

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

УДК 666.762.1.043:666.1.031.29

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ СТРУКТУРА ФУТЕРОВКИ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ

Выполнен анализ известных футеровок канала горелочного устройства стекловаренной печи. Приведена оригинальная структура футеровки канала, обеспечивающая двукратное снижение потерь теплоты в окружающую среду.

Ключевые слова: стекловаренная печь, футеровка горелочного устройства, огнеупор, теплоизоляция, термическое сопротивление, тепловой поток.

Важнейшей и наиболее сложной конструктивной частью регенеративных стекловаренных печей является горелочное устройство. Оно состоит из огнеупорного канала, соединяющего регенератор с рабочим пространством печи, и газовых горелок. В воздушный период работы регенератора через канал в печь подается подогретый воздух, а в дымовой период через него удаляются продукты сгорания топлива.

Для стойкости футеровки канала критичным является ее контакт с отходящими печными газами, содержащими летучие соединения щелочных металлов и пылевидные компоненты шихты. Высокие турбулентность ($Re \approx 90000$, где Re — число Рейнольдса) и температура (1450–1550 °С) продуктов сгорания определяют применение в горячей футеровке канала электроплавленных бадделеитокорундовых огнеупоров. Для кампании печей, не превышающей 8 лет, используют огнеупоры типа AZS-33 (33 % ZrO_2) с нормальной усадочной раковинной [1]. При этом толщина футеровки свода и стен канала составляет 250 мм, выстилки 100 мм. Для обеспечения 10-летней кампании печи представляется целесообразным применение изделий типа AZS-36 (36 % ZrO_2) с пониженным содержанием стеклофазы (13–14 %). В этом случае толщина огнеупорной кладки свода и стен канала может быть уменьшена до 200 мм.

В указанном диапазоне температур теплопроводность электроплавленного бадделеитокорунда 6,3–7,2 Вт/(м·К). При толщине огнеупорной кладки 250 мм тепловой поток в окружающую среду составляет 15,6–17,2 МВт/м², что свидетельствует о необходимости теплоизоляции AZS-огнеупоров. Установка теплоизоляции по-

зволяет минимизировать потери теплосодержания дыма на пути от печи до регенератора, а также обеспечить нормативные условия для эксплуатации и обслуживания топливной системы, расположенной под выстилкой канала. Характеристика изделий, используемых в футеровке канала, приведена в таблице. Мертель и смеси затворяются водой, они затвердевают при температуре окружающей среды.

Впервые требования к эффективности тепловой изоляции канала горелочного устройства стекловаренной печи были сформулированы французской фирмой SEPR. Для сечений 1–1, 2–2 и 3–3 (см. рисунок) они заданы удельным тепловым потоком в окружающую среду $q = 1580$ Вт/м². При средней температуре нагрева огнеупора 1500 °С приведенной величине q соответствуют коэффициент термического сопротивления кладки $R \approx 0,86$ м²·К/Вт и наружная температура футеровки $t_{нар} \approx 139$ °С. Для геометрических размеров канала печи производительностью 320 т/сут суммарные потери теплоты через указанные элементы футеровки составляют 25,3 кВт. С учетом потерь теплоты через другие зоны выстилки канала (сечения 4–4 и 5–5) общие потери теплоты через кладку достигают примерно 68,7 кВт. Следовательно, для печи с подковообразным пламенем, имеющей два канала, общие потери теплоты равны 137,5 кВт, что превышает потери через теплоизолированный свод рабочего пространства печи (100 кВт) [2]. Причем площадь поверхности свода в 3,2 раза больше площади поверхностей двух каналов.

В настоящее время наиболее энергоэффективной является структура холодной футеровки канала, применяемая в западноевропейских проектах стекловаренных печей. Перед установкой изоляции наружная поверхность бадделеитокорундовых огнеупоров герметизируется слоем цирконо-муллитового мертеля толщиной 5 мм. Первый слой холодной футеровки по-



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

Характеристика огнеупорной продукции, используемой в холодной футеровке канала

Продукция	Содержание, мас. %	Кажущаяся плотность, кг/м ³	Температура применения, °С	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Электроплавленные AZS-изделия	ZrO ₂ 36	3650	1700	$8,84 - 11,9 \cdot 10^{-3}t + 7,0 \cdot 10^{-6}t^2$
Цирконо-муллитовый мертель (зерно <0,3 мм)	ZrO ₂ 31 Al ₂ O ₃ 49	2500	1650	–
Цирконо-силикатная смесь (зерно <3 мм)	ZrO ₂ 63 SiO ₂ 33	3830	1800	$2,0 - 1,8 \cdot 10^{-3}t + 0,8 \cdot 10^{-6}t^2$
Алюмосиликатная смесь (зерно <5 мм)	Al ₂ O ₃ 35 SiO ₂ 37	1000	1200	0,2
Огнеупор муллитокремнеземистый	Al ₂ O ₃ 65	2450	1650	$1,08 + 0,32 \cdot 10^{-3}t$
Кирпич L 23* ¹	Al ₂ O ₃ 37	480	1250	$0,1 + 0,1 \cdot 10^{-3}t$
Кирпич L 26* ¹	Al ₂ O ₃ 58	790	1400	$0,23 + 0,1 \cdot 10^{-3}t$
Кирпич L 28* ¹	Al ₂ O ₃ 68	880	1500	$0,28 + 0,1 \cdot 10^{-3}t$
Кирпич L 30* ¹	Al ₂ O ₃ 73	1,02	1600	$0,35 + 0,18 \cdot 10^{-3}t - 0,08 \cdot 10^{-6}t^2$
Плита теплоизоляционная PROMASIL®-1000F* ²	–	290	1000	$0,042 + 0,165 \cdot 10^{-3}t$
Волокнистая огнеупорная плита Ceraboard 100* ³	–	310	1260	$0,053 + 0,022 \cdot 10^{-3}t + 0,12 \cdot 10^{-6}t^2$
Плита Blok 607-1100* ³	–	320	1100	$0,042 + 0,07 \cdot 10^{-3}t + 0,07 \cdot 10^{-6}t^2$
Рулонное волокно МКРВ-200* ³	–	200	1150	$0,04 + 0,1 \cdot 10^{-3}t + 0,08 \cdot 10^{-6}t^2$

*¹ Фирмы «RHI Glas GmbH», Германия. *² Фирмы «Promat GmbH», Германия. *³ Фирмы «Морган Термал Керамикс Сухой Лог», Россия.

верхностей канала (кроме сечения 5–5) выполняется муллитокремнеземистым огнеупором. В сечениях 1–1 и 2–2 толщина слоя равна 65 мм, в сечениях 3–3 и 4–4 130 мм. Свод канала изолируется легковесными изделиями типов L 28, L 26 и L 23 толщиной по 65 мм. На внешнюю поверхность теплоизоляции свода наносится слой алюмосиликатной смеси толщиной 40 мм. Теплоизоляция стен канала выполняется изделиями L 28 (65 мм), L 26 (65 мм) и L 23 (125 мм). При 1500 °С приведенная структура кладки элементов канала характеризуется следующими показателями (для свода и стен соответственно): R 1,02 и 1,23 м²·К/Вт; $t_{нар}$ 116,1 и 115,3 °С; q 1346,2 и 1129,3 Вт/м².

При оценке эффективности структуры кладки выстилки ограничимся величиной теплового потока. Для сечения 3–3 q составляет 1540,3 Вт/м², для сечений 4–4 и 5–5 q 4879,1 и 20168 Вт/м² соответственно. В целом потери теплоты через кладку одного канала равны 57,3 кВт, что свидетельствует о необходимости дальнейшего совершенствования структуры футеровки. При этом представляется целесообразным обратить внимание на правомерность некоторых технических решений в зарубежной футеровке, а также на применение более эффективных теплоизоляционных материалов, и прежде всего волокнистых.

На наш взгляд, применение муллитокремнеземистого огнеупора в холодной футеровке канала представляется нерациональным. Поскольку герметизация огнеупорной кладки цирконо-муллитовым мертелем исключает диффузию печ-

ных газов в теплоизоляцию, в качестве первого слоя холодной футеровки следует использовать муллитокорундовый легковесный огнеупор типа L 30, характеризующийся высокой температурой применения и более низкой теплопроводностью по сравнению с муллитокремнеземистым огнеупором. В разработанной структуре теплоизоляции свода (см. рисунок) наряду с легковесными изделиями L 30, L 26 и L 23 используется рулонный волокнистый материал МКРВ-200, применение которого повышает термическое сопротивление кладки до 1,44 м²·К/Вт. В результате этого тепловой поток в окружающую среду снижается до 974,2 Вт/м², а наружная температура футеровки — до 99,1 °С.

Определенной новизной отличается структура холодной футеровки стен канала (см. рисунок). Сочетание легковесных изделий L 30 и L 26 с жесткими волокнистыми плитами типов Ceraboard 100 и Blok 607-1100, характеризующимися очень низкой теплопроводностью, значительно повышает термическое сопротивление кладки, величина которого достигает 1,77 м²·К/Вт. Как следствие, тепловой поток в окружающую среду и наружная температура футеровки снижаются до 798,6 Вт/м² и 97,5 °С соответственно.

Принципиальное значение имеет энергоэффективность холодной футеровки выстилки канала, поскольку потери теплоты через этот элемент конструкции в значительной степени определяют температуру воздуха в зоне обслуживания топливной системы. При разработке структуры теплоизоляции выстилки особое внимание уделяется газоплотности кладки.

Поэтому герметизирующий слой цирконо-муллитового мертеля наносится на слой набивной цирконовой смеси толщиной 25 мм. Этим обеспечивается гарантированная защита теплоизоляционных материалов от агрессивного воздействия печных газов и создаются условия для формирования холодной футеровки выстилки с высоким термическим сопротивлением.

При разработке теплоизоляции выстилки канала учитываются ее конструктивные особенности. Структура теплоизоляции выстилки в сечении 3–3 (см. рисунок) обусловлена необходимостью создания температурных условий для применения жесткой волокнистой плиты типа PROMASIL®-1000P, характеризующейся низкой теплопроводностью и достаточным пределом прочности при сжатии (2 МПа). В результате повышения термического сопротивления кладки до $1,98 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ тепловой поток в окружающую среду составляет $709,9 \text{ Вт/м}^2$, а наружная температура футеровки не превышает $100 \text{ }^\circ\text{C}$. В сечениях 4–4 и 5–5 (см. рисунок) применение плит PROMASIL®-1000P толщиной 25 мм позволяет снизить тепловые потери до $2226,7$ и $7105,7 \text{ Вт/м}^2$ соответственно. Таким образом, суммарные потери теплоты через кладку одного канала составляют $27,1 \text{ кВт}$, что в 2,1 раза меньше аналогичного показателя для западноевропейской футеровки. С учетом тепловых потерь излучением через поперечное сечение канала ($\sim 76 \text{ кВт}$) теплосодержание дыма на пути от печи до регенератора снижается примерно на 0,5%, что обеспечивает гарантированный подогрев воздуха на горение до $1300\text{--}1350 \text{ }^\circ\text{C}$ [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная энергоэффективная структура футеровки канала горелочного устройства позволяет более чем в 2 раза снизить потери теплоты в окружающую среду. В результате минимизации потерь теплосодержания печных

Библиографический список

1. Дзюзер, В. Я. Электроплавленные AZS огнеупоры для высокопроизводительных стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер // Новые огнеупоры. — 2013. — № 7. — С. 50–52.
2. Дзюзер, В. Я. Разработка теплоизолированного свода высокопроизводительной стекловаренной печи / В. Я. Дзюзер // Новые огнеупоры. — 2014. — № 7. — С. 27–31.
3. Дзюзер, В. Я. Development of a heat insulated roof of a high-capacity glassmaking furnace / V. Ya. Dzyuzer

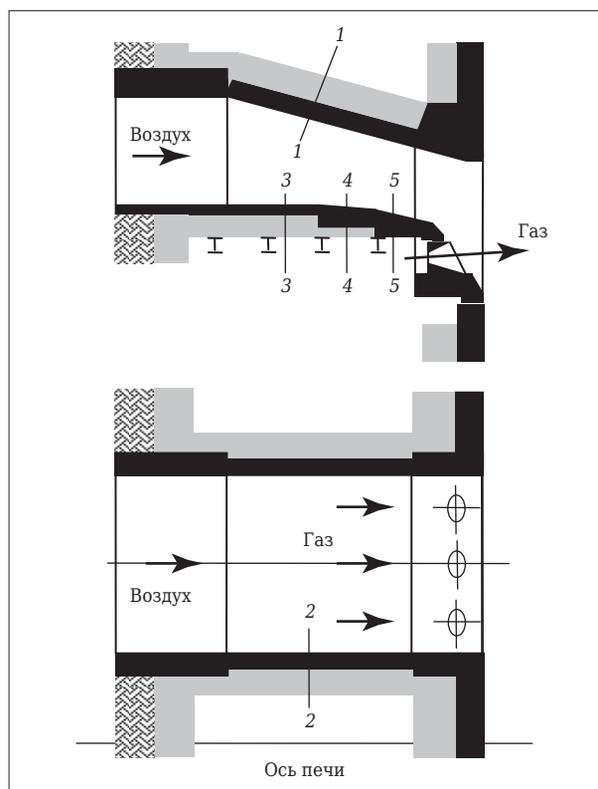


Схема и структура футеровки канала горелочного устройства в сечениях: 1–1 (AZS-36 — 200 мм, мертель — 5 мм, кирпич L 30 — 65 мм, кирпич L 26 — 65 мм, кирпич L 23 — 114 мм, волокно МКРВ-200 — 60 мм); 2–2 (AZS-36 — 200 мм, мертель — 5 мм, кирпич L 30 — 114 мм, кирпич L 26 — 65 мм, плита Geraboard 100 — 50 мм, плита Blok 607-1100 — 100 мм); 3–3 (AZS-36 — 100 мм, мертель — 5 мм, смесь — 25 мм, кирпич L 30 — 65 мм, кирпич L 28 — 65 мм, кирпич L 26 — 65 мм, кирпич L 23 — 65 мм, плита PROMASIL-1000P — 140 мм); 4–4 (AZS-36 — 150 мм, мертель — 5 мм, смесь — 10 мм, кирпич L 30 — 65 мм, кирпич L 26 — 65 мм, плита PROMASIL-1000P — 25 мм); 5–5 (AZS-36 — 150 мм, плита PROMASIL-1000P — 25 мм)

газов на пути до входа в регенератор создают объективные предпосылки для высокотемпературного подогрева воздуха на горение при конструктивно приемлемых размерах насадки в теплообменном устройстве.

// Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 4. — P. 306–310.

3. Дзюзер, В. Я. Особенности расчета двухоборотного регенератора стекловаренной печи / В. Я. Дзюзер // Новые огнеупоры. — 2014. — № 5. — С. 17–21.

Dzyuzer, V. Ya. Features in the design of a double-circulation generator of a glassmaking furnace / V. Ya. Dzyuzer // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 3. — P. 194–198. ■

Получено 18.02.15
© В. Я. Дзюзер, 2015 г.