

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет», г. Екатеринбург, Россия

УДК 66.041.55.043.1.001.24

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ФУТЕРОВКИ ДЛЯ ЗОНЫ ОБЖИГА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТУННЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

Рассмотрены граничные условия и методика расчета параметров теплопередачи через футеровку туннельной печи. Разработана энергоэффективная структура футеровки свода и стен печи, а также пода вагонетки. Установлено, что совершенствование структуры печных ограждений обеспечивает повышение энергоэффективности технологического процесса и создает условия для улучшения качества термообработки полупродукта-сырца. Определены параметры потерь теплоты и наружной температуры кладки, при которых перепад температуры от оси туннеля к стенам, своду и поду вагонетки не превышает 17, 25 и 43 °С соответственно.

Ключевые слова: туннельная печь, футеровка, огнеупор, теплоизоляция, термическое сопротивление, тепловой поток.

Туннельные печи непрерывного действия являются основными теплотехническими агрегатами в производстве изделий, технологический процесс изготовления которых предусматривает термообработку полупродукта-сырца. Наряду с традиционными требованиями к тепло-технологическому оборудованию, предусматривающими длительный срок службы и низкий расход тепловой энергии, для туннельных печей принципиальное значение имеет однородность поля температур в поперечном сечении рабочего пространства. Эти требования к конструкции туннельных печей являются взаимосвязанными и взаимообусловленными. Их выполнение предусматривает применение энергоэффективных печных ограждений, и прежде всего в зоне обжига изделий. При этом наиболее сложной представляется футеровка печей, предназначенных для обжига периклазовых и высокоглиноземистых огнеупоров, для которых максимальная температура газовой среды составляет 1600–1750 °С, а перепад температуры по ширине и высоте туннеля достигает 170–180 °С [1].

Отличительной особенностью туннельных печей непрерывного действия является стабильность температурного режима технологического процесса, автоматическое управление которым ведется по температуре газовой среды в рабочем пространстве. В этой связи представляется обоснованным при расчете структуры футеровки использовать уравнение стационарной теплопроводности через много-

слойную плоскую стенку при постановке граничных условий III рода [2]:

$$q = \frac{t_r - t_{окр}}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n R_i + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (1)$$

где q — удельный тепловой поток в окружающую среду, Вт/(м²·К); t_r и $t_{окр}$ — температура в туннеле печи и окружающей среды соответственно, °С (принимается $t_r = 1700$ °С и $t_{окр} = 40$ °С); α_1 и α_2 — коэффициент теплоотдачи от внутренней и внешней поверхности стенки соответственно, Вт/(м²·К) (принимается $\alpha_1 = 30$ Вт/(м²·К)); R_i — коэффициент термического сопротивления i -го слоя стенки, м²·К/Вт;

$R_i = \delta_i/\lambda_i$, при этом $R_{кп} = \sum_{i=1}^n R_i$ — суммарное

термическое сопротивление многослойной стенки; δ_i — толщина i -го слоя стенки, м; λ_i — теплопроводность материала i -го слоя стенки, Вт/(м·К); n — число слоев материала в стенке.

Для условий естественной конвекции α_2 определяется выражением

$$\alpha_2 = k_n \sqrt[4]{t_{нар} - t_{окр}} + \frac{C_0 \varepsilon_n}{t_{нар} - t_{окр}} \times \left[\left(\frac{t_{нар} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{окр} + 273}{100} \right)^4 \right],$$

где k_n — коэффициент, учитывающий положение поверхности и направление теплоотдачи в пространстве, для стен, свода и пода k_n равен 2,4, 3,3 и 1,6 соответственно; $t_{нар}$ — температура внешней поверхности стенки, °С; C_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела, $C_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴); ε_n — степень черноты внешней поверхности стенки, $\varepsilon_n = 0,8$.



В. Я. Дзюзер
E-mail: vdzuzer@yandex.ru

Таблица 1. Характеристика изделий, используемых в футеровке туннельной печи

Марка изделия	Содержание, мас. %	Кажущаяся плотность, г/см ³	Температура применения, °С	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Кирпич:				
DURITAL RK 10*1	MgO 86 Cr ₂ O ₃ 10	3,33	> 1700	$4,2 - 2,14 \cdot 10^{-3}t + 0,67 \cdot 10^{-6}t^2$
ПХП-2	MgO 86 Cr ₂ O ₃ 9–15	–	1640	$3,67 - 0,93 \cdot 10^{-3}t$
Блок SUPRAL E 75*1	Al ₂ O ₃ 76	2,54	> 1700	1,5
Кирпич:				
МЛС-62 (ГОСТ 24704)	Al ₂ O ₃ 62	–	1450	$1,787 - 0,52 \cdot 10^{-3}t + 0,22 \cdot 10^{-6}t^2$
ША	Al ₂ O ₃ 30	2,1	1300	$0,7 + 0,64 \cdot 10^{-3}t$
ISOM 32*3	Al ₂ O ₃ 80	1,30	1730	$0,418 + 0,14 \cdot 10^{-3}t$
MD-1650*2	Al ₂ O ₃ 73	1,00	1650	$0,384 + 0,07 \cdot 10^{-3}t$
MD-1450*2	Al ₂ O ₃ 52	0,80	1430	$0,23 + 0,1 \cdot 10^{-3}t$
MD-1300*2	Al ₂ O ₃ 37	0,60	1260	$0,1 + 0,1 \cdot 10^{-3}t$
LEGRAL 40/2*1	Al ₂ O ₃ 37	1,10	1400	$0,325 + 0,225 \cdot 10^{-3}t$
КЛ-1,1	Al ₂ O ₃ 90	1,10	1550	0,55
ШЛ-0,9	–	0,90	1270	$0,29 + 0,23 \cdot 10^{-3}t$
Волокнистая плита:				
PROMAFORM®-1600*4	Al ₂ O ₃ 59	0,17	1600	$0,1 + 0,04 \cdot 10^{-3}t + 0,03 \cdot 10^{-6}t^2$
PROMAFORM®-1260*4	Al ₂ O ₃ 42	0,32	1260	$0,055 + 0,015 \cdot 10^{-3}t + 0,141 \cdot 10^{-6}t^2$
Рулонное волокно:				
ALSIFLEX®-1600*4	Al ₂ O ₃ 72	0,13	1450	$0,11 - 0,21 \cdot 10^{-3}t + 0,34 \cdot 10^{-6}t^2$
ALSIFLEX®-1430*4	Al ₂ O ₃ 28–32	0,13	1280	$0,056 - 0,003 \cdot 10^{-3}t + 0,215 \cdot 10^{-6}t^2$
ALSIFLEX®-1260*4	Al ₂ O ₃ 42–47	0,13	1110	$0,145 - 0,31 \cdot 10^{-3}t + 0,44 \cdot 10^{-6}t^2$
Волокнистая плита:				
BLOK 607-1100*5	–	0,32	1100	$0,042 + 0,07 \cdot 10^{-3}t + 0,07 \cdot 10^{-6}t^2$
BLOK 607-800*5	–	0,32	800	$0,077 - 0,09 \cdot 10^{-3}t + 0,25 \cdot 10^{-6}t^2$
Смесь LEGRIT 120-09*1	Al ₂ O ₃ 35 SiO ₂ 37	1,00	1200	0,2

*1 Фирмы «RHI Glas GmbH», Германия.

*2 Фирмы «Zibo Jiahui Refractory», Китай.

*3 Фирмы «Linco Vaxo industrie refrattari», Италия.

*4 Фирмы «Promat GmbH», Германия.

*5 Фирмы «Морган Термал Керамикс Сухой Лог», Россия.

Перепад температуры в каждом слое кладки пропорционален термическому сопротивлению этого слоя. Поэтому температура между слоями t_i определяется по формуле

$$t_i = t_r - q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{n-1} R_i \right).$$

Учитывая температурную зависимость теплопроводности материала, задача определения тепловых потерь в окружающую среду решается методом последовательных приближений (методом итераций). Итерационный процесс прекращается, как только выполнено условие по заданной погрешности расчета $\epsilon_{\text{погр}} \leq 0,005$ [2]:

$$\left| \frac{q_1 - q_2}{q} \right| \leq \epsilon_{\text{погр}},$$

где q — плотность теплового потока, определенная по формуле (1), Вт/м²; q_1 — плотность

теплового потока на входе в стенку, Вт/м², $q_1 = \alpha_1(t_r - t_{\text{вн}})$; q_2 — плотность теплового потока от внешней поверхности стенки в окружающую среду, Вт/м², $q_2 = \alpha_2(t_{\text{нар}} - t_{\text{окр}})$; $t_{\text{вн}}$ и $t_{\text{нар}}$ — определяемая расчетом температура внутренней и внешней поверхности многослойной стенки соответственно, °С ($t_{\text{вн}} = t_r - q/\alpha_1$ и $t_{\text{нар}} = t_{\text{окр}} + q/\alpha_2$). На первой итерации принимаем $1/\alpha_2 = 0,05$.

Для печных ограждений, не подвергаемых механической нагрузке при эксплуатации, выбор огнеупорных и теплоизоляционных изделий производится с учетом их химико-минерального состава, исключая химическое взаимодействие контактирующих слоев кладки при нагревании, а также допустимой температуры применения. Для нагруженных элементов кладки учитывается механическая прочность изделий. У кирпича LEGRAL 40/2 (табл. 1) предел прочности при сжатии равен

10 МПа, что позволяет использовать эту марку изделий в качестве теплоизоляционного слоя в футеровке пода вагонетки.

При конструировании футеровки промышленных печей допустимая величина потерь задается плотностью теплового потока q или предельной температурой внешней поверхности кладки $t_{нар}$ [2]. Для плавильных печей $t_{нар}$ определяется величиной q , для туннельных печей потери теплоты в окружающую среду задаются предельным значением $t_{нар}$ для соответствующих конструктивных элементов рабочего пространства. Например, для боковых стен печи принято задавать $t_{нар} = 70 \div 80$ °С.

Рассмотрим известную футеровку стен в зоне обжига туннельной печи, предназначенной для обжига основных огнеупоров [3]. Четырехслойная стенка толщиной 1050 мм состоит из огнеупора ПХП-2 (465 мм), легковесных изделий КЛ-1,1 (115 мм) и ШЛ-0,9 (350 мм) и внешнего слоя, выполненного из кирпича марки ША толщиной 120 мм. Расчеты показывают, что при рабочей температуре 1700 °С футеровка стен характеризуется следующими показателями: $R_{кл} = 1,32$ м²·К/Вт, $t_{нар} = 117$ °С и $q = 1164,6$ Вт/м². При этом $t_{вн} = 1661$ °С, т. е. выше предельной температуры применения ПХП-2 (см. табл. 1). Следует отметить, что нормативное значение температуры начала размягчения огнеупора ПХП-2 достигается при рабочей температуре в туннеле около 1678 °С. Очевидно, что для достижения $t_{нар} = 70 \div 80$ °С необходимо использовать не только более эффективную теплоизоляцию, но и огнеупор, температура применения которого превышает 1700 °С. Приведенные в статье результаты расчетов получены для футеровки, огнеупорный слой которой выполнен периклазохромитовым огнеупором DURITAL RK 10 (см. табл. 1).

Данные рис. 1 свидетельствуют о том, что $t_{нар} = 70 \div 80$ °С обеспечивается при уменьшении потерь теплоты в окружающую среду до 358–506 Вт/м². Достижение такого уровня энергоэффективности футеровки становится возможным при повышении ее термического сопротивления до 4,52–3,17 м²·К/Вт. Таким образом, современная футеровка стен высокотемпературных туннельных печей должна обладать термическим сопротивлением, в 2,7 раза превышающим известные отечественные технические решения [3]. Следствием увеличения $R_{кл}$ являются повышение температуры внутренней поверхности кладки до 1688–1683 °С и уменьшение перепада температуры в поперечном сечении туннеля до 12–17 °С (рис. 2). Разработка футеровки с высоким термическим

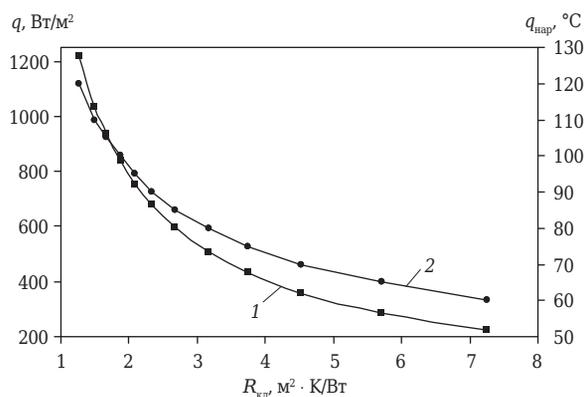


Рис. 1. Влияние термического сопротивления кладки $R_{кл}$ на q (1) и $t_{нар}$ (2) при $t_r = 1700$ °С

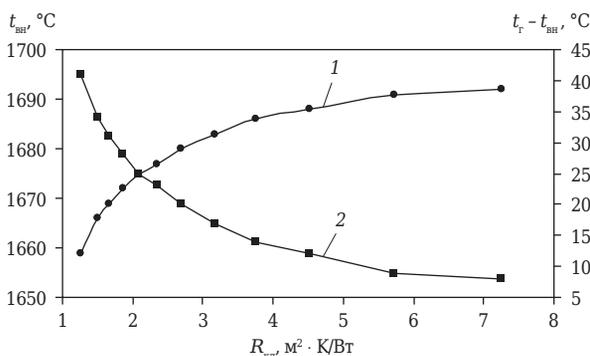


Рис. 2. Влияние термического сопротивления кладки $R_{кл}$ на $t_{вн}$ (1) и перепад температуры газовой среды $t_r - t_{вн}$ (2) при $t_r = 1700$ °С

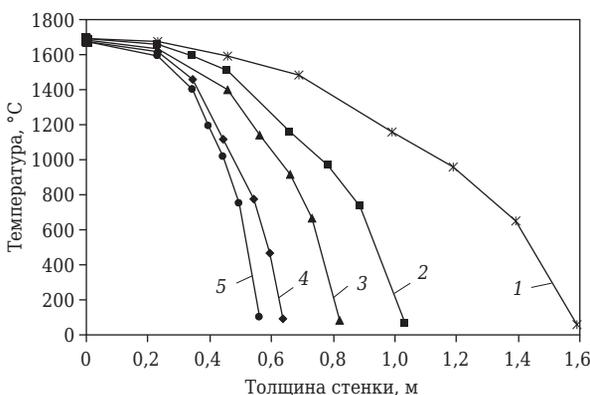


Рис. 3. Распределение температуры по толщине боковой стенки: 1–5 — температура внешней поверхности стенки 60, 70, 80, 90 и 100 °С соответственно

сопротивлением предполагает использование современных теплоизоляционных материалов, характеризующихся не только высокой температурой применения, но и относительно низкой теплопроводностью. Их сочетание позволяет сформировать энергоэффективную структуру кладки, обеспечивающую заданную температуру внешней поверхности при конструктивно приемлемой толщине стен (табл. 2). При этом

Таблица 2. Структура кладки боковой стены туннельной печи (толщина слоя, мм)

Марка изделия	Температура внешней поверхности стенки, °С				
	60	70	80	90	100
DURITAL RK 10	230	230	230	230	230
ISOM 32	230	115	–	–	–
MD-1650	230	115	230	115	115
PROMAFORM®-1600	300	200	100	100	50
PROMAFORM®-1260	200	125	100	100	50
Blok 607-1100	200	100	70	50	50
Blok 607-800	200	150	90	40	65
Толщина стенки, мм	1590	1035	820	635	560

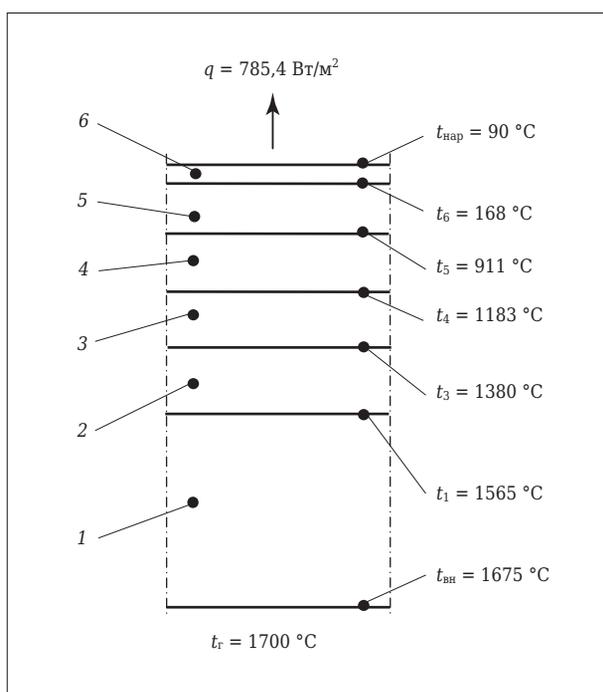


Рис. 4. Структура футеровки и параметры теплопередачи через теплоизолированный арочный свод печи: 1 — DURITAL RK 10 (345 мм); 2 — MD-1650 (115 мм); 3 — ALSIFLEX®-1600 (100 мм); 4 — ALSIFLEX®-1430 (100 мм), 5 — ALSIFLEX®-1260 (100 мм); 6 — LEGRIT 120-09 (20 мм)

во всех вариантах структуры максимальная температура на контакте изделий не превышает температуры их применения (рис. 3).

На наш взгляд, практический интерес представляет структура футеровки стены, при которой $t_{нар} = 80$ °С. Она отличается не только малой толщиной кладки (820 мм), характерной для низкотемпературных зон туннельных печей, но и рядом других особенностей. Прежде всего следует отметить, что перевязка огнеупорных кирпичей с формованным легковесным изделием MD-1650 снижает вероятность выпучивания внутреннего слоя футеровки внутри печи при ее первичном нагреве и в процессе эксплуатации. Кроме того, повышается техно-

логичность монтажа стены, поскольку толщина крупногабаритных жестких волокнистых плит в этом варианте холодной футеровки не предусматривает многослойное сочетание однотипных изделий.

Для службы периклазохромитовых изделий принципиальное значение имеет величина градиента температуры по толщине кирпича, под действием которого в огнеупоре формируется зональность, которая включает наименее измененную, переходную и рабочую зоны [3]. Наибольшие изменения структуры и химико-минерального состава наблюдаются в рабочей зоне. При этом чем больше градиент температуры, тем в большей степени эти изменения отражаются на стойкости огнеупора в процессе длительной эксплуатации. Для структуры футеровки стен, приведенной в публикации [3], градиент температуры по толщине огнеупорной кладки составляет 0,49 °С/мм. Для структуры футеровки, характеризуемой $t_{нар} = 80$ °С (см. табл. 2), он снижается до 0,20 °С/мм, что свидетельствует о более благоприятных условиях службы огнеупора.

В наибольшей степени зональность проявляется в огнеупоре, установленном в подвесном своде печи без теплоизоляции. При $t_r = 1700$ °С температура внутренней и наружной поверхностей огнеупора толщиной 380 мм составляет 1422 и 309 °С соответственно, а градиент температуры 2,93 °С/мм. При этом наблюдается также значительный перепад температуры в туннеле в сторону свода, равный 278 °С.

Несмотря на очевидные недостатки, подвесные плоские своды находят широкое применение в высокотемпературных туннельных печах. Объяснение этого парадоксального факта заключается, по-видимому, в возможности выполнения ремонтных работ на горячем своде. В то же время опыт эксплуатации регенераторов высокотемпературных стекловаренных печей свидетельствует о возможности применения

арочных распорных сводов с шириной пролета до 4,5 м, в которых периклазовый огнеупор подвергается эффективной теплоизоляции. Несмотря на высокий ТКЛР огнеупора, конструкция металлической обвязки свода обеспечивает его полную физическую целостность при первичном нагреве и циклическом режиме работы регенератора, плановый срок службы которого составляет 8–10 лет [4].

Холодная футеровка арочного свода (рис. 4) выполняется кирпичом MD-1650 и тремя слоями рулонных волокнистых изделий ALSIFLEX с различной температурой применения. Наружная поверхность теплоизоляции покрывается герметизирующим слоем водного раствора алюмосиликатной смеси LEGRIT 120-09 (см. табл. 1). Термическое сопротивление футеровки свода, равное $2,02 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$, обеспечивает более чем 10-кратное снижение тепловых потерь в окружающую среду по сравнению с подвесным сводом, у которого $q = 8347,7 \text{ Вт/м}^2$. Как следствие, градиент температуры по толщине огнеупора уменьшается до $0,14 \text{ }^\circ\text{C/мм}$, а перепад температуры газовой среды в сторону свода составляет $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Достоинством рассмотренной футеровки свода является ее пригодность к эксплуатации при рабочей температуре в печи до $1800 \text{ }^\circ\text{C}$.

Рассмотрим особенности футеровки пода вагонетки, предназначенной для перемещения обжигаемых изделий по туннелю печи. Традиционная трехслойная структура футеровки (сверху вниз) состоит из огнеупорных изделий ПХП-2 (150 мм), МЛС-62 (300 мм) и шамота толщиной 132 мм [3]. Она характеризуется низким термическим сопротивлением — $0,4 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$, большими потерями теплоты — $q = 3401,0 \text{ Вт/м}^2$ и высокой температурой наружной поверхности — $t_{\text{нар}} = 224 \text{ }^\circ\text{C}$. При $t_{\text{вн}} = 1587 \text{ }^\circ\text{C}$ перепад температуры газовой среды в сторону пода составляет $113 \text{ }^\circ\text{C}$. На рис. 5 показана структура футеровки пода вагонетки, в которой наряду с огнеупорными изделиями используется теплоизоляционный кирпич LEGRAL 40/2. Повышение термического сопротивления кладки до $0,8 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ обеспечивает снижение тепловых потерь в окружающую среду и температуры наружной поверхности пода в 1,8 раза по сравнению с вышерассмотренной структурой футеровки. Как следствие, перепад температуры газовой среды в сторону пода уменьшается до $61 \text{ }^\circ\text{C}$.

Применение крупногабаритных плит SUPRAL E 75 ($600 \times 500 \times 120 \text{ мм}$), характеризующихся высоким пределом прочности при сжатии (75 МПа), позволяет сформировать дифференцированную структуру теплоизоляционного

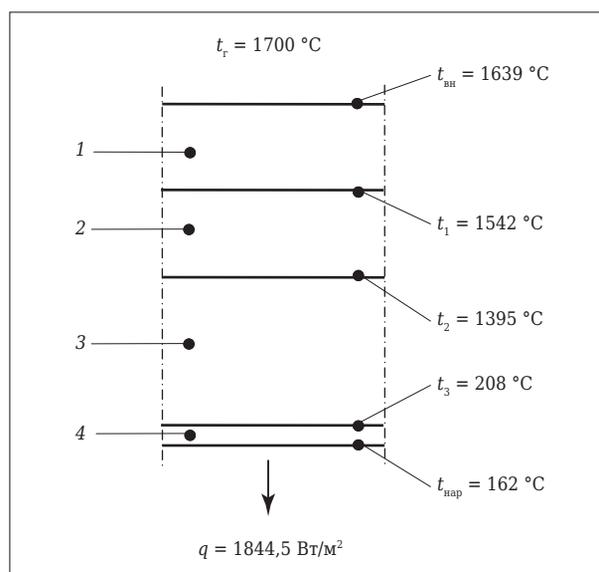


Рис. 5. Структура футеровки и параметры теплопередачи через теплоизолированный под вагонетки: 1 — DURITAL RK 10 (130 мм); 2 — SUPRAL E 75 (120 мм); 3 — LEGRAL 40/2 (325 мм); 4 — LEGRIT 120-09 (5 мм)

слоя футеровки. По аналогии с подом стекловаренной печи [5] нагрузка от садки обжигаемых изделий и огнеупорных слоев футеровки воспринимается кирпичной кладкой LEGRAL 40/2, выполненной в виде ленточного фундамента. Внутреннее пространство между опорной кладкой (61,7% от площади плиты) заполняется легковесными изделиями (сверху вниз) MD-1650 (65 мм), MD-1450 (65 мм) и MD-1300 (195 мм). С учетом комбинированной структуры теплоизоляции футеровка пода вагонетки характеризуется средневзвешенными параметрами: $q = 1298,8 \text{ Вт/м}^2$ и $t_{\text{нар}} = 124 \text{ }^\circ\text{C}$. В результате повышения температуры внутренней поверхности футеровки до $1657 \text{ }^\circ\text{C}$ перепад температуры газовой среды в сторону пода равен $43 \text{ }^\circ\text{C}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование современных огнеупорных и теплоизоляционных материалов позволяет кардинальным образом усовершенствовать структуру футеровки высокотемпературных туннельных печей. В результате многократного уменьшения потерь теплоты в окружающую среду температура наружной поверхности свода и боковых стен печи, а также пода вагонетки может быть снижена до $80, 90$ и $124 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно. При этом существенно повышается однородность температурного поля в поперечном сечении печи, характеризующаяся перепадом температуры от оси к стенам $17 \text{ }^\circ\text{C}$, к своду печи и поду вагонетки 25 и $43 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно. Таким образом, совершенствова-

ние структуры печных ограждений обеспечивает не только повышение энергоэффективности технологического процесса, но и создает объективные предпосылки для улучшения качества термообработки полупродукта-сырца.

Библиографический список

1. **Кащеев, И. Д.** Химическая технология огнеупоров : учебное пособие / И. Д. Кащеев, К. К. Стрелов, П. С. Мамыкин. — М. : Интермет Инжиниринг, 2007. — 752 с.
2. **Дзюзер, В. Я.** Теплотехника и тепловая работа печей : учебное пособие / В. Я. Дзюзер. — Екатеринбург : АМБ, 2015. — 352 с.
3. **Аксельрод, Л. М.** Служба огнеупоров : справ. изд. / Л. М. Аксельрод [и др.] ; под ред. И. Д. Кащеева, Е. Е. Грищенко. — М. : Интермет Инжиниринг, 2002. — 656 с.
4. **Дзюзер, В. Я.** Энергоэффективная структура кладки высокотемпературного регенератора стекловаренной печи / В. Я. Дзюзер // Новые огнеупоры. — 2014. — № 2. — С. 3–6.

* * *

Статья написана по результатам исследований, проводимых в рамках реализации и за счет средств Программы повышения конкурентоспособности «5-100-2020».

Dzyuzer, V. Ya. Energy-efficient structure for the lining of the high-temperature regenerator of a glassmaking furnace / V. Ya. Dzyuzer // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 1. — P. 1–4.

5. **Дзюзер, В. Я.** Основы разработки теплоизолированного пода стекловаренной печи / В. Я. Дзюзер // Новые огнеупоры. — 2014. — № 9. — С. 31–34.

Dzyuzer, V. Ya. Basis for the development of the heat-insulating floor of a glassmaking furnace / V. Ya. Dzyuzer // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 55, № 5. — P. 444–447. ■

Получено 07.05.15
© В. Я. Дзюзер,
2015 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



11th India International Refractories Congress
IREFCON 2016

IREFCON 2016 — 11-я Индийская международная конференция по огнеупорам

20–22 января 2016 г. г. Хайдарабад, Индия

Тематика

- Оценка качества сырья по термомеханическим показателям
- Производство чугуна и стали в Индии: перспективы для будущих технических кадров
- Торкретирование шахты доменной печи
- Огнеупоры для сталелитейной промышленности
- Новейшие достижения в контроле огнеупоров и оборудовании
- Огнеупоры для цементной промышленности
- Потребление легковесных огнеупоров
- Снижение стоимости огнеупоров путем систематического их совершенствования

www.irefcon.org