

УДК 666.762.1.043.1:666.1.031.29

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕПЛОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ БАДДЕЛЕИТОКОРУНДОВОЙ КЛАДКИ В СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧАХ

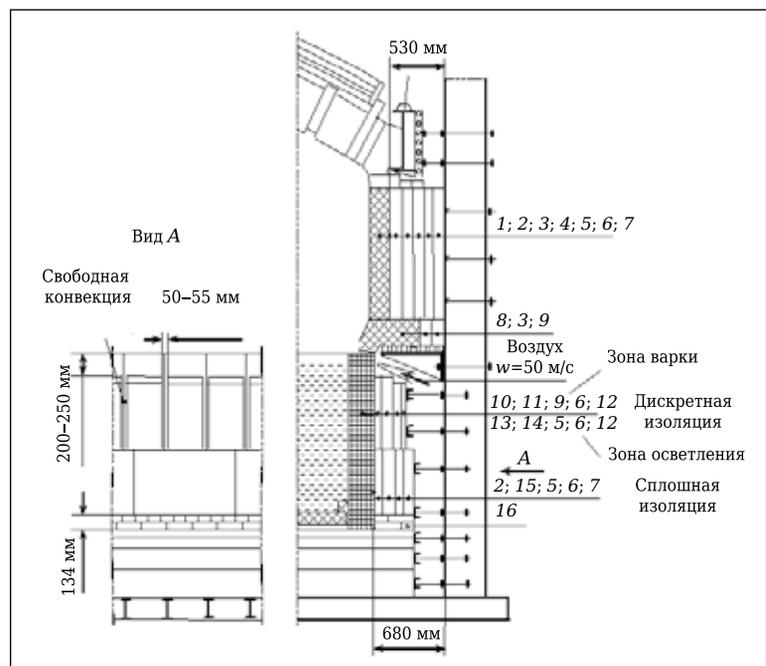
Сформулированы требования к эффективности тепловой изоляции электроплавляемых бадделеитокорундовых огнеупоров. Приведены структуры холодной футеровки боковых стен рабочего пространства и варочного бассейна, обеспечивающие снижение среднего удельного теплового потока в окружающую среду до 583,8 и 612,5–758,8 Вт/м<sup>2</sup> соответственно.

**Ключевые слова:** стекловаренная печь, бадделеитокорундовый огнеупор, тепловая изоляция, тепловой поток, температура, термическое сопротивление.

**В** стекловаренных печах около 70 % огнеупорной футеровки рабочего пространства и варочного бассейна выполняется электроплавляемыми AZS огнеупорами [1]. При температуре внутренней поверхности кладки 1300–1600 °С удельный тепловой поток через неизолированный AZS-брус толщиной 200–250 мм составляет 13,5–22,1 МВт/м<sup>2</sup>. Таким образом, создание эффективной тепловой изоляции бадделеитокорундовой кладки — важнейшее условие разработки современных стекловаренных печей.

Впервые параметры эффективности тепловой изоляции бадделеитокорундовой кладки в стекловаренных печах обозначены одним из основных производителей электроплавляемых AZS-огнеупоров — французской фирмой «Серг». Не раскрывая структуры холодной футеровки, декларируется возможность снижения удельного теплового потока через стены рабочего пространства до 1280 Вт/м<sup>2</sup>. Средний по длине варочного бассейна удельный тепловой поток принимается равным 2370, 1790 и 1270 Вт/м<sup>2</sup> соответственно для верхнего (высокотемпературного) и нижнего участков стен, а также дна ванны (см. рисунок) [2].

Следует отметить, что рекомендации фирмы «Серг» по эффективности тепловой изоляции находят свое отражение в проектах стекловаренных печей зарубежных фирм, реализованных в нашей стране. Результаты



Фрагмент поперечного сечения стекловаренной печи

| Позиция | Огнеупор                   | Толщина | Позиция | Огнеупор           | Толщина |
|---------|----------------------------|---------|---------|--------------------|---------|
| 1       | Брус AZS-33, NC            | 200     | 9       | Изделие MD-1300    | 114     |
| 2       | Цирконо-муллитовый мертель | 5       | 10      | Брус AZS-36, RC    | 250     |
| 3       | Изделие MD-1650            | 114     | 11      | Изделие MD-1450    | 65      |
| 4       | Изделие MD-1550            | 114     | 12      | Плита Blok 607-800 | 50      |
| 5       | Изделие MD-1450            | 114     | 13      | Брус AZS-41, RC    | 250     |
| 6       | Плита Blok 607-1100        | 75      | 14      | Изделие MD-1550    | 65      |
| 7       | Плита Blok 607-800         | 100     | 15      | Плитка BN-40       | 75      |
| 8       | Зуб AZS-36A, NC            | 500/600 | 16      | Изделие ШВ-42      | –       |

расчета лучших по эффективности вариантов холодной футеровки свидетельствуют о том, что для стен рабочего пространства средняя величина тепловых потерь не превышает 1100 Вт/м<sup>2</sup>, а для стен и дна варочного бассейна достигает 1900–2000 и 1280 Вт/м<sup>2</sup> соответственно.

Приведенные данные значительно отличаются от параметров эффективности тепловой изоляции, разработанной и использованной автором настоящей статьи в проектах стекловаренных печей, выполненных для ряда стекольных заводов тарного стекла. В зависимости от структуры холодной футеровки бадделеитокорундовой кладки стен рабочего пространства и варочного бассейна обеспечивается удельный тепловой поток в окружающую среду 700–970 и 810–860 Вт/м<sup>2</sup> соответственно. Наиболее отработанной, на наш взгляд, является конструкция дна ванны, характеризующаяся сравнительно низким уровнем тепловых потерь: 680–915 Вт/м<sup>2</sup> [3–6]. В то же время наличие современных высокотемпературных теплоизоляционных материалов позволяет продолжить совершенствование структуры тепловой изоляции стен стекловаренной печи.

Отличительная особенность стекловаренных печей непрерывного действия — стабильность температурного режима технологического процесса, автоматическое управление которым ведется по температуре внутренней поверхности свода. В этой связи представляется обоснованным при расчете структуры холодной футеровки использовать уравнение стационарной теплопроводности через многослойную стенку при смешанной постановке граничных условий теплообмена [7]:

$$q = \frac{t_{вн} - t_{окр}}{\sum_{i=1}^n R_i + \frac{1}{\alpha_{нар}}},$$

где  $q$  — удельный тепловой поток в окружающую среду, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $t_{вн}$ ,  $t_{окр}$  — температура внутрен-

ней поверхности кладки печи и окружающей среды соответственно, °С, принимаем  $t_{окр} = 40$  °С;  $R_i = S_i/\lambda_i(t)$  — коэффициент термического сопротивления  $i$ -го слоя кладки, м<sup>2</sup>·К/Вт;  $\alpha_{нар}$  — коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности кладки в окружающую среду, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $S_i$  — толщина  $i$ -го слоя кладки, м;  $\lambda_i(t)$  — температурная зависимость теплопроводности  $i$ -го слоя кладки, Вт/(м·К);  $n$  — число слоев в кладке.

Для естественной конвекции коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{нар}$  рассчитывается по выражению

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

где  $k_n$  — коэффициент, учитывающий положение поверхности и направление теплоотдачи в пространстве, для стен, свода печи и дна ванны  $k_n$  равен 2,4, 3,3 и 1,6 соответственно;  $C_0$  — коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $C_0 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $\varepsilon_n$  — степень черноты наружной поверхности стенки, для кирпичных стен  $\varepsilon_n = 0,8$ .

Поля температур на поверхностях огнеупорной футеровки определяются математическим моделированием тепловой работы стекловаренной печи [8]. Геометрические размеры варочного бассейна и методика расчета внутренних температур кладки приведены в работе [9]. При конструировании тепловой изоляции используются как средние температуры футеровки, так и их локальные значения, характеризующие максимальный нагрев кладки. Кроме того, для всех структур тепловой изоляции определяется предельная температура ее эксплуатации.

Остановимся на тепловой изоляции стен рабочего пространства, огнеупорная футеровка которых выполняется бадделеитокорундовыми блоками толщиной 200 мм без применения связующего мертеля. Следует подчеркнуть, что ряд зарубежных фирм используют блоки толщиной 250 мм. Для герметизации стыков изделий в кладке стены

Таблица 1. Характеристика огнеупорных и теплоизоляционных изделий

| Изделие* | Марка изделия              | Содержание, мас. %                                     | Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup> | Температура применения, °С | Теплопроводность, Вт/(м·К)   |
|----------|----------------------------|--|--|----------------------------|--|
| 1        | AZS                        | ZrO <sub>2</sub> 33–41                                 | –                                      | 1700                       | 8,84 – 11,9·10 <sup>-3</sup> t + 7,0·10 <sup>-6</sup> t <sup>2</sup> |
| 2        | BN-40                      | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 43                      | 2,3                                    | 1400                       | 1,02 + 0,62·10 <sup>-3</sup> t – 0,3·10 <sup>-6</sup> t <sup>2</sup> |
| 3        | MD-1650                    | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 73                      | 1,0                                    | 1650                       | 0,384 + 0,07·10 <sup>-3</sup> t                                      |
| 4        | MD-1550                    | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 67                      | 0,9                                    | 1540                       | 0,28 + 0,1·10 <sup>-3</sup> t  |
| 5        | MD-1450                    | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 52                      | 0,8                                    | 1430                       | 0,23 + 0,1·10 <sup>-3</sup> t  |
| 6        | MD-1300                    | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 37                      | 0,6                                    | 1260                       | 0,1 + 0,1·10 <sup>-3</sup> t   |
| 7        | Цирконо-моллитовый мертель | ZrO <sub>2</sub> 31, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 49 | –                                      | 1650                       | 5,0 – 5,1·10 <sup>-3</sup> t + 2,32·10 <sup>-6</sup> t <sup>2</sup>  |
| 8        | Blok 607-1100              | –  | 0,32                                   | 1100                       | 0,11   |
| 9        | Blok 607-800               | –  | 0,32                                   | 800                        | 0,11   |

\* Изделия 2–7 производства Zibo Jiahui Refractory (Китай), изделия 8 и 9 производства ООО «Морган Термал Керамикс Сухой Лог» (Россия).

на ее наружную поверхность наносится тонкий слой (до 6 мм) мелкозернистого (0–0,3 мм) циркономуллитового мертеля (табл. 1). Затворяемый водой и твердеющий при температуре окружающей среды мертель формирует высокотемпературный монолитный слой, исключая воздействие газовой среды рабочего пространства на холодную футеровку. Это позволяет в качестве первого слоя тепловой изоляции вместо муллитокремнеземистого огнеупора (как это принято в зарубежных проектах) использовать высокотемпературный муллитокорундовый теплоизоляционный кирпич (см. рисунок). Последующее конструирование холодной футеровки сводится к созданию условий по температуре применения основного теплоизолирующего материала.

В зарубежных проектах тепловой изоляции таким материалом, как правило, является муллитокремнеземистое теплоизоляционное изделие (250 мм) или волокнистая огнеупорная плита типа «Ceraboard» ( $\lambda = 0,2$  Вт/(м·К)) толщиной до 40 мм. С учетом бадделеитокорундового (200–250 мм) и муллитокремнеземистого (125–114 мм) огнеупоров на тепловую изоляцию остается лишь 50–55 % от общей, конструктивно ограниченной (~ 730 мм) толщины стены. Поэтому в обоих вариантах термическое сопротивление  $R$  кладки стены не превышает  $1,3$  м<sup>2</sup>·К/Вт, а тепловой поток  $q$  характеризуется сравнительно высоким значением (1100 Вт/м<sup>2</sup>).

В проектах автора на тепловую изоляцию приходится 72,6 % толщины стены. Поэтому относительно просто создаются условия для применения теплоизоляционных изделий с низкими значениями температуры применения и теплопроводности. К таким изделиям относятся пенодиатомитовый кирпич плотностью 400 или 500 кг/м<sup>3</sup> и температурой применения до 950 °С [3, 4], а также крупноформатные (1000×600×25 (до 100) мм) плиты типа Blok 607™, изготовленные на основе волокна Superwool 607™ (см. табл. 1).

Данные табл. 2 свидетельствуют о том, что структура тепловой изоляции стен рабочего пространства печи, представленная на рисунке, характеризуется очень высоким коэффициентом термического сопротивления кладки и, как следствие, самой низкой из известных в настоящее время значений величиной тепловых потерь в окружающую среду. При этом эксплуатационная надежность холодной футеровки сохраняется до температуры внутренней поверхности кладки 1640 °С.

В зарубежных проектах на стены варочного бассейна устанавливается дискретная тепловая изоляция, не перекрывающая швы примыкания палисадных брусьев. В этом случае вследствие интенсивной теплоотдачи через неизолированную поверхность огнеупорной футеровки создаются условия для образования гарнисажного слоя, препятствующего протеканию расплава

через вертикальные швы кладки.

В проектах автора на протяжении десятилетия реализуется более эффективная схема тепловой изоляции стен варочного бассейна [10]. Дискретная холодная футеровка устанавливается только на верхней части палисадного бруса. Нижняя часть бруса подвергается сплошной тепловой изоляции (см. рисунок). При этом герметизация швов примыкания в огнеупорной кладке обеспечивается слоем циркономуллитового мертеля толщиной 5 мм. Для страховки за слоем мертеля может устанавливаться шамотная огнеупорная плита с температурой применения, превышающей температуру расплава на этой глубине ванны.

Результаты расчета тепловых потерь через стены варочного бассейна приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 2. Результаты расчета теплопередачи через стену рабочего пространства печи

| Параметры расчета                       | Внутренняя температура огнеупорной футеровки, °С |              |            |
|---|--|--------------|------------|
|   | средняя  | максимальная | предельная |
| $t_{вн}$ , °С                           | 1526,7   | 1594,6       | 1640,0     |
| $t_{1,2}$ *, °С                         | 1509,8   | 1578,4       | 1624,3     |
| $t_{2,3}$ , °С                          | 1508,7   | 1577,3       | 1623,2     |
| $t_{3,4}$ , °С                          | 1371,4   | 1434,2       | 1476,3     |
| $t_{4,5}$ , °С                          | 1208,6   | 1265,5       | 1303,7     |
| $t_{5,6}$ , °С                          | 1013,5   | 1063,5       | 1097,1     |
| $t_{6,7}$ , °С                          | 615,4  | 644,8        | 664,5      |
| $t_{нар}$ , °С                          | 84,7   | 86,5         | 87,8       |
| $\alpha_{нар}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К) | 13,07  | 13,2         | 13,28      |
| $R$ , м <sup>2</sup> ·К/Вт              | 2,47   | 2,45         | 2,44       |
| $q$ , Вт/м <sup>2</sup>                 | 583,8  | 614,1        | 634,4      |

\* Температура между слоями кладки.

Таблица 3. Результаты расчета теплопередачи через стену варочного бассейна печи (участок сплошной изоляции)

| Параметры расчета                       | Внутренняя температура поверхности огнеупорной футеровки, °С |            |            |
|---|--|------------|------------|
|   | средняя в зоне   |            | предельная |
|   | варки  | осветления |            |
| $t_{вн}$ , °С                           | 1316,6   | 1311,9     | 1370,0     |
| $t_{1,2}$ , °С                          | 1287,2   | 1282,5     | 1341,5     |
| $t_{2,3}$ , °С                          | 1285,9   | 1281,1     | 1340,2     |
| $t_{3,4}$ , °С                          | 1262,6   | 1257,9     | 1304,0     |
| $t_{4,5}$ , °С                          | 1060,9   | 1056,8     | 1097,3     |
| $t_{5,6}$ , °С                          | 643,3  | 640,8      | 664,7      |
| $t_{нар}$ , °С                          | 86,4   | 86,3       | 87,8       |
| $\alpha_{нар}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К) | 13,19  | 13,18      | 13,28      |
| $R$ , м <sup>2</sup> ·К/Вт              | 2,01   | 2,01       | 2,02       |
| $q$ , Вт/м <sup>2</sup>                 | 612,5  | 610,3      | 636,6      |

Они свидетельствуют о том, что предложенная структура холодной футеровки обеспечивает весьма низкий уровень тепловых потерь в окружающую среду и высокие значения предельной температуры ее применения.

В заключение отметим, что при конструировании холодной футеровки бадделеитокорундовой кладки стен стекловаренной печи используется ограниченный ассортимент теплоизоляционных изделий. Тем самым создаются условия для унификации структуры тепловой изоляции и технологичности ее исполнения.

#### 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.** Эффективное применение электроплавленных бадделеитокорундовых огнеупоров в высокотемпературных стекловаренных печах / В. Я. Дзюзер // Огнеупоры и техническая керамика. — 2004. — № 7. — С. 36–39.
3. **Дзюзер, В. Я.** Энергоэффективная структура тепловой изоляции стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер, Е. А. Никифоров // Огнеупоры и техническая керамика. — 2012. — № 1/2. — С. 33–36.
4. **Дзюзер, В. Я.** Минимизация тепловых потерь через кладку варочного бассейна стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер, Е. А. Никифоров // Огнеупоры и техническая керамика. — 2012. — № 3. — С. 27–32.
5. **Дзюзер, В. Я.** Конструирование огнеупорной кладки варочного бассейна высокопроизводительных сте-

Таблица 4. Результаты расчета теплопередачи через стену варочного бассейна печи (участок дискретной изоляции)

| Параметры расчета                       | Внутренняя температура поверхности огнеупорной футеровки, °С |            |                   |            |
|---|--|------------|-------------------|------------|
|   | средняя в зоне   |            | предельная в зоне |            |
|   | варки  | осветления | варки             | осветления |
| $t_{вн}$ , °С                           | 1347,5   | 1368,4     | 1410,0            | 1545,0     |
| $t_{1, 2}$ , °С                         | 1317,4   | 1334,2     | 1380,6            | 1513,8     |
| $t_{2, 3}$ , °С                         | 1198,3   | 1213,1     | 1256,6            | 1379,7     |
| $t_{3, 4}$ , °С                         | 829,4  | 957,5      | 875,6             | 1097,4     |
| $t_{4, 5}$ , °С                         | 385,1  | 440,1      | 405,0             | 500,1      |
| $t_{нар}$ , °С                          | 88,8   | 95,2       | 91,2              | 101,9      |
| $\alpha_{нар}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К) | 13,35  | 13,76      | 13,50             | 14,17      |
| $R$ , м <sup>2</sup> ·К/Вт              | 1,93   | 1,68       | 1,90              | 1,64       |
| $q$ , Вт/м <sup>2</sup>                 | 651,7  | 758,8      | 690,3             | 876,1      |

кловаренных печей / В. Я. Дзюзер // Огнеупоры и техническая керамика. — 2007. — № 8. — С. 14–22.

6. **Дзюзер, В. Я.** Энергоэффективные печные ограждения высокопроизводительной стекловаренной печи / В. Я. Дзюзер // Огнеупоры и техническая керамика. — 2009. — № 7/8. — С. 48–54.

7. **Дзюзер, В. Я.** Проектирование энергоэффективных стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий. — М. : Теплотехник, 2009. — 340 с.

8. **Дзюзер, В. Я.** Моделирование тепловой работы высокопроизводительной стекловаренной печи / В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий, Е. Б. Садыков // Стекло и керамика. — 2012. — № 9. — С. 23–27.

9. **Дзюзер, В. Я.** Граничные условия теплопередачи через кладку стекловаренной печи / В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий, Е. Б. Садыков // Стекло и керамика. — 2012. — № 5. — С. 28–33. ■

Получено 04.05.13  
© В. Я. Дзюзер, 2013 г.

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**СЕРИЯ КОНФЕРЕНЦИЙ**  
**“ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ РОССИИ”**



**МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**  
**Противокоррозионная защита - ключ**  
**к энергетической и**  
**экологической безопасности**



**3–5 декабря 2013 г. Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина**

**Темы конференции:**

|  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ингибиторы коррозии</li> <li>- Коррозия и защита в атомной промышленности</li> <li>- Морская и микробиологическая коррозия</li> <li>- Коррозия и защита стали в бетоне</li> <li>- Коррозия и защита в нефтегазодобывающей промышленности</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Покрытия</li> <li>- Коррозия и защита в нефтеперерабатывающей промышленности</li> <li>- Антикоррозионные свойства полимерных и композитных материалов</li> <li>- Коррозионное образование</li> </ul> |
|--|---|

<http://www.oilconference.ru/>