

РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОГО ОБЖИГОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ТИПА МАЛОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ

В.А. Кошелев, Г.Ф. Аверина, Д.В. Ульрих

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Рассматриваются различные виды обжигового оборудования, применяемого в производстве строительных материалов и изделий, приводятся достоинства и недостатки рассматриваемых конструкций. Предложено использование сверхкоротких (до 20 м) вращающихся печей для опытно-промышленных технологических линий по производству мелкодисперсных порошков (вяжущих строительного назначения) с максимальной температурой обжига не более 800 °С. На примере процесса термической обработки модифицированной карбонатной шихты произведен расчет теплового баланса, подтверждающий возможность использования данного типа оборудования для получения малых промышленных партий материала (не более 2 т/ч) с целью апробации инновационных технологий без повышенных капитальных затрат на установку дорогостоящего полноразмерного обжигового оборудования вращающегося типа.

Ключевые слова: обжиговое оборудование, расчет теплового баланса, вращающаяся печь, дегидратация, декарбонизация, спекание.

Введение. В производстве строительных материалов и изделий используется большое количество разнообразного обжигового оборудования. В процессе работы данного оборудования, в зависимости от вида обжигаемого сырья, в зоне термической обработки происходят различные физико-химические превращения, такие как дегидратация, декарбонизация, спекание, вспучивание и многие другие [1–5]. Выбор вида и конструктивных особенностей обжигового оборудования может оказать значительное влияние на качество выпускаемой продукции. Большим разнообразием видов допустимого к применению обжигового оборудования является производство сыпучих материалов различного назначения, портландцемента, строительного гипса, извести, керамзита, вспученного вермикулита и т. д. [6–10]. В производстве данных видов продукции могут быть применены шахтные, пересыпные, циклонные и вращающиеся печи.

Шахтные печи могут быть применены для обжига карбонатных пород, таких как природные известняки, магнезит, доломит, доломитизированный магнезит и т. д., а также для термической обработки некоторых рудных материалов, таких как медная руда, свинцовая руда, серный колчедан и другие. Как правило, шихта состоит из крупнокускового материала.

Шахтные печи имеют относительно простую конструкцию, не требуют больших капиталовложений и эксплуатационных расходов, в то же время показывая высокую теплотехническую и экономическую эффективность.

При всех вышеперечисленных преимуществах шахтные печи также имеют ряд недостатков, в

частности, они требуют применения кусковых материалов узкой фракции, имеют большую инерционность, а также затрудненное равномерное распределение сырья и топлива по сечению печи.

Конструкция шахтных печей подразумевает их работу по принципу противотока. Слой материала опускается сверху вниз, при этом контактируя с встречным потоком раскаленного газа. В ходе обжига материал проходит все зоны термической обработки: подсушку, подогрев, обжиг и охлаждения. Зона обжига сопряжена и частично перекрывается зоной сгорания топлива и образования топливных газов [11–13].

Пересыпные обжиговые печи являются подвидом печей шахтной конструкции. Печи данного типа работают на короткопламенном твердом топливе, таком как кокс, каменный уголь, антрацит. В процессе обжига топливо сгорает непосредственно в составе шихты. Предварительно подготовленную смесь шихты с топливом загружают в печь. Также предусмотрен способ послонной загрузки топлива и шихты, с чередованием слоя шихты и слоя топлива.

Шахтная пересыпная печь также имеет принцип работы в режиме противотока. Смесь топлива с материалом перемещается навстречу отходящему газу, содержащему небольшое количество кислорода [14–16].

Иными конструктивными особенностями обладают циклонные печи. Данное обжиговое оборудование представляет собой агрегаты с интенсивным тангенциальным движением подаваемого на сжигание воздуха и сырьевой смеси. Создаваемое вследствие совершения данной работы силь-

ное завихрение потока сырья вызывает интенсификацию процессов теплопереноса. Таким образом обеспечиваются высокие температуры в зоне обжига [17–19].

Вращающиеся печи являются наиболее популярным видом оборудования для термической обработки сыпучих продуктов различной дисперсности. На предприятиях по производству извести, портландцемента и других вяжущих используются противоточные вращающиеся печи длиной до 185 метров, что, как правило, обосновано большим годовым объемом выпуска готовой продукции. Короткими печами считаются агрегаты длиной от 40 до 85 метров. Значительная длина вращающихся печей позволяет сообщить большому объему сырья достаточное количество энергии, требующейся для активации процессов дегидратации, декарбонизации или спекания в течение времени его нахождения в зоне тепловой обработки, а также предотвращает повышенный пылеунос [20]. Как правило, барабан печи изнутри отделяется футеровочным материалом – огнеупорным шамотным кирпичом или жаростойким бетоном. Футеровка не только защищает материал барабана от воздействия высоких температур, но также и препятствует повышенным теплопотерям из рабочего пространства в окружающую среду и способствует более интенсивному перемешиванию материала внутри печи. Также футеровочный материал, обладая более высокой инерционной способностью, чем металл, повышает эффективность обжига.

В данной статье рассмотрим возможность использования значительно более коротких вращающихся печей для выпуска опытных партий продукции, не требующей высокотемпературной (более 800 °С) тепловой обработки. Устройство таких печей может быть рациональным решением для организации небольших предприятий с малыми капиталозатратами.

Расчетная исследовательская часть

Рассматриваемое оборудование представляет собой противоточную вращающуюся печь обжига длиной 10 м и диаметром 1,7 м. Материал загружается в холодный конец печи через загрузочную головку, проходит зону предварительной термической обработки при 120–240 °С, где происходит интенсивное удаление входящей в состав шихты адсорбционной воды, после чего попадает в зону нагрева и непосредственного обжига при температурах до 800 °С. Материал рабочей зоны печи – жаростойкая нержавеющая сталь. Футеровка печи ввиду цикличности использования агрегата с частыми нагревами/охлаждениями отсутствует. Для предотвращения повышенных теплопотерь и повышения энергетической эффективности агрегата предусмотрена внешняя теплоизоляция. Материал внешнего утеплителя – муллитокремнеземистые прошивные маты и базальтовые маты. Для интенсификации процессов перемешивания сырьевого

материала в процессе обжига барабан оснащен внутренними пересыпными полками, также повышающими эффективность обжиговых процессов. Печь оборудована горелкой модели SibUnigas E165A с максимальной мощностью 1650 кВт/ч. Тип используемого топлива – природный газ.

Для расчета теплового баланса печи провели исследование процессов, протекающих в сырьевой смеси под воздействием высоких температур. Для получения готового продукта требуется провести частичное разложение входящих в состав сырьевой смеси минералов. Исходя из результатов дифференциально-термического анализа, материала шихты, выполненного на приборе Shimadzu DTG-60 (см. рисунок), установили, что для активации и протекания необходимых физико-химических реакций необходимо сообщить 396 кДж энергии на килограмм материала шихты без учета его влажности и теплоемкости.

Ожидаемая производительность печи по входящему сырью – 3 тонны в час. Произведем расчет теплового баланса для выявления возможности использования данного оборудования с целью получения строительного вяжущего из шихты с заданными свойствами.

Рассчитаем приход тепла от горения топлива:

$$Q_{\text{гор}} = Q_n \cdot B, \quad (1)$$

где B – расход топлива м³/ч; Q_n – теплота сгорания топлива, м³/ч:

$$Q_{\text{гор}} = 35509,84 \cdot 137 / 3600 = 1351 \text{ кВт}.$$

Количество тепла, привносимое в систему с подогретым воздухом

$$Q_{\text{возд}} = L_a^1 \cdot i_{\text{возд}} \cdot B. \quad (2)$$

По модификации горелочного устройства воздух для горения потребляется из окружающего пространства, принимаем его температуру – 20 °С.

$$L_a^1 = 10 \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad i_{\text{возд}} = 26 \text{ кДж}/\text{м}^3.$$

$$Q_{\text{возд}} = 10 \cdot 26 \cdot 137 / 3600 = 10 \text{ кВт}.$$

Тепло, вносимое материалом:

$$Q_{\text{мат}} = P_{\text{вход}} \cdot C_n \cdot t_n, \quad (3)$$

где C_n – теплоемкость сухого сырья = 0,89 кДж/кг град; t_n – температура материала, загружаемого в печь = 10 °С; $P_{\text{вход}}$ – производительность печи по входящему материалу = 3000 кг;

$$Q_{\text{мат}} = 3000 \cdot 0,89 \cdot 10 / 3600 = 7,4 \text{ кВт}.$$

Расход тепла на нагрев материала:

$$Q_{\text{мат}} = ((P_{\text{вход}} + P_{\text{выход}}) \cdot 0,5 \cdot C_n \cdot (t_k - t_n)) / 3600, \quad (4)$$

где $P_{\text{вход}}$ – производительность печи по входящему материалу = 3000 кг;

$P_{\text{выход}}$ – производительность печи по готовому материалу;

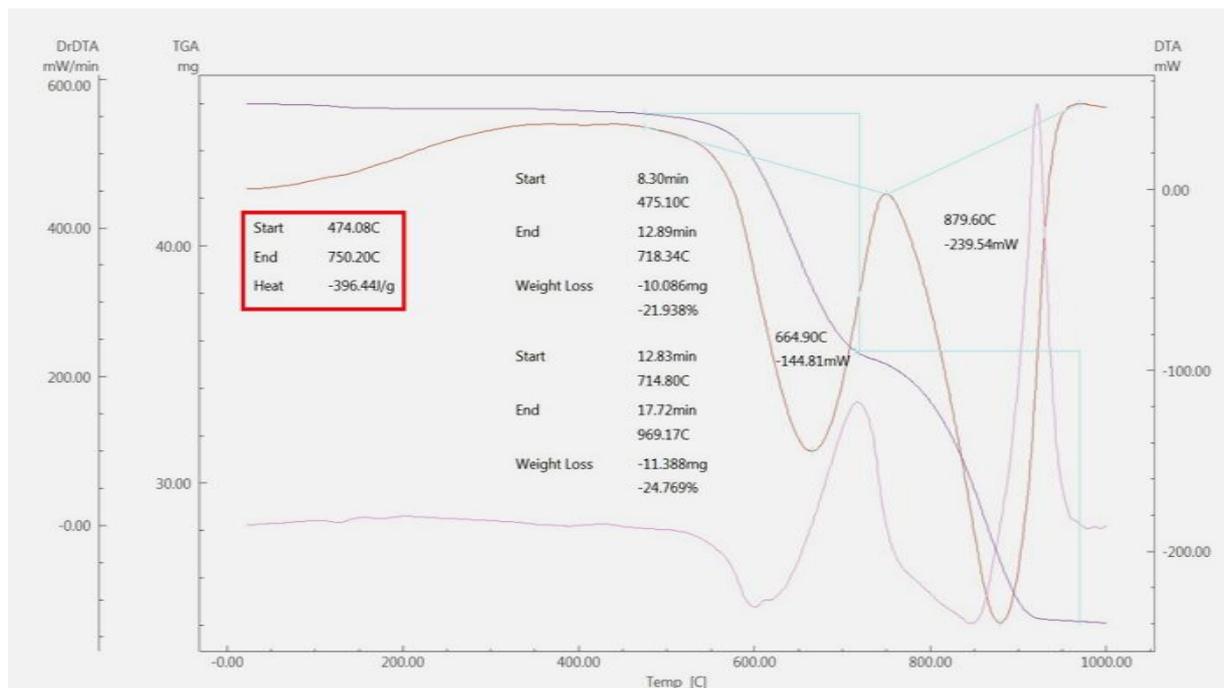
$$P_{\text{выход}} = (3000 - (3000 \cdot 0,22)) = 2340 \text{ кг};$$

t_k – температура декарбонизации входящих в состав материала минералов = 665 °С;

t_n – температура загружаемого в агрегат материала = 10 °С;

C_n – известная теплоемкость сухого сырья = 0,89 кДж/кг град;

$$Q_{\text{мат}} = ((3000 + 2340) \cdot 0,5 \cdot 0,89 \cdot (665 - 10)) / 3600 = 432 \text{ кВт}.$$



Дериватограмма материала используемой в расчете шихты

Количество тепла, используемое для испарения содержащейся в шихте физической влаги:

$$Q_{исп} = (600 + i_{yx} / 0,804 \cdot t_{yx} - t_n) \cdot W_{вл} \cdot 4,2, \quad (5)$$

где i_{yx} – теплосодержание водяных паров, при $t_{yx} = 350$ °С кДж/Нм $i_{yx} = 0,37$ ккал/нм³ · °С.

$$W_{вл} = P \cdot w / 100 - w, \quad (6)$$

где W – относительная влажность материала, поступающего в печь, %;

P – количество сухого материала, поступающего в печь, кг/с:

$$W_{вл} = 0,78 \cdot 6 / (100 - 6) = 0,05 \text{ кг/с},$$

$$Q_{исп} = (600 + 0,37 / 0,804 \cdot 350 - 10) \times 0,05 \cdot 4,2 = \mathbf{158 \text{ кВт}}.$$

Количество тепла, затрачиваемое на декарбонизацию минералов шихты:

$$Q_{хим} = q_{хим} \cdot G_{хим}, \quad (7)$$

где $q_{хим}$ – теплота, расходуемая на физико-химические процессы 1 кг исходного химического вещества в обожженном продукте, кДж/кг;

$$G_{хим} = n \cdot P / 100, \quad (8)$$

где n – количество химического вещества в исходном материале, %;

P – количество поступающего в агрегат сухого материала, кг/ч.

$$q_{хим} = 396 \text{ кДж/кг MgCO}_3, n = 45,7 \text{ \%};$$

$$Q_{хим} = 45,7 \cdot 3000 \cdot 0,01 \cdot 396 / 3600 = \mathbf{152 \text{ кВт}}.$$

Количество тепла, уходящего с продуктами разложения

$$Q_{дис} = 0,01 \cdot P_c \cdot 0,553 \cdot MgO \cdot i_{CO_2}, \quad (9)$$

где MgO – содержание оксидов в обожженном продукте, %

$$i_{CO_2} \text{ – теплосодержание CO}_2 \text{ при } t_{yx} = 350 \text{ °С},$$

$$i_{CO_2} = 663,67 \text{ кДж/нм}^3,$$

$$MgO = 21,7 \text{ \%},$$

$$Q_{дис} = 0,01 \cdot 3000 \cdot 0,553 \cdot 21,7 \cdot 663,67 / 3600 = \mathbf{66,4 \text{ кВт}}.$$

Количество тепла, уходящего с пылеуносом материала

$$Q_{ун} = G_{ун} \cdot C_{ун} \cdot t_{yx}, \quad (10)$$

где $G_{ун}$ – теплоемкость уносимой пыли, кг/ч,

$$C_{ун} = 1,06 \text{ кДж / кг} \cdot \text{град};$$

t_{yx} – температура уходящих газов из печи, град.

В ходе опытных испытаний и наблюдения за работой механизма, общий унос сухого материала приняли за 5 %. Степень теплоты декарбонизации безвозвратного уноса 0,3–0,6; принимаем равной 0,4.

$$G_{ун} = P_c \cdot \delta_{ун} / 100 (1 - \text{ппп} / 100) \cdot p, \text{ кг/с}, \quad (11)$$

где $p = 0,3 \dots 0,6$,

P_c – производительность печи по сухому способу, кг/ч.

$$G_{ун} = 3000 \cdot 5 / 100 \cdot (1 - 22 / 100) \cdot 0,6 = 70 \text{ кг/ч}$$

Количество тепла, потерянного при уносе пыли с продуктами горения в атмосферу:

$$Q_{ун} = 70 \cdot 1,06 \cdot 350 / 600 = 7,2 \text{ кВт}$$

Количество тепла, потерянного с уходящими дымовыми газами:

$$Q_{ун}^2 = 0,1 \cdot 0,5 Q_{дис}, \quad (12)$$

где $Q_{дис}$ – потери тепла с уходящими продуктами разложения, кВт:

$$Q_{ун}^2 = 0,1 \cdot 0,5 \cdot 66,4 = 3,32 \text{ кВт}.$$

Общие потери тепла с уносом составляют

$$Q_{ун}^{общ} = Q_{ун} + Q_{ун}^2, \quad (13)$$

$$Q_{ун}^{общ} = 7,2 + 3,32 = \mathbf{10,52 \text{ кВт}}.$$

Количество тепла, расходуемого с уходящими продуктами горения

$$Q_{дым} = V_{дым} \cdot i_{дым} + N_{CO_2} + N_{H_2O}, \quad (14)$$

Тепловой баланс вращающейся печи

Наименование статьи	Кол-во тепла, кВт	%
Приход тепла:		
Теплота горения	1351	98,7
Тепло воздуха	10	0,7
Тепло материала	7,2	0,5
Всего	1368,2	
Расход тепла:		
Нагрев материала	432	30,7
Испарение и перегрев влаги	158	11,2
Количество тепла на протекание химических реакций	152	10,8
Количество тепла, потерянного с уходящими продуктами разложения	66,4	4,7
Количество тепла, потерянного с теплом с уносом общие	10,52	0,7
Количество тепла, потерянного с уходящими продуктами горения	299	21,2
Количество тепла, ушедшее в окружающую среду	30	2,1
Количество тепла, потерянного с выходящим материалом	246	17,5
Невязка	39,72	
ИТОГО	1407,92	

где $V_{\text{дым}}$ – объем продуктов горения, уходящих из рабочего пространства печи с учетом подсосов окружающего горения. $V_{\text{дым}} = 11,931 \text{ м}^3/\text{с}$

$i_{\text{дым}} = 490 \text{ кДж/м}^3$ – энтальпия продуктов горения при температуре уходящих газов.

N_{CO_2} и $N_{\text{H}_2\text{O}}$ – количество выделяемого CO_2 и H_2O при обжиге в час.

$$Q_{\text{дым}} = (11,931 \cdot 135 + 225 + 360) \cdot 490 / 3600 = 299 \text{ кВт.}$$

Потери тепла корпусом печи в окружающую среду рассчитывались фактически, так как конструкция данного печного агрегата подразумевает внешнюю теплоизоляцию корпуса.

Исходя из замеров и расчетов теплопотери через корпус, составили $Q_{\text{окр}} = 30 \text{ кВт}$.

Тепло с выходящим готовым материалом:

$$Q_{\text{мат}} = P_{\text{вход}} \cdot C_n \cdot t_n, \quad (15)$$

где C_n – теплоемкость сухого сырья = $0,89 \text{ кДж/кг град}$;

$t_{\text{вых}}$ – температура материала загружаемого в печь = $425 \text{ }^\circ\text{C}$;

$P_{\text{вход}}$ – производительность печи по выходящему материалу = 2340 кг ;

$$Q_{\text{вых.мат}} = 2340 \cdot 0,89 \cdot 425 / 3600 = 246 \text{ кВт.}$$

Составим уравнение теплового баланса и определим расход топлива:

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{гор.}} + Q_{\text{возд.}} + Q_{\text{мат}} = 1351 + 7,2 + 10 = 1368,2 \text{ кВт}$$

$$\sum Q_{\text{расх}} = Q_{\text{м}} + Q_{\text{исп}} + Q_{\text{хим}} + Q_{\text{ун}}^{\text{общ}} + Q_{\text{дис}} + Q_{\text{дым}} + Q_{\text{окр}} + Q_{\text{вых.мат}}, \text{ кВт,} \quad (16)$$

$$\sum Q_{\text{расх}} = 432 + 158 + 152 + 10,52 + 66,4 + 299 + 30 + 246 = 1394 \text{ кВт.}$$

Результаты расчета теплового баланса опытной короткой вращающейся печи приведены в таблице.

Выводы

Рассматриваемое опытно-промышленное обжиговое оборудование вращающегося типа может быть использовано для получения небольших партий новых типов продукции с целью апробации инновационных технологий без повышенных капиталозатрат. Отсутствие футеровки при надлежащем уровне внешней теплоизоляции и наличии конструктивных элементов, обеспечивающих интенсивное перемешивание шихты в процессе термической обработки, не препятствует получению вяжущих, имеющих низкую и среднюю температуры обжига (не более $800 \text{ }^\circ\text{C}$). Небольшие размеры печи позволяют использовать маломощные электродвигатели до 10 кВт и горелочные устройства мощностью до 2 МВт .

Литература

1. Цыганков, Г.Т. Физико-химические и тепловые процессы в зоне спекания вращающейся печи при обжиге портландцементного клинкера / Г.Т. Цыганков // Вопросы химии и химической технологии. – 2009. – № 4. – С. 214–218.
2. Галицков, С.Я. Моделирование вспучивания керамзита во вращающейся печи как объекта управления / С.Я. Галицков, А.И. Данилушкин, А.С. Фадеев // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2011. – № 2. – С. 160–168.
3. Петухов, К.В. Математическая модель четырехслойного цилиндра при вспучивании керамзита во вращающейся печи / К.В. Петухов // Современные проблемы и пути их решения в науке, производстве и образовании. – 2014. – № 1. – С. 11–17.

4. Кондращенко, Е.В. Теоретические основы тепловой обработки гипсового вяжущего / Е.В. Кондращенко, А.А. Баранова, А.Н. Баранов // Научно-технический сборник. Коммунальное хозяйство городов. – 2006. – № 76. – С. 132–138.
5. Юрьев, Б.П. Изучение процесса термообработки сидеритовой руды в шахтной печи / Б.П. Юрьев, В.А. Гольцев, В.А. Дудко // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – № 8. – С. 36–42.
6. Винниченко, В.И. Анализ установок для дегидратации гипса и сравнение их по продолжительности тепловой обработки / В.И. Винниченко, В.В. Котляренко, А.В. Бабинцев // Вісник НТУ «ХПИ». – 2007. – № 26. – С. 123–127.
7. Шаповалов, Я.М. Совершенствование установки для обжига строительных материалов / Я.М. Шаповалов // Молодая мысль: наука, технологии, инновации. – 2015. – № 1. – С. 182–185.
8. Перескоков, А.И. Комбинированная установка обжига известняка / А.И. Перескоков, Д.А. Артов // Экология и промышленность России. – 2005. – № 4. – С. 14–16.
9. Мамаев, А.Н. Совершенствование конструкции шахтной газовой печи для обжига известняка фирмы Terruzzi Fercalx SPA / А.Н. Мамаев, Г.Д. Литвинова, С.А. Скоков // Строительные материалы. – 2013. – № 5. – С. 36–37.
10. Бабаев, Н.Х. Некоторые особенности теплотехнических зависимостей, проявляющихся при обжиге клинкера во вращающихся печах / Н.Х. Бабаев // Современные проблемы науки и производства. – 2015. – № 2. – С. 1–11.
11. Нестеров, А.В. Новая жизнь шахтных печей / А.В. Нестеров, Д.З. Батыжеев // Строительные материалы. – 2015. – № 3. – С. 49–51.
12. Решетняк, А. Совершенствование конструкции шахтных печей для обжига известняка / А. Решетняк, В.А. Конев, А.Н. Мамаев, Н.И. Серяков // Новые огнеупоры. – 2008. – № 5. – С. 25–27.
13. Монастырев, А.В. Инновационные шахтные печи противоточно прямоточного фильтрующего слоя / А.В. Монастырев // Строительные материалы. – 2010. – № 6. – С. 10–12.
14. Кройчук, Л.А. Типы известеобжигательных печей, используемых в странах Европейского союза / Л.А. Кройчук // Строительные материалы. – 2009. – № 9. – С. 25–29.
15. Мамаев, А.Н. Модернизация шахтных пересыпных печей обжига известняка / А.Н. Мамаев, О.В. Бойко // Строительные материалы. – 2014. – № 9. – С. 22–24.
16. Питак, И.В. Совершенствование производства извести в шахтных печах / И.В. Питак, П.В. Шапорев, А.В. Шестопалов, В.П. Шапорев // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – Т. 6. – № 1 (20). – С. 59–63.
17. Циклонная печь кальцинации – альтернатива вращающимся печам / С.Ф. Шишкин, Б.А. Фетисов // Инновации в материаловедении и металлургии. – Екатеринбург, 2012. – Ч. 1 – С. 132–136.
18. Монастырев, А.В. Состояние и перспективы применения циклонных печей для производства кальциевой и магнезиальной (доломитовой) извести / А.В. Монастырев // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2010. – № 6. – С. 33–46.
19. Монастырев, А.В. Современные печи для скоростного обжига мелких фракций карбонатных пород / А.В. Монастырев // Строительные материалы. – 2011. – № 1 – С. 40–47.
20. Любова, Т.С. Вращающиеся печи: учебное пособие по курсу / Т.С. Любова. – Смоленск: РИО филиала МЭИ в Смоленске, 2014. – 92 с.

Кошелев Василий Александрович, аспирант кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), vasilikosh@gmail.com

Аверина Галина Федоровна, старший преподаватель кафедры «Строительные материалы изделия», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), averinagf@susu.ru

Ульрих Дмитрий Владимирович, доктор технических наук, доцент, директор Архитектурно-строительного института, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), ulrikhdv@susu.ru

Поступила в редакцию 13 сентября 2021 г.

HEAT BALANCE CALCULATION FOR EXPERIMENTAL-INDUSTRIAL ROTATING CALCINING EQUIPMENT OF LOW-CAPACITY FOR PRODUCTION OF CONSTRUCTION BINDERS

V.A. Koshelev, vasilikosh@gmail.com

G.F. Averina, averinagf@susu.ru

D.V. Ulrikh, ulrikhdv@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Various types of calcining equipment used in the production of building materials and goods are considered, and the advantages and disadvantages of the constructions under study are described. It is proposed to use ultra-short (up to 20 m) rotary kilns for experimental-industrial production lines for the production of fine powders (binders for construction purposes) with a maximum calcining temperature of no more than 800 °C. On the example of the process of heat treatment of a modified carbonate charge, the heat balance has been calculated, confirming the possibility of using this type of equipment for obtaining small industrial batches of material (no more than 2 tph) in order to test innovative technologies without increased capital spending for the installation of expensive full-size rotating calcining equipment.

Keywords: calcining equipment, heat balance calculation, rotary kiln, dehydration, decarbonization, sintering.

References

1. Tsygankov G.T. [Physicochemical and Thermal Processes in the Sintering Zone of a Rotary Kiln during Firing of Portland Cement Clinker]. *Voprosy khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Issues of Chemistry and Chemical Technology], 2009, no. 4, pp. 214–218. (in Russ.)
2. Galitskov S.Ya., Danilushkin A.I., Fadeyev A.S. [Simulation of Expanded Clay Puffing in a Rotary Kiln As a Control Object]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskiye nauki* [Bulletin of The Samara State Technical University. Series: Engineering Sciences], 2011, no. 2, pp. 160–168. (in Russ.)
3. Petukhov K. V. [Mathematical Model of a Four-layer Cylinder With Expanded Clay Puffing in a Rotary Kiln]. *Sovremennyye problemy i puti ikh resheniya v nauke, proizvodstve i obrazovanii* [Modern Problems and Ways to Solve Them in Science, Production and Education], 2014, no. 1, pp. 11–17. (in Russ.)
4. Kondrashchenko E.V., Baranova A.A., Baranov A.N. [Theoretical Foundations of Heat Treatment of Gypsum Binder]. *Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik. Kommunal'noye khozyaystvo gorodov* [Scientific and Technical Collection. Communal Services of Cities], 2006, no. 76, pp. 132–138. (in Russ.)
5. Yur'yev B.P., Gol'tsev V.A., Dudko V.A. [Study of the Process of Heat Treatment of Siderite Ore in a Shaft Furnace]. *Chernaya Metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information], 2018, no. 8, pp. 36–42. (in Russ.)
6. Vinnichenko V.I., Kotlyarenko V.V., Babintsev A.V. [Analysis of Gypsum Dehydration Plants and their Comparison by the Duration of Heat Treatment]. *Visnik NTU "KhPI"* [Bulletin of NTU "KhPI"], 2007, no. 26, pp. 123–127. (in Russ.)
7. Shapovalov Ya.M. [Improvement of the Installation for the Firing of Building Materials]. *Molodaya mysl': nauka, tekhnologii, innovatsii* [Young Thought: Science, Technology, Innovation], 2015, no. 1, pp. 182–185. (in Russ.)
8. Pereskokov A.I., Artov D.A. [Combined Limestone Firing Plant]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology And Industry of Russia], 2005, no. 4, pp. 14–16. (in Russ.)
9. Mamayev A.N., Litvinova G.D., Skokov S.A. [Improvement of The Design of a Shaft Gas Kiln for Burning Limestone From Terruzzi Fercalx SPA]. *Stroitel'nyye materialy* [Construction Materials], 2013, no. 5, pp. 36–37. (in Russ.)
10. Babayev N.Kh. [Some Features of Heat Engineering Dependencies, Manifested During Clinker Firing in Rotary Kilns]. *Sovremennyye problemy nauki i proizvodstva* [Modern Problems of Science and Production], 2015, no. 2, pp. 1–11. (in Russ.)
11. Nesterov A.V., Batyzhnev D.Z. [A New Life for Shaft Furnaces]. *Stroitel'nyye materialy* [Construction Materials], 2015, no. 3, pp. 49–51. (in Russ.)
12. Reshetnyak A., Konev V.A., Mamayev A.N., Seryakov N.I. [Improvement of The Design of Shaft Furnaces for Burning Limestone]. *Novyye ognepury* [New Refractories], 2008, no. 5, pp. 25–27. (in Russ.)

13. Monastirev A.V. [Innovative Shaft Furnaces of Countercurrent Direct-Flow Filtering Bed]. *Stroitel'nyye materialy* [Construction Materials], 2010, no. 6, pp. 10–12. (in Russ.)
14. Kroychuk L.A. [Types of Lime Kilns Used in European Union Countries]. *Stroitel'nyye materialy* [Construction Materials], 2009, no. 9, pp. 25–29. (in Russ.)
15. Mamayev A.N., Boyko O.V. [Modernization of Shaft Transfer Furnaces for Calcining Limestone]. *Stroitel'nyye materialy* [Construction Materials], 2014, no. 9, pp. 22–24. (in Russ.)
16. Pitak I.V., Shaporev P.V., Shestopalov A.V., Shaporev V.P. [Improvement of Lime Production in Shaft Furnaces]. *Tekhnologicheskyy audit i rezervy proizvodstva* [Technological Audit and Production Reserves], 2014, vol. 6, no. 1 (20), pp. 59–63. (in Russ.)
17. Shishkin S.F., Fetisov [Cyclone Calcination Kiln - an Alternative to Rotary Kilns]. *Innovatsii v materialovedenii i metallurgii* [Innovations in Materials Science and Metallurgy]. Ekaterinburg, 2012, part. 1, pp. 132–136. (in Russ.)
18. Monastirev A.V. [State and Prospects for the Use of Cyclonic Furnaces for the Production of Calcium and Magnesian (Dolomite) Lime]. *ALITinform: Tsement. Beton. Sukhiye smesi* [ALITinform: Cement. Concrete. Dry mixes], 2010, no. 6, pp. 33–46. (in Russ.)
19. Monastirev A.V. [Modern Furnaces for High-speed Firing of Fine Fractions of Carbonate Rocks]. *Stroitel'nyye materialy* [Construction Materials], 2011, no. 1, pp. 40–47. (in Russ.)
20. Lyubova T.S. *Vrashchayushchiyesya pechi: uchebnoye posobiye po kursu* [Rotary Kilns Course Manual]. Smolensk, RIO filiala M·EI v Smolenske Publ., 2014. 92 p.

Received 13 September 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Кошелев, В.А. Расчет теплового баланса опытно-промышленного обжигового оборудования вращающегося типа малой производительности для получения строительных вяжущих / В.А. Кошелев, Г.Ф. Аверина, Д.В. Ульрих // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 48–54. DOI: 10.14529/build210406

FOR CITATION

Koshelev V.A., Averina G.F., Ulrikh D.V. Heat Balance Calculation for Experimental-Industrial Rotating Calcining Equipment of Low-Capacity for Production of Construction Binders. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2021, vol. 21, no. 4, pp. 48–54. (in Russ.). DOI: 10.14529/build210406