

Д. т. н. В. Я. Дзюзер (✉)

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

УДК 666.762.1+666.762.3.043.1:666.1.031

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ СТРУКТУРА КЛАДКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РЕГЕНЕРАТОРА СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ

На примере стекловаренной печи с подковообразным пламенем производительностью 280 т/сут рассмотрено влияние конструкции кладки регенератора на объем насадки, обеспечивающий подогрев воздуха до 1300 °С. Разработана структура кладки однооборотного регенератора, характеризующая коэффициентом потерь теплоты в окружающую среду 0,979 и коэффициентом подсоса воздуха 0,1. Энергоэффективность и газоплотность кладки регенератора обеспечиваются многослойностью структуры, в которой используются современные теплоизоляционные материалы. По сравнению с известными техническими решениями разработанная структура кладки обеспечивает двукратное снижение тепловых потерь в окружающую среду. Тепловой поток через свод и боковые стены регенератора 961,9 и 183,1–820,4 кВт/м<sup>2</sup> соответственно.

**Ключевые слова:** стекловаренная печь, регенератор, структура кладки, огнеупоры, тепловая изоляция, температура, тепловой поток.

Энергоэффективность стекловаренных печей с подковообразным пламенем, доля которых в мировой стекольной промышленности превышает 90 %, в значительной степени зависит от температуры подогрева воздуха, предназначенного для сжигания топлива. При 1300 °С доля физической теплоты воздуха в приходной части уравнения теплового баланса печи достигает 35–38 %, коэффициент полезного действия составляет 57–60 % [1].

Особенностью печей с подковообразным пламенем является относительно низкая температура отходящих продуктов сгорания топлива — около 1450 °С. При разности температур дыма и воздуха 150 °С и конструктивно приемлемых размерах насадки возможность высокотемпературного подогрева воздуха будет во многом определяться качеством кладки регенератора — ее структурой и газоплотностью. Эффективность структуры кладки оценивается коэффициентом потерь теплоты  $\eta$  в окружающую среду, газоплотность кладки — коэффициентом подсоса воздуха  $m_b$  в регенеративную камеру. В расчетах регенераторов, как правило, принимается  $\eta = 0,95$  и  $m_b = 0,2$ .

Рассмотрим влияние качества кладки на объем насадки регенератора, обеспечивающий подогрев воздуха до 1300 °С. Принимаем  $\eta$  равным 0,99, 0,97, 0,95 и 0,93,  $m_b$  равным 0,05, 0,1 и 0,2. В качестве исходных данных используем результаты

расчета теплового баланса печи производительностью 280 т/сут.

В общем случае объем насадки регенератора определяется по формуле

$$V_n = \frac{F_n}{f_1} = \frac{1}{f_1} \frac{Q_b}{K_{\Sigma} \Delta t}, \quad (1)$$

где  $V_n$  — объем насадки, м<sup>3</sup>;  $F_n$  — площадь поверхности нагрева насадки, м<sup>2</sup>;  $Q_b$  — количество теплоты, переданной от дыма воздуху за один цикл работы регенератора, кДж;  $f_1$  — удельная поверхность нагрева насадки, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  $K_{\Sigma}$  — средний суммарный коэффициент теплопередачи от дыма к воздуху за один цикл работы регенератора, для всех вариантов расчета принимаем  $K_{\Sigma} = 7,68$  кДж/(м<sup>2</sup>·°С);  $\Delta t$  — среднелогарифмическая разность температур, °С.

В современных стекловаренных печах в качестве насадки регенератора используются изделия горшкового типа (Topfstein), изготовленные из периклаза (97 % MgO) и магнезитоциркона (78,17 % MgO, 12,76 % ZrO<sub>2</sub>). Наибольшее применение находит горшок типа TL-14/17 с размером ячейки 140×140 и высотой 175 мм, для которого  $f_1 = 16,6$  м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>.

В свою очередь,

$$Q_b = V_b(i_b'' - i_b')\tau_b, \quad (2)$$

где  $V_b$  — расход воздуха на горение м<sup>3</sup>/с\*;  $i_b' = c_b' t_b'$ ,  $i_b'' = c_b'' t_b''$  — энтальпия воздуха на входе в насадку и выходе из нее, кДж/м<sup>3</sup>;  $t_b'$ ,  $t_b''$  — температура воздуха на входе в насадку и выходе из нее, °С;  $c_b'$ ,  $c_b''$  — удельная теплоемкость воздуха при  $t_b'$  и  $t_b''$ , кДж/(м<sup>3</sup>·К);  $\tau_b$  — продолжительность воздушного периода работы регенератора, с.

\* Здесь и далее при нормальных условиях.

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

Для исходных данных:  $V_B = 4,328 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $t_B' = 20$  и  $t_B'' = 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau_B = 1200 \text{ с}$  получаем  $Q_B = 9606498,0 \text{ кДж}$ .

Для противоточной схемы теплообмена

$$\overline{\Delta t} = \frac{(t_d' - t_B'') - (t_d'' - t_B')}{\ln \frac{t_d' - t_B''}{t_d'' - t_B'}} \quad (3)$$

Где  $t_d'$ ,  $t_d''$  — температура дыма на входе в насадку и выходе из нее соответственно,  $^\circ\text{C}$ .

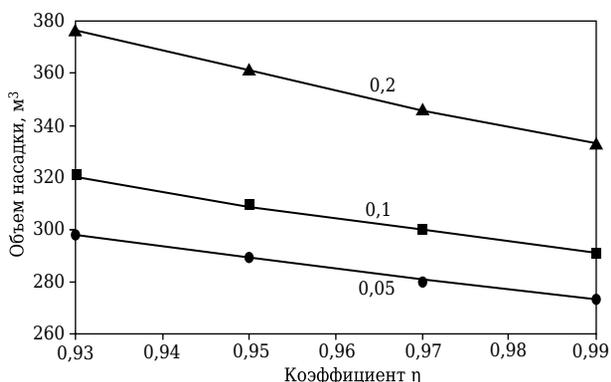
Принимаем  $t_d' = 1450 \text{ }^\circ\text{C}$ . Температура  $t_d''$  определяется по  $it$ -диаграмме по рассчитанному значению энтальпии дыма на выходе из насадки [2]:

$$t_d'' = \frac{V_d [i_d'(1 - 0,5m_B) + m_B i_B'] - \frac{1}{\eta} V_B (i_d'' - i_B'')}{V_d (1 - 0,5m_B)} \quad (4)$$

где  $V_d$  — расход дыма на входе в регенератор, принимаем  $V_d = 5,064 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $i_d' = c_d t_d'$ ,  $i_d'' = c_d t_d''$  — энтальпия дыма на входе в насадку регенератора и выходе из нее,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ ;  $c_d$ ,  $c_B$  — удельная теплоемкость дыма при  $t_d'$  и  $t_d''$ ,  $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$ .

В качественном плане влияние структуры и газоплотности кладки на эффективность регенеративного теплообмена вполне предсказуемо. Из уравнения (4) видно, что чем меньше потери теплоты и подсос воздуха, тем больше остаточное теплосодержание дыма и выше его температура на выходе из насадки. Как следствие — возрастание среднелогарифмической разности температур и уменьшение объема насадки, необходимого для подогрева воздуха до заданной температуры.

Данные рис. 1, полученные обобщением результатов расчета  $V_n$  по уравнениям (1) – (4), позволяют количественно оценить влияние  $\eta$  и  $m_B$  на объем насадки. Например, при  $\eta = 0,95$  и  $m_B = 0,2$  получаем  $V_n = 361,7 \text{ м}^3$ . При средней плотности материала насадки  $3060 \text{ кг}/\text{м}^3$  ее масса в одной камере регенератора равна  $353,6 \text{ т}$ . При «идеальных» условиях ( $\eta = 0,99$ ,  $m_B = 0,05$ ) объем и масса насадки уменьшаются на  $24,5 \%$  ( $273,1 \text{ м}^3$  и  $267,1 \text{ т}$



**Рис. 1.** Влияние коэффициентов потерь теплоты  $\eta$  и подсоса воздуха  $m_B$  (указан на кривых) на объем насадки регенератора

соответственно). Таким образом, разработка энергоэффективной, газоплотной кладки регенератора представляется одним из экономически значимых аспектов проектирования стекловаренных печей.

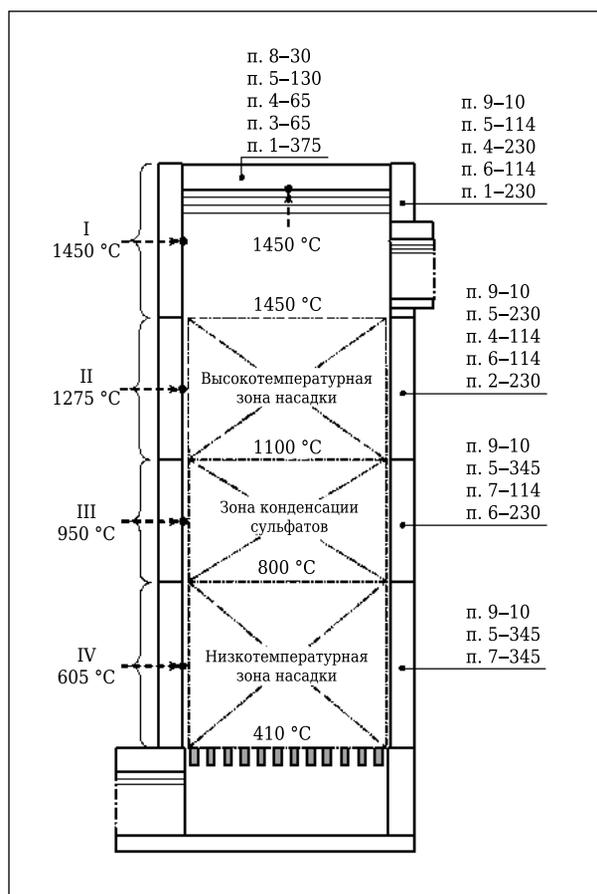
При конструировании кладки регенератора зададимся практически достижимыми, на наш взгляд, значениями  $\eta = 0,97$  и  $m_B = 0,1$ . Этим условиям соответствуют температура дыма на выходе из насадки регенератора  $410 \text{ }^\circ\text{C}$  и объем насадки  $300 \text{ м}^3$  (см. рис. 1).

Насадка высотой  $11,025 \text{ м}$  набрана блоками ТЛ 14/175 (63 ряда). Распределение температуры дыма  $t_d$  по высоте насадки аппроксимируется линейной зависимостью

$$t_d = 410 + 94,331x, \quad (5)$$

где  $x$  — вертикальная координата насадки,  $\text{м}$ .

Расчет теплопередачи через кладку регенератора над насадкой и под насадкой выполняется при  $1450$  и  $410 \text{ }^\circ\text{C}$  соответственно. Внутренняя температура выделенных по высоте насадки участков боковой стены (рис. 2) определяется по



**Рис. 2.** Продольный разрез регенератора стекловаренной печи: характеристика изделий, обозначенных пп. 1–9, приведена в табл. 1; на рисунке показана толщина слоя огнеупора,  $\text{мм}$ ; в обозначении структуры кладки нижняя строчка относится к первому (внутреннему) слою футеровки

Таблица 1. Характеристика огнеупорных и теплоизоляционных изделий\*1

Номер по порядку	Марка изделия	Содержание, мас. %	Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup>	Температура применения, °С	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Кирпич:					
1	Anker DG 10	MgO 97	3,02	>1700	12,8 - 12,2·10 <sup>-3</sup> t + 4,0·10 <sup>-6</sup> t <sup>2</sup>
2	Anker DG 3	MgO 93,7	3,02	>1700	12,8 - 12,2·10 <sup>-3</sup> t + 4,0·10 <sup>-6</sup> t <sup>2</sup>
3	L 28	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 68	0,88	1500	0,28 + 0,1·10 <sup>-3</sup> t
4	L 26	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 58	0,79	1400	0,23 + 0,1·10 <sup>-3</sup> t
5	L 23	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 37	0,48	1250	0,1 + 0,1·10 <sup>-3</sup> t
6	Resistal S 65G	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 64,5	2,55	1650	1,08 + 0,32·10 <sup>-3</sup> t
7	Maxial 300	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 46	2,33	1400	0,7 + 0,64·10 <sup>-3</sup> t
Смесь:					
8	LEGRIT 120-09 (зерно 0–5 мм)*2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 35, SiO <sub>2</sub> 37, CaO 20	1,0	1200	0,2
9	LEGRIT 100-05 (зерно 0–4 мм)*2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 27, SiO <sub>2</sub> 17, CaO 25	0,7	1000	0,2

\*1 Изготовитель – RHI GLASS.

\*2 Жидкость для затворения — H<sub>2</sub>O.

уравнению (5) с использованием координаты их геометрического центра.

При выборе огнеупоров для регенератора учитывается продолжительность кампании печи, равная 8–10 годам. Общее требование к огнеупорам — оксидный состав, что обусловлено окислительной атмосферой (1,66–3,41 % O<sub>2</sub>) в регенераторе. Наличие в печных газах летучих соединений щелочных металлов предопределяет применение основных и нейтральных по химическому составу огнеупоров. Характеристика корродиентов и свойства огнеупоров для насадки регенератора приведены в работе [2].

По конструктивным особенностям кладки в регенераторе выделяются свод и стены. Кладка разделительной стены выполняется только огнеупорными изделиями, идентичными огнеупорам соответствующего (по высоте) участка боковой стены. Наиболее изнашиваемой частью огнеупорной футеровки регенератора являются свод и боковые стены над насадкой (см. рис. 2). Их коррозия главным образом обусловлена воздействием твердых пылевидных компонентов шихты (доломита, известняка, кварцевого песка), содержащихся в турбулентном потоке печных газов (число Рейнольдса Re = 63250). В этой части регенератора огнеупорная кладка выполняется высококачественным периклазовым кирпичом с содержанием MgO до 97 % (см. табл. 1, п. 1).

Для стен регенератора в пределах высоты насадки аэродинамический фактор (Re = 1740), а также коррозионное действие частиц пыли не являются критичными. На участке II (см. рис. 2) износ огнеупора обусловлен в основном воздействи-

ем агрессивной высокотемпературной щелочной газовой среды, в состав которой наряду с продуктами сгорания природного газа и дегазации шихты входят ее летучие компоненты. Для горячей футеровки стен в этой части регенератора используется периклазовый кирпич с содержанием MgO до 95 % (см. табл. 1, п. 2).

На участке III, ограниченном 800–1100 °С, и в меньшей мере на участке IV (см. рис. 2) износ огнеупоров определяется их стойкостью к конденсирующимся сульфатам щелочных металлов, образующимся в результате взаимодействия гидратов этих металлов с серным ангидридом. Огнеупорную футеровку стен в зоне конденсации сульфатов и низкотемпературной зоне насадки выполняют нейтральными огнеупорами. В зоне III используют муллитовый, в зоне IV, а также в поднасадочном пространстве — муллитокремнеземистый кирпич (см. табл. 1, п. 6 и п. 7 соответственно).

Остановимся на особенностях структуры футеровки регенератора (см. рис. 2). Кладку арочного свода (центральный угол 90°) выполняют вперевязку с использованием только клиновых изделий толщиной 375 мм. После первичного разогрева (выводки) печи уплотняют нарушенные кладочные швы и герметизируют внешнюю поверхность свода. Далее на свод устанавливают насухо три слоя высокотемпературной изоляции (см. табл. 1, пп. 3–5). На внешнюю поверхность изоляции наносят слой алюмосиликатной смеси (см. табл. 1, п. 8), которая после испарения влаги затвердевает и имеет вид монолитной и газоплотной футеровки.

Таблица 2. Параметры теплопередачи через кладку регенератора

Конструктивный элемент регенератора	Внутренняя температура кладки, °С	Наружная температура кладки, °С	Удельный тепловой поток, Вт/м <sup>2</sup>	Потери* теплоты (две камеры), кВт
Свод	1450	98,5	961,9	57,6
Участок боковой стены (рис. 2):				
I	1450	98,7	820,4	62,2
II	1275	85,5	597,1	53,2
III	950	68,2	335,3	25,6
IV	605	56,8	183,1	19,4
Поднасадочное пространство	410	50,4–64,7	114,9–403,3	41,0
* Итого 259,0 кВт.				

Несмотря на трудоемкость установки тепловой изоляции свода, необходимость этой процедуры не вызывает сомнений. Она продиктована, во-первых, многократным снижением тепловых потерь в окружающую среду. Для неизолированного свода тепловой поток составляет 13864,3 Вт/м<sup>2</sup>, наружная температура кладки — 397,9 °С. Теплоизолированный свод характеризуется наружной температурой изоляции 98,5 °С и тепловым потоком в окружающую среду 961,9 Вт/м<sup>2</sup> (см. табл. 2). Во-вторых, изменением условий службы огнеупора: средняя температура по толщине неизолированного и изолированного кирпича составляет 924,0 и 1399,4 °С, градиент температуры 2,806 и 0,270 °С/мм соответственно. В результате износа огнеупора (например, на 50 %) градиент температуры по толщине неизолированного кирпича возрастет в 1,79 раза (5,024 °С/мм). Для изолированного кирпича градиент увеличится лишь в 1,06 раза (0,285 °С/мм). Практический опыт свидетельствует о том, что чем меньше и стабильнее градиент температуры по толщине периклазового кирпича, тем выше его коррозионная стойкость.

При разработке конструкции боковых стен регенератора (см. рис. 2) были использованы современные теплоизоляционные изделия, характеризующиеся относительно высокой температурой

применения и низким коэффициентом теплопроводности (см. табл. 1, пп. 4 и 5). Это позволило сформировать четырехслойную структуру кладки с равной (по 345 мм) толщиной огнеупорной и теплоизоляционной составляющих. В результате при заданных граничных условиях расчета (см. табл. 2) тепловой поток через боковые стены по сравнению с известными техническими решениями [3] был уменьшен в среднем в 2 раза. Например [3], в пространстве над насадкой кладка стены состоит из периклазового огнеупора, содержащего 97 % MgO (300 мм), МЛС-62 (230 мм) и ШЛ-1,0 (230 мм). При

этом тепловой поток через стену составил 1968,7 Вт/м<sup>2</sup>. В новой структуре кладки (см. рис. 2, участок I) величина периклазового и муллитового слоев равна 230 и 114 мм соответственно, а двухслойной изоляции — 344 мм. В результате тепловой поток через высокотемпературный участок кладки регенератора составляет всего 820,4 Вт/м<sup>2</sup> (см. табл. 2).

В целом для структуры кладки регенератора, приведенной в работе [3], тепловые потери в окружающую среду равны 521,5 кВт, что составляет 4,35 % ( $\eta = 0,958$ ) от прихода теплоты в регенератор с печными газами (11976,9 кВт). Для новой структуры кладки (см. рис. 2) величина потерь теплоты существенно ниже. Она равна 259,0 кВт, или 2,16 % ( $\eta = 0,979$ ). Для уменьшения подсоса воздуха в регенератор после окончания вывода печи на рабочую температуру на наружную поверхность боковых стен методом торкретирования наносится слой алюмосиликатной смеси (см. табл. 1, п. 9) толщиной до 10 мм.

В заключение отметим, что разработанная структура кладки регенератора позволяет обеспечить высокотемпературный подогрев воздуха при относительно меньшем объеме насадки. Рационализация объема насадки приводит к уменьшению размеров регенеративной камеры и, как следствие, стоимости сооружения регенератора.

## Библиографический список

1. Дзюзер, В. Я. Способы повышения энергоэффективности стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер // Стекло и керамика. — 2012. — № 1. — С. 11–14.
2. Дзюзер, В. Я. Граничные условия для расчета кладки и насадки регенератора стекловаренной печи / В. Я. Дзюзер // Стекло и керамика. — 2013. — № 7. — С. 7–10.

3. Дзюзер, В. Я. Огнеупоры для регенератора стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер // Огнеупоры и техническая керамика. — 2008. — № 6. — С. 22–26. ■

Получено 21.11.13  
© В. Я. Дзюзер, 2014 г.