

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ДВУХОБОРОТНОГО РЕГЕНЕРАТОРА СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ

Предложена оригинальная концепция построения двухоборотной схемы регенерации теплоты дымовых газов в стекловаренных печах. Приведены параметры расчета однооборотного и двухоборотного регенераторов. Показано влияние скорости дыма на эффективность регенеративного теплообмена. Обоснована целесообразность применения двухоборотной схемы регенерации теплоты дыма в стекловаренных печах.

Ключевые слова: стекловаренная печь, регенератор, схема регенерации, энтальпия, огнеупоры, параметры регенератора.

Повышение эффективности регенерации теплоты дымовых газов является одной из важнейших проблем промышленного стекловарения. Комплексный подход к ее решению предусматривает обеспечение высокотемпературного подогрева воздуха (не ниже 1300 °С) и длительную, без замены насадки, эксплуатацию регенеративной системы (8–10 лет). При температуре отходящих продуктов сгорания топлива 1475–1550 °С оба условия могут быть реализованы при конструктивно приемлемой высоте насадки в однооборотном регенераторе. Ограничение высоты насадки обусловлено прежде всего уровнем стекломассы в варочном бассейне печи относительно уровня пола (+ 0,000 или + 6,000), на котором устанавливается стеклоформирующее и иное технологическое оборудование. Кроме того, существенное значение имеет глубина залегания фундаментной плиты под регенератор. При наиболее благоприятном сочетании лимитирующих условий высота насадки может составлять 11–12 м. При температуре дыма ниже 1475 °С, что свойственно современным стекловаренным печам с подковообразным пламенем, расчетная высота насадки, как правило, превышает 12 м, что свидетельствует о необходимости применения двухоборотной конструкции регенератора.

В настоящее время двухоборотная схема регенерации находит ограниченное применение в стекловаренных печах. Во многом это связано с более сложной конструкцией регенератора и большим расходом материалов на его сооруже-

ние. Кроме того, определенную сложность представляет также расчет двухоборотного регенератора. В известных инженерных методиках расчета регенераторов используют допущения и данные, обоснованные практикой работы металлургических печей и/или экспериментом [1, 2]. Понятно, что они не учитывают специфику стекловаренных печей, в том числе особенности физико-химического состава корродиентов и их поведение при охлаждении в насадке регенератора [3]. Последнее представляет особый интерес при разработке двухоборотной схемы регенерации теплоты в стекловаренных печах.

В общем случае расчет регенератора базируется на решении двух уравнений. Из уравнения теплопередачи находится площадь поверхности нагрева насадки, а уравнение теплового баланса предназначено для определения энтальпии и далее температур газовых сред, не заданных условиями расчета:

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

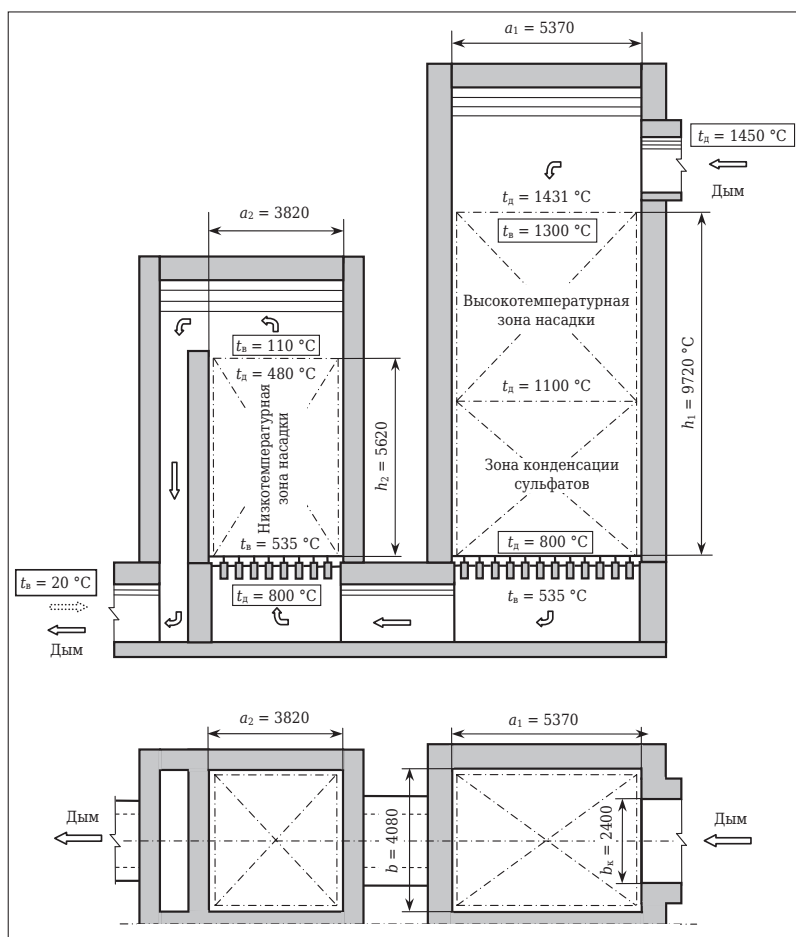
$$\Delta Q_d = \Delta Q_b + \Delta Q_{\text{под}}, \quad (2)$$

где Q_b — количество теплоты, переданной от дыма воздуху за один цикл работы регенератора, кДж; K_{Σ} — суммарный коэффициент теплопередачи от дыма воздуху за один цикл работы регенератора, кДж/(м² · цикл · °С); Δt — среднелогарифмическая разность температур, °С; F_n — площадь поверхности нагрева насадки, м²; ΔQ_d — потери теплоты дымом, кВт; ΔQ_b и $\Delta Q_{\text{под}}$ — затраты теплоты на нагрев воздуха и продуктов подсоса соответственно, кВт.

При равномерном по высоте насадки подсосе атмосферного воздуха уравнение (2) в развернутом виде преобразуется в соотношение

$$V'_d (i'_d - i''_d) = \frac{1}{\eta} V_b (i''_b - i'_b) + m_b V'_d [0,5(i'_d + i''_d) - i_b], \quad (3)$$

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



Геометрические параметры насадки двухоборотного регенератора стекловаренной печи с подковообразным пламенем при скорости дыма на входе в насадку горячей и холодной камер 0,4 и 0,6 м/с соответственно; в рамке указаны заданные значения температуры; t_d и t_b — температура дыма и воздуха

где V'_d — расход дыма на входе в насадку, $\text{м}^3/\text{с}$; i'_d , i'_b и i''_d , i''_b — энтальпия дыма и воздуха на входе в насадку и выходе из нее соответственно, $\text{кДж}/\text{м}^3$; η — коэффициент, учитывающий потери теплоты через кладку; V_b — расход воздуха на горение, $\text{м}^3/\text{с}$; i_b — энтальпия воздуха при температуре окружающей среды, $\text{кДж}/\text{м}^3$; m_b — коэффициент подсоса воздуха в насадку.

Ниже иллюстрируется пример расчета двухоборотного регенератора печи с подковообразным пламенем. Расход дыма на входе в регенератор $5,064 \text{ м}^3/\text{с}$, расход воздуха на горение $4,328 \text{ м}^3/\text{с}$. Поскольку расчет горячей и холодной камер выполняется отдельно, то при обращении к уравнению (3) следует ограничиваться индексацией параметров для входа в насадку (') и выхода из нее (') с указанием соответствующей камеры.

Потери теплоты через кладку регенератора составляют 3 % теплосодержания дыма на выходе из печи i_d [4], в том числе на пути дыма до входа в насадку горячей камеры 1,5 % и че-

рез кладку горячей и холодной камер регенератора 1,0 и 0,5 % соответственно. Общий подсос воздуха составляет 10 % расхода дыма на входе в регенератор ($m_b = 0,1$). При этом 70 % общей величины подсоса воздуха приходится на горячую камеру.

При расчете двухоборотного регенератора (см. рисунок) задаются температура дыма на выходе из печи ($t_d = 1450 \text{ °C}$), температура атмосферного воздуха ($t_b = 20 \text{ °C}$), а также температура воздуха на входе в насадку холодной камеры ($t'_b = 110 \text{ °C}$) и на выходе из насадки горячей камеры ($t'_b = 1300 \text{ °C}$). Температура дыма на входе в насадку горячей камеры ($t'_d = 1431 \text{ °C}$) определяется методом приближения произведения $c'_d t'_d$ к расчетному значению энтальпии ($i'_d = 0,985 i_d = 0,985 \cdot 1,6311 \cdot 1450 = 2329,6 \text{ кДж}/\text{м}^3$). Далее задается температура дыма и воздуха на границе горячей и холодной камер. Для этого необходимо обратиться к структуре насадки в однооборотном регенераторе стекловаренной печи [3].

По условиям службы огнеупоров насадка по высоте камеры (сверху вниз) разбивается на

три зоны: высокотемпературную, конденсации сульфатов и низкотемпературную. Наиболее проблемной является средняя зона насадки. Ее верхняя граница соответствует температуре дыма 1100, а нижняя 800 °C. В интервале 1100–800 °C в дымовых газах конденсируются сульфаты щелочных и щелочноземельных металлов, что приводит к зашлакованности насадки в этой части регенератора. Для удобства термической чистки насадки целесообразно ограничить ее высоту в горячей камере двумя верхними зонами, а низкотемпературную зону перенести в холодную камеру регенератора. В этом случае температура дыма на выходе из насадки горячей камеры задается равной $t'_d = 800 \text{ °C}$. Этому условию соответствует определяемая из уравнения (3) энтальпия воздуха на входе в насадку горячей камеры $i'_d = 722,5 \text{ кДж}/\text{м}^3$, а ей, в свою очередь, температура воздуха $t'_b = 535 \text{ °C}$.

Протяженность дымохода, связывающего насадку горячей и холодной камер, настолько

Таблица 1. Расчетные параметры регенератора стекловаренной печи

Параметр	Двухоборотный регенератор						Однооборотный регенератор	
	горячая камера			холодная камера				
Скорость дыма на входе в насадку, м/с	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,3	0,4
Площадь поверхности нагрева насадки F_n , м ²	4137,5	3533,8	3129,9	1588,8	1455,2	1351,2	6310,2	5457,5
Объем насадки V_n , м ³	249,2	212,9	188,5	95,7	87,7	81,4	380,1	328,8
Площадь поперечного сечения насадки Ω , м ²	29,2	21,9	17,5	18,8	15,6	13,4	29,2	21,9
Длина и ширина насадки a/b , м	6,08 / 4,80	5,37 / 4,08	4,72 / 3,71	3,92 / 4,80	3,82 / 4,08	3,61 / 3,71	6,08 / 4,80	5,37 / 4,08
Высота насадки h , м	8,53	9,72	10,77	5,09	5,62	6,07	13,00	15,00
Средняя скорость дыма в насадке, м/с	1,58	2,10	2,62	1,69	2,02	2,39	1,40	1,87
Среднее число Рейнольдса для дыма	1123,0	1496,8	1939,0	2400,0	2875,6	3351,1	1292,2	1728,2
Средний коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м ² · К):								
для дыма	9,82	11,72	13,80	10,67	11,92	13,10	9,38	11,22
для воздуха	7,44	8,92	10,28	7,58	8,47	9,31	6,26	7,39
Суммарный коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² · К)	7,61	8,91	10,06	6,54	7,14	7,69	6,40	7,40

мала, что потерями теплоты на этом участке дымового тракта можно пренебречь. Тогда температуру дыма на входе в насадку холодной камеры и температуру воздуха на выходе из нее можно принять равными $t'_d = 800$ и $t'_b = 535$ °С соответственно. Энтальпия дыма на выходе из насадки холодной камеры определяется из уравнения (3). Ее величине $i''_d = 719,8$ кДж/м³ соответствует температура дыма на выходе из насадки холодной камеры $t''_d = 480$ °С. Таким образом, задаются и рассчитываются температуры, необходимые для определения Δt в насадке горячей и холодной камер и в целом для выполнения всей процедуры расчета регенератора.

Используемая автором настоящей статьи методика расчета площади поверхности нагрева насадки подробно изложена в публикации [1]. Поэтому далее остановимся лишь на особенностях определения коэффициентов конвективной теплоотдачи α_k для дыма и воздуха, а также и геометрических параметров насадки. Для расчета α_k , Вт/(м² · К), используется критериальное уравнение

$$Nu = 0,196 Re^{0,616}, \quad (4)$$

где Nu — число Нуссельта, $Nu = \alpha_k d_r / \lambda$; Re — число Рейнольдса, $Re = w d_r / \nu$; d_r — гидравлический диаметр насадки, м; λ — коэффициент теплопроводности дыма (воздуха), Вт/(м · К); w — действительная скорость дыма (воздуха)

в насадке, м/с; ν — коэффициент кинематической вязкости дыма (воздуха), м²/с.

Параметры λ и ν , а также теплоемкость дыма и воздуха при постоянном давлении определяются по аддитивным уравнениям. Параметры компонентов газовых сред при средних температурах верха и низа насадки в каждой камере являются справочными данными.

При расчете действительной скорости газовых сред задается скорость дыма на входе в насадку w_{d0} при нормальных условиях. Расчет горячей и холодной камер выполнен при w_{d0} , равной 0,3, 0,4, 0,5, и при w_{d0} , равной 0,5, 0,6, 0,7 м/с, соответственно. Параметры насадочного элемента горшкового типа TL 14/175 (по классификации фирмы «RHI Glass GmbH»): размер ячейки 140 × 140 мм, толщина стенки 40 мм, высота 175 мм; расчетные параметры ν 0,330 м³/м³, f_1 16,6 м²/м³, f_2 0,578 м²/м², d_r 0,146 м. Геометрические параметры и масса насадки рассчитывают по формулам

$$V_n = \frac{F_n}{f_1}, \quad \omega = \frac{V'_d}{w_{d0}}, \quad \Omega = \frac{\omega}{f_2}, \quad h = \frac{V_n}{\Omega}, \quad M = \rho V_n,$$

где V_n — объем насадки, м³; f_1 — удельная поверхность нагрева насадки, м²/м³; ω — площадь живого сечения насадки, м²; Ω — площадь поперечного сечения насадки, м²; f_2 — удельная площадь живого сечения насадки, м²/м²; h — высота насадки, м; ν — удельный объем насадки, м³/м³; M — масса насадки, кг; ρ — плотность материала насадки, кг/м³.

Таблица 2. Расход огнеупоров на насадку регенератора (2 камеры), т

Огнеупор	Двухоборотный регенератор						Однооборотный регенератор	
	горячая камера			холодная камера				
	при скорости дыма на входе в насадку при н. у., м/с							
	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,3	0,4
QMZR-12	21,44	16,09	12,86	—	—	—	21,44	16,09
QMZ-97	239,59	202,15	181,88	—	—	—	229,60	203,22
QMZR-12B	245,12	215,81	186,14	—	—	—	532,87	452,18
DN-a	—	—	—	148,43	136,02	126,25	—	—
Итого	506,15	434,05	380,88	148,43	136,02	126,25	783,91	671,49

Таблица 3. Характеристика огнеупорных изделий

Показатели	QMZR-12	QMZ-97	QMZR-12B	DN-a
Массовая доля, %:				
MgO	78,38	96,60	78,17	—
SiO ₂	6,85	0,90	7,00	—
CaO	—	1,30	—	—
Fe ₂ O ₃	—	—	—	1,20
Al ₂ O ₃	—	—	—	45,0
ZrO ₂	12,38	—	12,76	—
Кажущаяся плотность, г/см ³	3,18	2,96	3,16	2,35
Пористость, %	13,1	15,2	13,6	13,0
Температура деформации под нагрузкой, °C	1680	1700	1650	1470
Предел прочности при сжатии, МПа	75	88	70	75

Результаты расчета двухоборотного регенератора приведены в табл. 1; здесь же указаны параметры однооборотного регенератора, при расчете которого использованы примерно такие же исходные данные, как в двухоборотном. Анализ табл. 1 позволяет существенно расширить сложившиеся представления о разработке регенераторов стекловаренных печей. Прежде всего, следует отметить, что при компоновке двухоборотной схемы регенерации целесообразно сочетание геометрических размеров насадки в горячей и холодной камерах, рассчитанных при $w_{до}$ 0,3 и 0,5, 0,4 и 0,6, 0,5 и 0,7 м/с соответственно. В этом случае обеспечивается приближенное соответствие средней действительной скорости дыма в обеих камерах регенератора. Из табл. 1 видно, что при сопоставимых условиях двухоборотная схема обеспечивает более высокую эффективность регенеративного теплообмена. Это обусловлено в основном интенсификацией конвективного теплообмена как в дымовой, так и в воздушный период работы регенератора. В результате этого для нагрева воздуха до 1300 °C требуется меньший в среднем на 9 % объем насадки. Более того, локализация низкотемпературной зоны насадки в пределах холодной камеры позволяет существенно рационализировать структуру используемых ог-

неупорных изделий и снизить их потребление (табл. 2).

В однооборотном регенераторе [3] верхние два ряда высокотемпературной зоны насадки выполняют магнетитоциркониевыми огнеупорами, например QMZR-12 (табл. 3), у которых периклазовые зерна защищены слоем из форстерита и диоксида циркония. В остальных рядах используют периклазовые изделия с высоким содержанием MgO, например QMZ-97 (см. табл. 3). В зоне конденсации сульфатов применяют магнетитоциркониевый огнеупор типа QMZR-12B (см. табл. 3). Кристаллы периклаза в этих огнеупорах также защищены слоем форстерита и диоксида циркония. Нижние ряды высокотемпературной зоны интенсивно зашлакованы продуктами конденсации. При термической очистке удаление расплавленных стекловидных шлаков в поднасадочное пространство регенератора происходит через низкотемпературную зону насадки. Как следствие, в этой зоне насадки также используют изделия QMZR-12B. В двухоборотном регенераторе структура насадки в горячей камере примерно такая же, как в однооборотном, в то время как в холодной камере регенератора насадка может выполняться алюмосиликатными или муллитокремнеземистыми огнеупорами (см. табл. 3). Как следствие, расход дорогостоящих изде-

лий типа QMZR-12B уменьшается более чем в 2 раза, а в целом расход огнеупора — в среднем на 15,8 % (см. табл. 2).

В свою очередь, эффективность регенеративного теплообмена значительно зависит от скорости дыма на входе в насадку. В горячей камере двухоборотного регенератора (см. табл. 1) увеличение $w_{до}$ от 0,3 до 0,5 м/с уменьшает площадь поверхности нагрева насадки F_n , необходимой для нагрева воздуха до 1300 °С, на 24,4 %. В холодной камере изменение $w_{до}$ от 0,5 до 0,7 м/с приводит к уменьшению F_n на 15,0 %. Кроме того, скорость дыма на входе в насадку определяет ее геометрические размеры. При прочих равных условиях площадь поперечного сечения Ω и высота насадки h связаны однозначными ранее приведенными зависимостями с $w_{до}$. Существующее представление о возможности манипуляции параметрами Ω и h при заданной величине V_n является ошибочным. Площадь поперечного сечения насадки задается скоростью дыма и не может быть изменена без изменения $w_{до}$. Таким образом, обоснованное задание скорости дыма на входе в насадку является одним из важнейших условий разработки рациональной конструкции регенератора.

В отличие от горячей камеры скорость дыма в насадке холодной камеры не является критичным параметром для стойкости насадки. Для горячей камеры возможность повышения скорости дыма на входе в насадку лимитируется двумя обстоятельствами. Во-первых, требованиями к гидродинамическому режиму течения газа в насадке. Для обеспечения высокой стойкости последней к воздействию коррозийных агентов необходимо обеспечить ламинарный режим течения дыма в насадке. В этом плане скорость дыма 0,3–0,5 м/с не является критичной. Во-вторых, скорость дыма лимитируется требованиями к геометрическим размерам поперечного сечения насадки. Поскольку $\Omega =$

$= ab$, то предметом конструкторских изысканий является выбор соотношения длины a и ширины b поперечного сечения насадки. На наш взгляд, приближенное соотношение этих параметров при условии $a > b$ следует выбирать, руководствуясь вторым золотым сечением $a : b = 56 : 44$, с учетом которого $a = \sqrt{56\Omega/44}$ или $b = \sqrt{44\Omega/56}$. При этом ширина насадки должна удовлетворять опытному соотношению $b = (1,7 - 1,8)b_k$,

где b_k — ширина дымового (воздушного) огнеупорного канала, связывающего рабочее пространство печи с регенератором, м.

Выполнение последнего соотношения гарантирует коррозионную стойкость продольных стен регенератора в пространстве над насадкой, подвергаемых воздействию твердых пылевидных компонентов шихты, содержащихся в турбулентном потоке печных газов на выходе из дымового канала. При заданных исходных данных, руководствуясь последним соотношением, скорость дыма на входе в насадку горячей камеры или насадку однооборотного регенератора следует ограничить величиной 0,4 м/с (см. табл. 1); при большей скорости дыма $b < (1,7 - 1,8)b_k$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная концепция построения двухоборотной схемы регенерации теплоты дымовых газов позволяет существенно повысить эффективность регенеративного теплообмена в условиях стекловаренных печей. Двухоборотную конструкцию регенератора можно рассматривать не только как полноценную альтернативу однооборотному регенератору, но и как более экономичную и технологически приспособленную к обслуживанию и длительной эксплуатации.

Библиографический список

1. Лисиенко, В. Г. Теплотехника. Теплообменные аппараты металлургических печей : учебное пособие / В. Г. Лисиенко, В. Б. Кутыин. — Свердловск : УПИ, 1982. — 76 с.
2. Гордон, Я. М. Теплотехнические расчеты металлургических печей : учебник для вузов ; 3-е изд. / Я. М. Гордон, Б. Ф. Зобнин, М. Д. Казяев [и др.]. — М. : Металлургия, 1993. — 368 с.
3. Дзюзер, В. Я. Граничные условия для расчета кладки и насадки регенератора стекловаренной

печи / В. Я. Дзюзер // Стекло и керамика. — 2013. — № 7. — С. 7–10.

4. Дзюзер, В. Я. Энергоэффективная структура кладки высокотемпературного регенератора стекловаренной печи / В. Я. Дзюзер // Новые огнеупоры. — 2014. — № 2. — С. 3–6. ■

Получено 03.02.14

© В. Я. Дзюзер,
2014 г.