т/сут (табл. 1). На предприятиях известковой промышленности обычно устанавливают не менее двух шахтных печей для обеспечения гибких условий производства и возможности вывода одной из печей на ремонт.

Рассмотрим современные решения, позволяющие получить известь I и II сорта на шахтных печах российского производства. Схема шахтной печи производительностью 100 т извести в сутки представлена на рис. 1.

Известняк фракции 70–140 мм из расходного бункера подается в бункер-дозатор, где происходит его взвешивание. После набора необходимого веса (700–900 кг) загрузка известняка останавливается, набранный вес фиксируется системой АСУТП и известняк выгружается в скиповый ковш (1).

Далее известняк скиповым подъемником по скиповой дороге (2) поднимается к верхней части печи и загружается в печь через герметичный двухклапанный загрузочный механизм (3). Загрузочный механизм рабо-

тует следующим образом: известняк из скипового ковша высыпается в загрузочную воронку, затем верхний клапан открывается и известняк пересыпается в промежуточную камеру; после закрытия верхнего клапана открывается нижний клапан и известняк высыпается в печь.

Загрузка известняка в печь осуществляется автоматически по специальному алгоритму, позволяющему поддерживать постоянный уровень материала в печи и выдерживать равномерную загрузку известняка.

В печи известняк медленно проходит через различные зоны шахты, постепенно превращаясь в известь. Условно можно выделить три зоны:

- зона загрузки и предварительного нагрева известняка;

- зона обжига известняка;

- зона охлаждения и выгрузки извести.

В верхней части загрузочной зоны размещен дымоотвод (4), через который из осевой зоны печи удаляются отработанные газы. Благодаря специальной конструкции дымоотвода соблюдается симметричный профиль движения дымовых газов и уменьшается влияние пристенного эффекта. Поэтому горячие отработанные газы равномерно поднимаются по всему поперечному сечению печи, обеспечивая равномерный обжиг известняка.

В зоне предварительного нагрева, расположенной вверху печи, известняк нагревается от восходящего потока горячих газов и поступает в зону обжига нагретым до 900–950°C. Температура отходящих дымовых газов в зависимости от обжигаемой фракции и высоты шахты составляет 180–230°C.

В зоне обжига установлено два яруса периферийных горелок (5) по 8–12 горелок в каждом ярусе, защищенных фурмами и вынесенными внутрь печи. Через горелочные устройства топливо и воздух для горения подаются в слой известняка. Воздух подается в недостаточном количестве, необходимом только для охлаждения фурм, поэтому полное сгорание топлива происходит внутри слоя известняка.

Внутри футеровки установлены датчики разрежения и температуры, которые регистрируют интенсивность обжига и обеспечивают безопасность управления печью.

После прохождения зоны кальцинации известь поступает в зону охлаждения. Здесь холодный воздух, идущий снизу печи, охлаждает известь.

В нижней части печи установлена центральная горелка (6) и охлаждаемая воздухом балка (6). Подача воздуха в балку позволяет охлаждать балку и известь, которая обтекает ее в нижней части печи. В верхней части балки установлено устройство ввода газа (центральная горелка). Газ, поступающий в центральную горелку, воспламеняется в зоне первого яруса печи. Температура на центральной балке не превышает 200–400°C и автоматически регулируется подачей воздуха и разрежением на дымососе.

В зоне выгрузки температура извести регистрируется встроенными пирометрами. Температура выгружаемой извести поддерживается в пределах 80–120°C.

Выгрузка извести осуществляется за счет возвратно-поступательного движения колосниковой решетки (7). Живое сечение решетки и размеры разгрузочных окон подбираются исходя из фракции известняка и гранулометрического состава производимой комовой извести.

Известь выгружается в приемный бункер, который разгружается автоматически или оператором по мере его заполнения.

Рассмотрим работу основных узлов и механизмов печи.

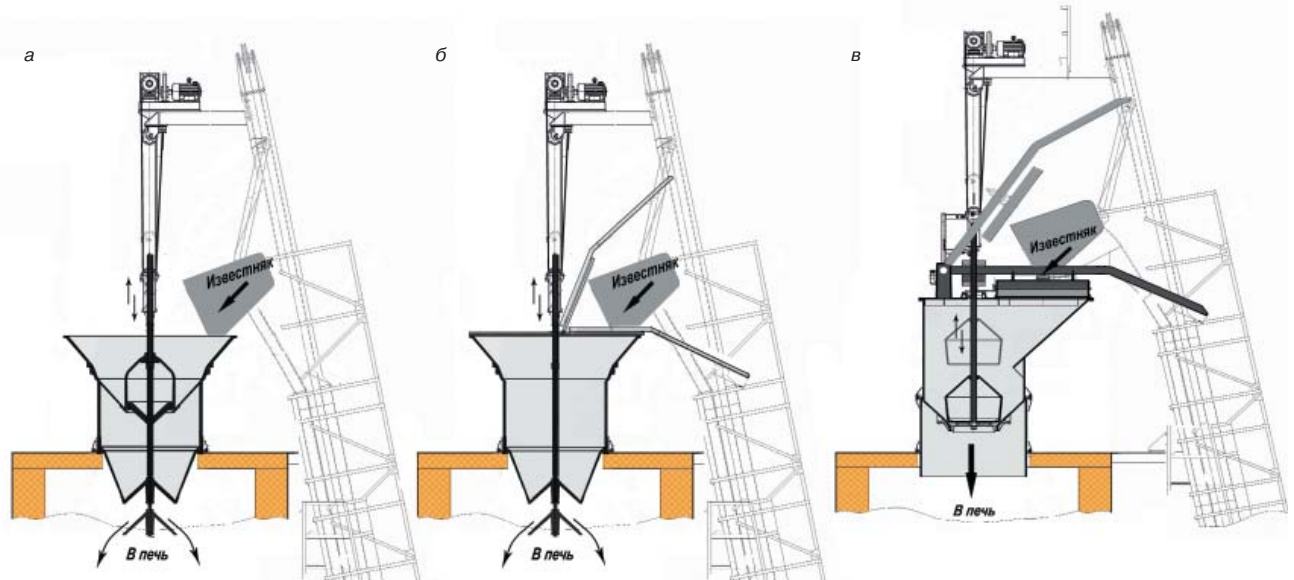


Рис. 2. Загрузочное устройство: а – существующая конструкция; б – реконструкция; в – современный вариант

Скиповый подъемник. Скиповый ковш с предварительно взвешенным известняком поднимается лебедкой по скиповой дорожке вверх печи. Электродвигатель лебедки управляется частотным преобразователем, который позволяет плавно разгонять ковш и снижать скорость его движения при подходе к загрузочному устройству. При отсутствии бункера для взвешивания, известняк взвешивается непосредственно в скиповом ковше.

Загрузочное устройство позволяет сохранять разрежение в верхней зоне печи за счет установки двух клапанов. Традиционная конструкция загрузочного устройства (рис. 2, а) может быть трансформирована (рис. 2, б) или заменена на более современное загрузочное устройство (рис. 2, в). При монтаже или ремонте механизма необходимо добиться герметичности, чтобы при открывании верхнего или нижнего клапана разрежение не изменялось более чем на 0,1 кПа.

На печи установлен ультразвуковой датчик уровня. Система АСУТП следит за равномерной загрузкой известняка по таймеру и одновременно контролирует уровень в печи. Если уровень в печи понижается или поднимается выше/ниже допустимого, система или оператор изменяет скорость выгрузки, а на время аварийной ситуации загрузка осуществляется по уровню.

Дымоотводящий короб осуществляет отбор дымовых газов из верхней зоны печи. На дымоотводе может быть установлен конус-распределитель для равномерного распределения камня по сечению печи. Дымоотводящий короб погружен в слой известняка. Часть дымовых газов

удаляется из-под крышки печи, что обеспечивает прогрев известняка над дымоотводящим коробом и удаление холодного воздуха, поступающего через неплотности загрузочного устройства.

Шахта печи футерована современными огнеупорными и теплоизоляционными материалами, которые позволяют минимизировать потери тепла через кожу печи. Футеровка выполнена из огнеупорных материалов – хроммагнетитового и шамотного и теплоизоляционных материалов – кальцийсиликатной плиты и пендиатомитового теплоизоляционного кирпича.

На рис. 3 показан профиль температур в футеровке зоны обжига печи. При толщине футеровки 610 мм температура на наружной поверхности обечайки печи не превышает 60°C, а потери тепла составляют 760 Вт/м². Срок службы футеровки при правильной ее эксплуатации восемь лет.

Периферийные горелочные устройства позволяют ввести газ и воздух внутрь печи, что обеспечивает горение топлива внутри слоя известняка. Ввод газа осуществляется на расстояние 150–450 мм внутрь печи, что позволяет достичь более равномерного обжига известняка по сечению печи и предохранить футеровку от чрезмерного перегрева.

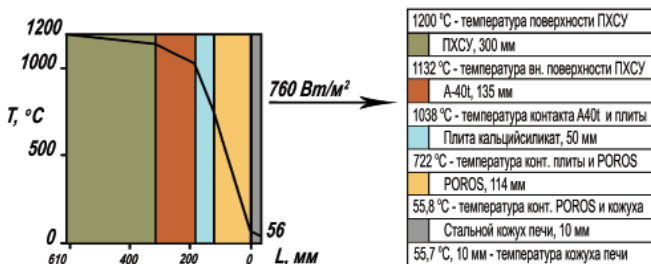


Рис. 3. Профиль температур в футеровке зоны обжига печи: ПХСУ – периклазохромитовый огнеупорный материал; А40t – огнеупорный материал с повышенным содержанием глинозема; POROS – теплоизоляционный материал; L – толщина футеровки

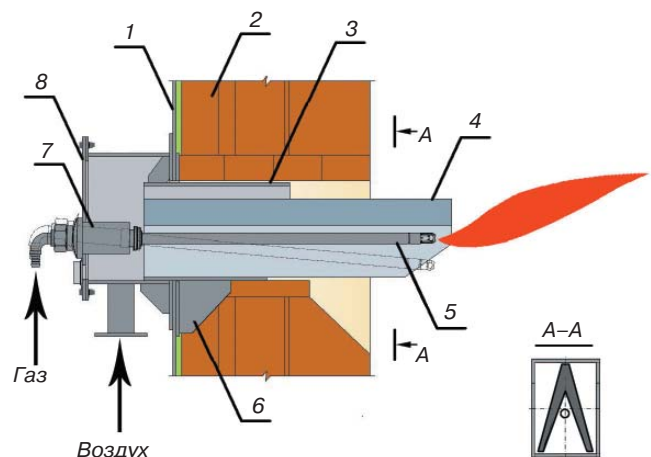


Рис. 4. Периферийная горелка: 1 – кожух печи; 2 – футеровка; 3 – короб внутренний; 4 – фурма защитная; 5 – горелочная труба; 6 – ребра жесткости; 7 – поворотное устройство; 8 – фланец лицевой

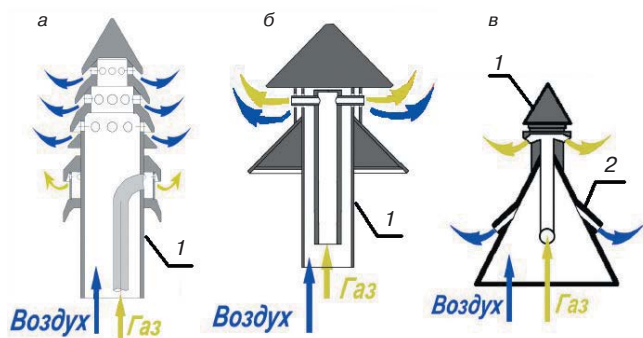


Рис. 5. Центральная горелка: 1 – горелка; 2 – балка-рассекатель

Схема горелочного устройства приведена на рис. 4. Горелочная труба (5) выступает внутрь печи и защищена фурмой (4) из жаропрочной стали. Внутри футеровки (2) горелка находится в коробе (3), закрепленном на обечайке печи (1).

Снаружи горелка закрыта горелочным ящиком (8) на лицевой стороне которого установлен фланец с отверстиями для гляделки и поворотным устройством (7), которое позволяет фиксировать горелочную трубу по центру. В отверстие гляделки при розжиге печи вставляется запальник (7). Горелочное устройство устанавливается в печи горизонтально или под углом 10–15° к горизонту.

Сгорание газа происходит внутри раскаленного слоя известняка. Воздух, который подается в количестве 30–50% от стехиометрического объема, охлаждает фурму. Срок службы фурмы составляет 1–3 года, после чего сгоревшая часть фурмы обрезается и наращивается до первоначальной длины.

Для равномерного обжига известняка выступающие внутрь печи фурмы имеют разную длину, например, 150 и 450 мм и располагаются по периферии яруса печи в шахматном порядке.

Центральная горелка устанавливается в нижней части печи на балке-рассекателе, которая делит разгрузочное сечение печи на две части.

Поскольку в зоне охлаждения температура извести невысокая, газ, выходящий из центральной горелки, поднимается вверх и воспламеняется только на уровне периферийных горелок. Для охлаждения центральной горелки вместе с газом в нее подают воздух. Существует несколько разных конструкций горелок [4, 5], которые изображены на рис. 5. Основным отличием является высота горелки и место подвода воздуха.

Выбор конкретной конструкции горелки определяется геометрическими размерами печи. Внутри центральной горелки устанавливается датчик температуры. Температура на горелке зависит от условий обжига, расхода газа и воздуха на горелку и от разрежения в печи. Максимально допустимая температура на центральной горелке 420°C. При превышении максимально допустимой температуры срабатывает аварийная сигнализация и происходит отключение подачи газа.

Выгрузочное устройство с движущейся колосниковой решеткой (рис. 6) включает в себя механизм выгрузки с движущейся колосниковой решеткой (2), бункер извести (5) и устройство выгрузки из бункера (виб-ропигатель или качающийся питатель) (8). Механизм выгрузки представляет собой сварную платформу (каретку) с колосниковой решеткой (2), установленную на четырех спаренных опорных катках (4), которые перемещаются по рельсовым балкам. Сечение шахты печи (1) в нижней части из круглого переходит в квадратное. Над колосниковой решеткой установлен рассекатель (3), который делит поток материала на две части. Каретка (2) совершает воз-

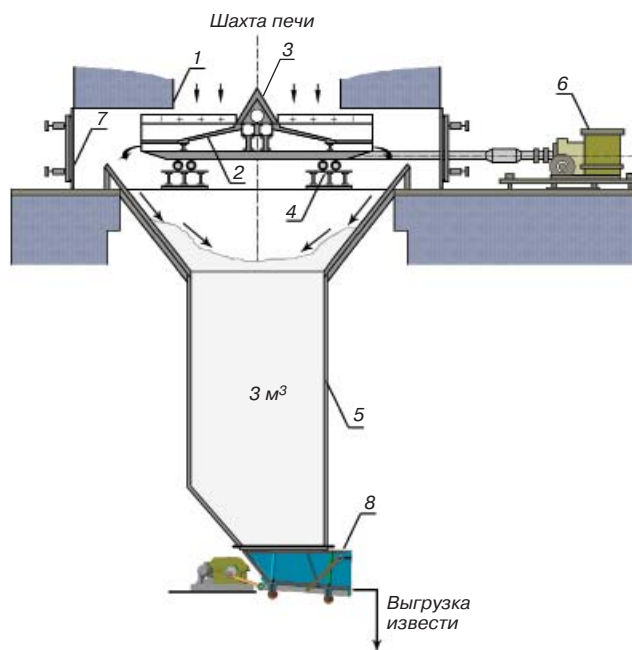


Рис. 6. Выгрузочное устройство: 1 – шахта печи; 2 – колосниковая решетка; 3 – балка-рассекатель; 4 – катки; 5 – бункер извести; 6 – механический привод; 7 – смотровые люки

ратно-поступательное движение, и материал разгружается по обе стороны каретки (показано стрелками) в бункер (5). Для визуального наблюдения за выгрузкой материала имеются смотровые окна, закрытые люками (7) для предотвращения подсоса холодного воздуха. Механизм обеспечивает равномерную выгрузку извести из печи с диаметром шахты до 4,5 м, прост по конструкции, надежен в работе, имеет сравнительно низкую удельную металлоемкость. Для привода каретки чаще всего применяют электромеханический привод (6). Для регулировки скорости движения каретки разгрузочного механизма используют частотный преобразователь, позволяющий плавно изменять разгрузку материала из печи.

Существуют другие, более современные устройства для выгрузки извести из печи [4, 6]. Вопрос о замене или ремонте существующего выгрузочного устройства решается с учетом экономической целесообразности.

Таким образом, противоточная шахтная печь круглого сечения с периферийными и центральной горелками, построенная вновь или печь существующая, прошедшая реконструкцию, вполне может конкурировать с зарубежными аналогами шахтных печей. Автоматизация печи позволяет отслеживать все аварийные ситуации и поддерживать заданный технологический режим.

Однако эксплуатация печи требует от персонала следовать строго технологической инструкции, не изменять режим и конструкцию печи без предварительных расчетов и испытаний.

Основные ошибки при эксплуатации шахтных печей: – подача воздуха в печь в избыточном количестве;

Таблица 2

Печь №	Активность, % (CaO+MgO)	O ₂ , %	CO ₂ , %	CO, %
1	64	13,1	11,8	0,4
2	87	5,2	23,8	0,3
5	85,5	7,2	14,8	0,4
11	84	10,5	12,8	0,8

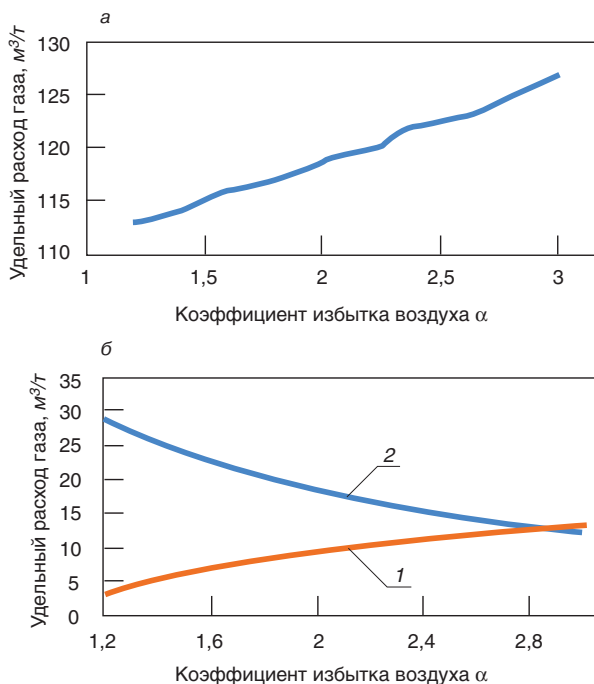


Рис. 7. Зависимость удельного расхода газа (а) и концентрации в дымовых газах кислорода и углекислого газа (б) от коэффициента избытка воздуха: 1 – кислород; 2 – диоксид углерода

– неудовлетворительное качество загружаемого материала, способствующее образованию сваров в печи (большое количество мелочи, песка в сырье, отсутствие распределения известняка при загрузке);

– неправильное распределение газа по горелочным устройствам;

– несимметричная выгрузка материала из печи.

Так, например, очень часто операторы не следят за герметичностью шахты: люки, гляделки держат постоянно открытыми, пустой бункер извести способствует подосу холодного воздуха через выгрузочное устройство. В результате большой избыток воздуха на горение снижает температуру в зоне обжига, увеличивает нагрузку на дымосос и в итоге снижает активность выгружаемой извести и увеличивает удельный расход топлива. На рис. 7, а приведена зависимость удельного расхода газа от коэффициента избытка воздуха. Анализ дымовых газов шахтных печей ряда заводов (табл. 2) показал высокое содержание кислорода в отходящих из печи дымовых газах.

По данным газоанализа был рассчитан коэффициент избытка воздуха, который для печей 1 и 11 оказался выше 2, в то время как оптимальный избыток воздуха должен составлять не более 40%, а содержание CO_2 в отходящих газах – не менее 21% [4]. На графике (рис. 7, б) показан расчетный состав дымовых газов в зависимости от коэффициента избытка воздуха.

Для оптимальной работы печи важно правильно распределить расход газа по горелочным устройствам. Обычно 30–40% от всего объема газа приходится на центральную горелку, остальная часть газа распределяется по периферийным горелкам. На нижний ярус подается меньше газа, чем на верхний ярус. Кроме того,

оператор корректирует расход газа на каждую периферийную горелку в зависимости от состояния обжигаемого материала на этой горелке и показаний датчиков температуры внутри зоны обжига. Часто бывает, что «печь работает одним боком» и перераспределение газа позволяет устранить этот недостаток.

Правильная эксплуатация печи позволяет выпускать известь высокого качества при минимальном расходе топлива.

Шахтные печи с балочными горелками, а также печи с установленным внутри шахты керном [7] позволяют добиться более равномерного распределения температуры по сечению печи и получить известь более высокого качества. Конструкция этих печей является предметом отдельного рассмотрения.

При добыче известняка в карьере образуется более 50% фракции с размерами менее 40 мм, которая непригодна для обжига в шахтных печах. Возникает необходимость утилизации (переработки) накопленных отвалов. Этот вопрос можно решить несколькими способами.

Наиболее прямой – поставить в дополнение к шахтной печи вращающуюся печь, которая сможет работать на фракции 10–40 мм. Второй способ заключается в переработке известняка на минеральные порошки. На некоторых известковых заводах организована комплексная переработка отвалов – из отсевов производится щебень, известняковая мука (ГОСТ 14050–93, 26826–86), крошка (ГОСТ 26826–86), минеральный порошок для производства асфальтобетона. (ГОСТ Р 52129–2003).

Вращающиеся печи для производства извести

Вращающиеся (роторные) печи позволяют обжигать карбонатные породы, которые невозможно обжечь в шахтных печах. Бесспорным преимуществом вращающихся печей является возможность получения извести со стабильным и высоким качеством (активность 92–96%, остаточный CO_2 в извести менее 2%).

В зависимости от свойств исходного сырья используются длинные или короткие вращающиеся печи. Длинные вращающиеся печи имеют отношение длины барабана L к диаметру D (в свету) в пределах 35–40. Короткие печи работают с запеченными теплообменниками и имеют отношение $L/D=14–20$.

В длинных печах (длина 75–150 м) обжигают малопропрочное карбонатное сырье, содержащее большое количество мелких фракций с влажностью до 40%. В коротких печах (длина барабана 40–70 м) обжигают известняки в виде узких фракций: 0,1–2 мм; 10–20 мм; 20–40 мм с влажностью до 8%.

В табл. 3 представлены размеры и характеристики коротких печей, снабженных запеченными теплообменниками.

Температура материала в печи не превышает 1200°C и зависит от вида обжигаемого сырья. Температура газовой среды выше температуры обжигаемого материала на $250–300^\circ\text{C}$.

Схема короткой противоточной вращающейся печи [4] представлена на рис. 8.

Печь состоит из вращающегося барабана (1), запеченного шахтного теплообменника для подогрева сырья (2)

Таблица 3

Размер барабана*, м	2,5×40	3×46	3,5×54	4×60	4,3×64	4,8×68
Производительность, т/сут (т/ч)	150 (6,2)	250 (10,4)	350 (14,6)	600 (25)	800 (33,3)	1000 (41,7)
Примечание. * Диаметр × длина.						

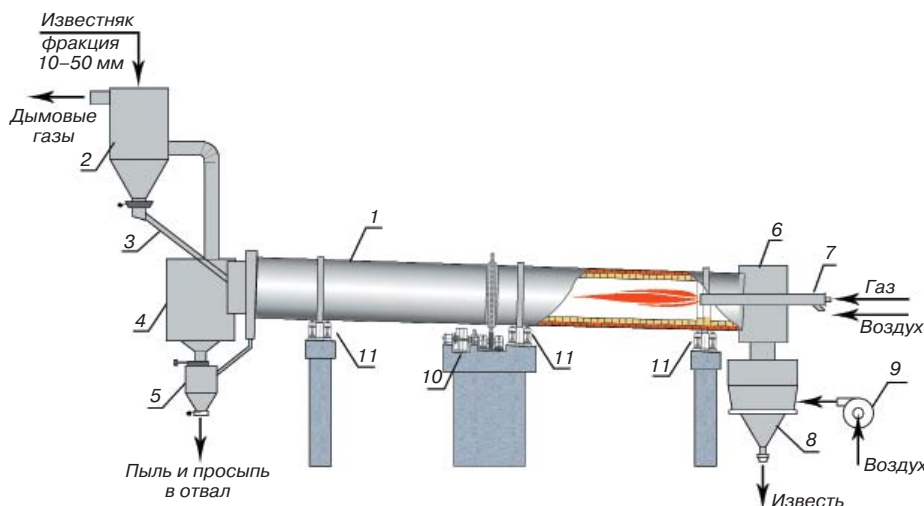


Рис. 8. Короткая вращающаяся печь для производства извести: 1 – футерованный барабан; 2 – подогреватель известняка; 3 – течка загрузочная; 4 – пылесадительная камера; 5 – бункер пыли; 6 – головка горячего конца печи; 7 – горелка; 8 – охладитель извести; 9 – дутьевой вентилятор; 10 – механический привод печи; 11 – роликовые опоры

и охладителя извести (8), газовой горелки (7), газоочистного оборудования (циклонов, фильтра для очистки дымовых газов), дымососа и дутьевых вентиляторов для охлаждения извести и оборудования.

Корпус печи (1) представляет собой сваренный из секций полый стальной барабан диаметром от 2,2 до 7 м и толщиной до 30 мм. На корпусе закреплены бандажи, опирающиеся на роликовые опоры (11). Корпус печи фиксируется в определенном положении на роликовых опорах системой гидравлических упорных роликов.

Для повышения жесткости корпуса его толщину под бандажами и приводной шестерней увеличивают в 2–3 раза. Применявшиеся с этой целью прежде кольца жесткости не оправдали себя на практике и в печах последних конструкций отсутствуют.

Корпус печи имеет наклон 3–4% к горизонту и вращается со скоростью 0,5–1,5 об/мин от электродвигателя, соединенного с корпусом через редуктор, подвенцовую и венцовую шестерни (10). С увеличением диаметра корпуса увеличивается радиальное усилие, передаваемое подвенцовой шестерней. Поэтому печи большой мощности снабжены двусторонним приводом с одной венцовой и двумя подвенцовыми шестернями.

Остановка печи в любом положении осуществляется электромагнитным фрикционным тормозом, запирающим приводной вал при срабатывании электромагнита.

Печь снабжена резервным (вспомогательным) приводом небольшой мощности, позволяющим вращать ее корпус со скоростью 4 об./мин в период пуска и при ремонтных работах.

Концевая обечайка разгрузочной части корпуса современных мощных печей охлаждается холодным воздухом, нагнетаемым вентилятором между ней и допультельной конической обечайкой.

Представленная на рис. 8 печь предназначена для обжига фракционированного известняка. Подготовленный известняк фракции 20–50 мм из бункера загружается в противоточный шахтный подогреватель (2). Отходящие газы печи с температурой 850–950°C поступают в пылевую камеру (4) и далее в подогреватель (2), где нагревают слой известняка до температуры 700–800°C. Теплообмен осуществляется в противотоке между известняком и газами. После подогревателя отходящие газы с температурой 360–370°C поступают на газоочистку.

Далее нагретый известняк по наклонной течке (3) самотеком поступает в загрузочный узел вращающейся печи (1). В течке имеется узел отсева, при прохождении которого из потока удаляется образовавшаяся в подогревателе пыль и мелкий (до 5 мм) известняк. По отводной течке просыпь поступает в пылевую камеру (4) и далее через клапан-мигалку в бункер (5), из которого автотранспортом отправляется на утилизацию или потребителю.

Во вращающейся печи известняк движется в противотоке с дымовыми газами, превращаясь в известь. Факел горелки (7), установленной на противоположном конце печи отдает свое тепло излучением и конвекцией материалу, который пересыпается во вращающемся барабане печи. Оптимальные длина факела и режим

сжигания топлива в печи подбираются (регулируются) с помощью газовоздушной горелки (7). Первичный воздух (10–15% от необходимого для полного горения топлива) подается в горелку высоконапорным вентилятором. Остальное количество воздуха поступает непосредственно в головку (6) горячего конца печи и далее непосредственно в барабан печи (1). Обожженная известь из печи через горячую головку (6) выгружается в шахтный охладитель (8), где охлаждается до температуры 50–80°C.

Охлаждающий воздух подается вентилятором (9) в воздухораспределительную камеру в центре корпуса охладителя. Проходя через слой извести, воздух за счет физического тепла извести нагревается до 300–350°C. Далее нагретый воздух по отдельному газоходу поступает в горячую головку печи (6) и используется для горения топлива. Расход воздуха, пропускаемый через охладитель извести, обеспечивает горение топлива с коэффициентом избытка $\alpha=1,1-1,15$.

Таким образом, при горении топлива мы получаем дымовые газы с температурой 370°C, что существенно выше, чем в шахтных печах. Кроме того, потери тепла во вращающихся печах через корпус барабана в 10 раз выше, чем в шахтных, и составляют примерно 8–12 кВт/м², а температура обечайки может достигать 320–370°C в зоне обжига.

В длинных вращающихся печах, несмотря на размещение внутри барабана теплообменных устройств, потери тепла с дымовыми газами и через корпус печи еще выше. Поэтому удельный расход тепла в таких печах самый высокий. Однако высокие затраты на топливо в длинных печах частично компенсируются низкой стоимостью сырья.

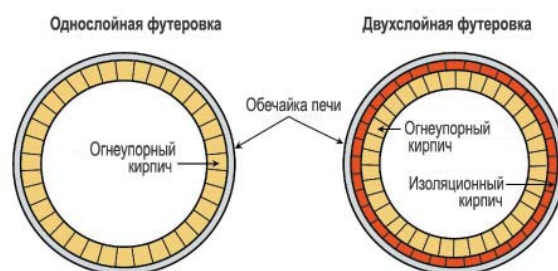


Рис. 9. Однослойная (а) и комбинированная (б) футеровка вращающейся печи

Для улучшения теплообмена между газовым потоком и материалом в холодной части длинных печей размещают внутренние теплообменные устройства (цепные и ячейковые теплообменники) [7].

Зона подогрева расположена в холодном конце печи начиная от места поступления в нее сырья и занимает до 70% общей длины корпуса длинной печи. Поступающий в зону подогрева материал проходит последовательно зону сушки и нагрева, зону обжига. Зона охлаждения в печах такого типа практически отсутствует, поэтому длинные печи работают совместно с барабанным охладителем материала [4].

В конце зоны обжига со стороны горелки расположен порог высотой 200–500 мм, иногда на расстоянии 16–18 м от него устраивают второй порог. Применение кольцевых порогов (местных сужений внутреннего диаметра печи) улучшает характеристики процесса обжига за счет увеличения времени пребывания материала в зоне высокой температуры и уменьшения потерь тепла излучением факела в холодный конец печи. В итоге устройство порогов в печи позволяет на 5–10% повысить ее производительность и несколько снизить удельный расход топлива на обжиг.

Выходящие из зоны подогрева длинной печи газы при правильной организации процесса обжига содержат 22–24% CO_2 и 2–2,5% O_2 .

Обычно барабан вращающейся печи футеруют только одним слоем огнеупорного кирпича. Это связано с тем, что до недавнего времени отсутствовали теплоизоляционные материалы, сравнимые по прочности с огнеупорной футеровкой барабанной печи. Однако в настоящее время в Европе, США, а теперь уже и в развивающихся странах, куда приходят зарубежные компании, ни одна вращающаяся печь для выпуска извести или цемента не строится без применения энергосберегающих футеровок, сокращающих тепловые потери через корпус печи.

Речь идет о снижении тепловых потерь через корпус печи посредством устройства в печи комбинированной футеровки из огнеупорного и теплоизоляционного кирпича определенного дизайна, способной нести все возникающие рабочие нагрузки и напряжения в печи и одновременно вдвое снижать тепловые потери через корпус вращающейся печи.

Список литературы

1. Монастырёв А.В. Производство извести. М.: Высшая школа, 1971. 272 с.
2. Дресвянникова Е.А., Готулева Ю.В. Энергосберегающие технологии при производстве строительных материалов // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 8–2. С. 301–302.
3. Нестеров А.В., Батышев Д.З. Новая жизнь шахтных печей // *Строительные материалы*. 2015. № 3. С. 49–52.
4. Монастырёв А.В., Галиахметов Р.Ф. Печи для производства извести. Воронеж: Истоки, 2011. 392 с.
5. Патент РФ 2079785. Газовая горелка / Калашников Л.В., Калашников Г.Л. Заявл. 13.04.1995. Опубл. 20.05.1997.
6. Табунчиков Н.П. Производство извести. М.: Химия, 1974. 240 с.
7. Монастырёв А.В. Проекты эффективных шахтных и вращающихся печей с низким расходом топлива мощностью 200–600 т/сут извести // *Строительные материалы*. 2012. № 2. С. 26–28.
8. А.В. Монастырёв. Пути снижения расхода топлива при обжиге мела с получением извести в длинных вращающихся печах // *Строительные материалы*. 2010. № 9. С. 9–15.

Такая комбинированная футеровка представляет собой футеровку, состоящую из двух слоев (рис. 9). Внешний (рабочий) слой состоит из огнеупорного кирпича с высокими характеристиками по температуре применения, прочности и термостойкости. Внутренний слой, расположенный под внешним, состоит из теплоизоляционного кирпича с низкой теплопроводностью 0,26 Вт/(м·К), высокой прочностью (до 40 МПа) и высокой термостойкостью.

Такие показатели обеспечивают рабочему слою футеровки стабильную работу в горячих зонах печи, а теплоизоляционному слою позволяют справляться с физическими напряжениями и нагрузками, возникающими в печи и снижать потери через футеровку печи. Эффективность такой футеровки позволяет окупить ее устройство в печи уже в первый год эксплуатации. При этом гарантированный срок ее эксплуатации в зоне обжига печи составляет три года, а в холодных зонах (подогрева) – пять лет и более. Максимальная температура на корпусе печи с комбинированной футеровкой в среднем составляет не более 200°C при новой футеровке и не более 250°C при изношенной.

Таким образом, применение комбинированной футеровки позволяет снизить тепловые потери через кожух печи в зоне обжига с 8–12 до 4–5 кВт/м², что равносильно экономии 6,5 тыс. м³ горючего газа в сутки для печи с производительностью 450 т/сут.

В России энергосберегающие футеровки уже внедрены на предприятии ОАО «МОНДИ Сыктывкарский ЛПК» и ОАО «СЕВЕРСТАЛЬ».

Показатели работы вращающейся печи во многом зависят от конструкций, оборудованных ею теплообменников и вспомогательных устройств (горелки, уплотнения, подогреватель известняка, охладитель извести и пр.). В России наиболее распространены печи диаметром 3,6 м и длиной 75 м. Корпусы самих печей изготавливаются на специализированных механических заводах.

В заключение следует отметить, что основными факторами, определяющими выбор конструкции печи для производства извести, является стоимость и качество сырья и топлива. Грамотная эксплуатация печей позволяет производить продукции высокого качества с минимальными затратами.

References

1. Monastirev A.V. *Proizvodstvo izvesti* [Production of Lime]. Moscow: Vysshaya shkola. 1971. 272 p.
2. Dresvyannikova E.A., Gotuleva Yu.V. Energy saving technologies by production of construction materials. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2013. No. 8–2, pp. 301–302. (In Russian).
3. Nesterov A.V., Batychev D.Z. A New Life of Shaft Kilns. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 3, pp. 49–52. (In Russian).
4. Monastirev A.V., Galiakhmetov R.F. *Pechi dlya proizvodstva izvesti* [Kilns for production of lime]. Voronezh: Istoki. 2011. 392 p.
5. Patent RF 2079785. *Gazovaya gorelka* [Gas burner]. Kalashnikov L.V., Kalashnikov G.L. Declared 13.04.1995. Published 20.05.1997. (In Russian).
6. Tabunshchikov N.P. *Proizvodstvo izvesti* [Production of Lime]. Moscow: Khimiya. 1974. 240 p.
7. Monastirev A.V. Designs of Efficient Shaft and Rotary Kilns of 200–600 t/d Capacity. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 2, pp. 26–28. (In Russian).
8. Monastirev A.V. Ways of Reduction of Fuel Consumption in the Course of Chalk Roasting with Production of Lime in Long Rotary Kilns. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2010. No. 9, pp. 9–15. (In Russian).