

ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННОГО ПОДА СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ

Сформулированы технологические требования к конструкции пода стекловаренной печи. Определены граничные условия для расчета и конструирования кладки пода варочного бассейна. Разработана энергоэффективная структура теплоизолированного пода, обеспечивающая снижение средних потерь теплоты в окружающую среду до 800 Вт/м².

Ключевые слова: стекловаренная печь, варочный бассейн, под, футеровка, термическое сопротивление, тепловой поток.

Одним из условий повышения производительности стекловаренной печи является обеспечение времени пребывания первичного расплава в ванне, в течение которого может быть завершен весь комплекс реакций стекловарения. Производительность печей непрерывного действия характеризуется удельным съемом стекломассы с 1 м² площади варочного бассейна в сутки. Для высокопроизводительных печей этот параметр превышает 2,7 т/(м²·сут). В свою очередь, время пребывания определяется структурой и кратностью циркуляции конвекционных потоков в ванне, а также соотношением объемов вырабатываемого стекла и варочного бассейна. Как правило, объем ванны, заполненный стекломассой, превышает производительность печи. При этом время пребывания находится в пределах 26–32 ч, что обеспечивает требуемую гомогенизацию сваренной стекломассы.

В общем случае повышение удельного съема предполагает прямо пропорциональное увеличение глубины ванны. Это условие может не выполняться, если одновременно с увеличением толщины слоя стекла предусматривается повышение эффективности теплоизоляции варочного бассейна, и прежде всего его пода. Достижимое при этом повышение средней температуры расплава приводит к интенсификации процессов тепломассопереноса, что в определенной мере компенсирует уменьшение продолжительности протекания реакций стекловарения [1].

Для обеих зон варочного бассейна (рис. 1) принципиальное значение имеет температура

придонного слоя расплава ($t_{\text{вн}}$, °C). Ее значение должно соответствовать вязкости стекла, исключающей образование гарнисажа на поверхности пода. Из опыта принимается $t_{\text{вн}} = 1250 \div 1350$ °C. Меньшие значения температуры задаются для режима естественной конвекции стекломассы (отсутствие выработки стекла), возникновение которой обусловлено неравномерным нагревом поверхности ванны. Высокие температуры достигаются при вынужденной конвекции расплава, интенсивность которой в значительной степени определяется расходом стекла на выработку. Как следствие, расчет и конструирование пода варочного бассейна выполняются в две стадии.



Рис. 1. Фрагмент продольного сечения варочного бассейна



В. Я. Дзюзер

E-mail: vdzuzer@yandex.ru

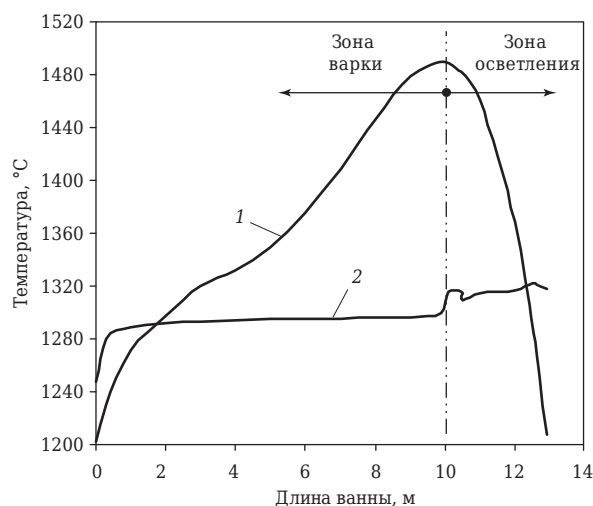


Рис. 2. Изменение средней по ширине печи температуры стекломассы на поверхности (1) и поде ванны (2)

На первой стадии при граничных условиях естественной конвекции, заданных распределением температуры на поверхности ванны, выполняют расчет и конструирование структуры футеровки пода, обеспечивающей заданную температуру придонного слоя расплава. При этом учитывают толщину слоя нагреваемого стекла, химический состав которого характеризуется температурной зависимостью эффективной теплопроводности. Последняя величина равна сумме кондуктивной и радиационной составляющих. Ранее установлено [1], что при граничных условиях естественной конвекции распределение температуры по глубине ванны подчиняется закономерностям стационарной теплопроводности. Это обстоятельство существенным образом упрощает расчет теплопередачи через ванну и ее под [2]. Граничные

условия расчета определяются численным моделированием тепловой работы печи [1].

Изменение средней по ширине печи температуры поверхности расплава t_n по длине ванны (рис. 2, кривая 1) аппроксимируется полиномом (x — продольная координата, м)

$$t_n = 1201,71 + 94,02x - 28,94x^2 + 4,171x^3 - 0,193x^4,$$

из которого находится средняя t_n в зоне варки (до порога) и освещения — 1355,3 и 1378,3 °C соответственно. Эти параметры принимают в качестве граничных условий для расчета теплопередачи через слой стекла и под ванны при естественной конвекции расплава.

На второй стадии при граничных условиях вынужденной конвекции определяют распределение температуры в продольном сечении ванны. При этом учитывают производительность печи, реальную геометрию ванны, а также потерю теплоты через ее кладку. Далее выполняют поверочный расчет футеровки дна при температуре придонного слоя расплава, соответствующей действительным условиям работы печи. Анализ рис. 2 (кривая 2) показывает, что средняя $t_{вн}$ в зонах варки и освещения равна 1294,8 и 1316,2 °C соответственно.

Структура кладки пода разработана для регенеративной стекловаренной печи с подковообразным пламенем производительностью 320 т/сут и удельным съемом стекломассы 2,9 т/(м²·сут). Расход природного газа с низшей рабочей теплотворной способностью 33496 кДж/м³ составляет 1800 м³/ч. Эффективная теплопроводность темно-зеленого стекла определяется выражением $\lambda_{эф} = 1,0908 - 0,5 \cdot 10^{-3}t + 6 \cdot 10^{-6}t^2$, где t — температура стекломассы, °C.

Таблица 1. Характеристика огнеупорных и теплоизоляционных изделий

Изделие, предел прочности при сжатии	Состав, мас. %	Кажущаяся плотность, кг/м ³	Температура применения, °C	Теплопроводность, Вт/(м·K)
AZS, 200 МПа	ZrO ₂ 33	3700	1700	$8,84 - 11,9 \cdot 10^{-3}t + 7,0 \cdot 10^{-6}t^2$
RESIMUR ZM 362*1 (зерно < 0,3 мм)	ZrO ₂ 31, Al ₂ O ₃ 49	2500	1650	—
RESISTIT ZS 748 E*1 (зерно < 3 мм), 100 МПа	ZrO ₂ 63, SiO ₂ 33	3830	1800	$2,0 - 1,8 \cdot 10^{-3}t + 0,8 \cdot 10^{-6}t^2$
Z-64*2, 100 МПа	ZrO ₂ 64	3600	1630	$2,7 - 0,757 \cdot 10^{-3}t + 0,25 \cdot 10^{-6}t^2$
BN-60*2, 55 МПа	Al ₂ O ₃ 61	2400	1550	$1,37 + 0,33 \cdot 10^{-3}t$
BN-40*2, 50 МПа	Al ₂ O ₃ 43	2300	1400	$1,02 + 0,62 \cdot 10^{-3}t - 0,3 \cdot 10^{-6}t^2$
GNG-1,2*2, 10 МПа	Al ₂ O ₃ 35–45	1200	1400	$0,325 + 0,225 \cdot 10^{-3}t$
MD-1450*2, 3,0 МПа	Al ₂ O ₃ 52	800	1430	$0,23 + 0,1 \cdot 10^{-3}t$
MD-1300*2, 1,5 МПа	Al ₂ O ₃ 37	600	1260	$0,1 + 0,1 \cdot 10^{-3}t$
PROMASIL®-1100*3, 1,9 МПа	—	285	1100	$0,04 + 0,16 \cdot 10^{-3}t$

*1 Производство «RHI Glas GmbH», Германия.
 *2 Производство «Zibo Jiahui Refractory», Китай.
 *3 Производство «Promat GmbH», Германия.

Таблица 2. Результаты расчета теплопередачи через ванну печи при граничных условиях естественной конвекции расплава

Параметр расчета	Зона варки		Зона осветления	
	из кирпича GNG-1,2	комбинированная	из кирпича GNG-1,2	комбинированная
h , м	1,2	1,2	2,0	2,0
$t_{\text{п}}$, °C	1355,3	1355,3	1378,3	1378,3
$t_{\text{вн}}$, °C	1205,2	1287,2	1145,6	1269,5
$t_{\text{н}}^*$, °C	134,6	93,8	127,8	92,2
R , м ² · К/Вт	0,96	1,93	1,08	2,16
q , Вт/м ²	1286,8	618,7	1165,2	595,3

* $t_{\text{н}}$ — температура наружной поверхности пода; обозначение других параметров см. в тексте.

Используется конструкция варочного бассейна с переменной глубиной зон варки и осветления, разделенных переливным порогом (см. рис. 1). Применение заглубленной зоны осветления обусловлено двумя обстоятельствами. Во-первых, вместимость ванны увеличивается до 357 т, что обеспечивает время пребывания расплава 26,8 ч. Во-вторых, как установлено численным моделированием [1], наличие приемка обеспечивает значительное возрастание кратности циркуляции стекла в выработочном конвекционном потоке, что способствует повышению его однородности на входе в проток.

Характеристика изделий, использованных в кладке пода печи, приведена в табл. 1. Структура кладки включает горячую (огнеупорную) и холодную (теплоизоляция) футеровку (см. рис. 1). Верхний слой (сверху вниз) футеровки (поз. 1) выполняется электроплавным бадделеитокорундом. Полнотелая (без усадочной раковины) плитка обеспечивает высокую коррозионную стойкость пода к воздействию высокотемпературного агрессивного расплава стекла. Последующие слои огнеупорной кладки (поз. 2–4) предназначены в основном для защиты теплоизоляции от проникновения капель расплавленного металла, присутствие которого в ванне обусловлено загрязнением стекольного боя, являющегося одним из основных компонентов шихты (20–40 %).

Герметичность пода обеспечивается двумя слоями неформованных огнеупоров. Основной слой (поз. 3) выполняют набивной смесью на основе крупнозернистого цирконового концентрата, позволяющего избежать направленной вниз коррозии огнеупоров каплями металла. Перед укладкой бадделеитокорундовой плитки его покрывают тонким слоем мелкозернистого цирконо-муллитового мертеля (поз. 2). В зоне варки неформованным огнеупорам предшествует слой цирконовой плитки (поз. 4). В зоне осветления, защищенной от проникновения расплава металла порогом, герметизирующие

слои неформованных огнеупоров укладывают на высокоглиноземистую плитку (поз. 6). Строительная жесткость конструкции пода в обеих зонах ванны обеспечивается алюмосиликатными крупноформатными блоками (поз. 5).

Несмотря на многослойную структуру горячей футеровки ее термическое сопротивление R незначительно. Для зон варки и осветления R составляет 0,39 и 0,55 м² · К/Вт соответственно. В результате больших потерь теплоты q в окружающую среду (2889,6 и 2179,7 Вт/м²) температура внутренней поверхности пода 945,2 и 817,5 °C не соответствует технологическим условиям работы печи при отсутствии выработки стекломассы. Повышение термического сопротивления кладки пода и придонной температуры расплава может быть обеспечено энергоэффективной теплоизоляцией футеровки, при разработке которой необходимо учитывать прочностные характеристики изделий.

В зарубежной практике теплоизоляция пода стекловаренной печи выполняется формованными легковесными алюмосиликатными изделиями, характеризующимися пределом прочности при сжатии не менее 8 МПа. При этом толщина теплоизоляционного слоя варьируется от 130 до 200 мм. Данные табл. 2 свидетельствуют о том, что даже при толщине кладки 260 мм (см. рис. 1, поз. 7) теплопроводность кирпича GNG-1,2 (и его аналогов) не обеспечивает требуемой температуры нагрева внутренней поверхности пода. Поэтому для восприятия механической нагрузки огнеупорной футеровки изделия GNG-1,2 используются лишь в качестве опорного слоя (шириной 230 мм) под донными блоками. Остальное пространство (770 мм), образованное перекрытыми брусками и опорными изделиями, заполняется легковесными материалами с более низкими теплопроводностью и механической прочностью. Одна из возможных комбинаций таких изделий показана на рис. 1 (поз. 8–10). Увеличение суммарного термического сопро-

Таблица 3. Результаты расчета теплопередачи через теплоизолированный под печи при граничных условиях вынужденной конвекции расплава

Параметры расчета	Зона варки		Зона осветления	
	из кирпича GNG-1,2	комбинированная	из кирпича GNG-1,2	комбинированная
$t_{вн}, ^\circ\text{C}$	1294,8	1294,8	1316,2	1316,2
$t_{1.2}^*, ^\circ\text{C}$	1260,0	1279,6	1282,8	1301,3
$t_{2.3}, ^\circ\text{C}$	1210,6	1257,8	1234,2	1279,5
$t_{3.4}, ^\circ\text{C}$	1168,0	1238,9	1155,4	1244,3
$t_{4.5}, ^\circ\text{C}$	957,7	1145,2	948,0	1150,0
$t_{5.6}, ^\circ\text{C}$	—	1025,4	—	1029,6
$t_{6.7}, ^\circ\text{C}$	—	814,1	—	817,3
$t_n, ^\circ\text{C}$	141,0	94,2	140,1	94,4
$R, \text{м}^2 \cdot \text{К/Вт}$	0,82	1,91	0,84	1,94
$q, \text{Вт/м}^2$	1409,0	624,1	1390,1	628,2
$q_{ср}, \text{Вт/м}^2$	804,6		803,4	
$R_{ср}, \text{м}^2 \cdot \text{К/Вт}$	1,47		1,50	
$t_n, ^\circ\text{C}$	106,1		106,2	

* Здесь и ниже указана температура между слоями кладки.

тивления R кладки пода до 1,93–2,16 $\text{м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ обеспечивает требуемую температуру придонного слоя расплава в обеих зонах варочного бассейна и низкий уровень потерь теплоты в окружающую среду (см. табл. 2).

Интенсификация конвективного теплопереноса, обусловленная отбором стекла на выработку, приводит к повышению температуры внутренней поверхности пода. По сравнению с режимом естественной конвекции расплава она повышается на 7,6 и 46,7 $^\circ\text{C}$. Большее повышение температуры в зоне осветления соответствует более интенсивной циркуляции расплава за порогом. Незначительное изменение температуры в зоне варки подтверждает целесообразность разработки структуры кладки пода при граничных условиях естественной конвекции.

Результаты расчета теплопередачи через кладку пода печи (толщина кладки 260 мм) при температурах придонного слоя стекла, соответствующих реальным условиям работы варочного бассейна, приведены в табл. 3. Они свидетельствуют о целесообразности дифференцированного подхода к формированию холодной футеровки дна ванны. Несмотря на относительно высокий уровень потерь теплоты через участки кладки пода в зонах варки и осветления, теплоизолированные изделиями GNG-1,2, среднее

значение q составляет 804,6 и 803,4 Вт/м^2 . Приведенные параметры потерь теплоты свидетельствуют о высокой энергоэффективности разработанной футеровки пода печи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методология разработки теплоизолированного пода базируется на результатах численного моделирования тепловой работы стекловаренной печи. В результате расчета внешнего теплообмена определяются средние температуры нагрева поверхности ванны в зонах варки и осветления. Для режима естественной конвекции расплава они являются основными исходными данными для конструирования структуры кладки пода. Расчет параметров внутреннего теплопереноса позволяет установить фактические температуры нагрева внутренней поверхности пода, которые используются для поверочного расчета футеровки и определения действительных значений потерь теплоты в окружающую среду. Обоснованное задание граничных условий расчета и применение современных огнеупорных и теплоизоляционных изделий позволяет разработать энергоэффективную безопасную структуру кладки пода, адаптированную к реальным условиям работы высокопроизводительной стекловаренной печи.

Библиографический список

1. Дзюзер, В. Я. Проектирование энергоэффективных стекловаренных печей : монография / В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий. — М. : Теплотехник, 2009. — 340 с.
2. 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. ■

зер, В. С. Швыдкий, Е. Б. Садыков // Стекло и керамика. — 2012. — № 5. — С. 28–33. ■

Получено 18.06.14
© В. Я. Дзюзер, 2014 г.