Д. т. н. **В. Я. Дзюзер** (✉)

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

УДК 666.1.031

ОБОБЩЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Предложен новый подход к анализу тепловой работы стекловаренных печей. Получено обобщенное уравнение теплового баланса печи в границах дымовая труба – каналы стекломассы. Сформулированы граничные условия по температуре для сред, теплосодержание которых определяет затратные статьи теплового баланса. Показано влияние удельного расхода теплоты на варку 1 кг стекла на процентное содержание расходных статей обобщенного теплового баланса. Выполнен расчет теплового баланса варочной части печи тарного стекла производительностью 320 т/сут при удельном расходе теплоты 1000 ккал/кг.

Ключевые слова: *стекловаренная печь, тепловой баланс, энергоэффективность, температура, футеровка.*

В техническом задании на проектирование стекловаренной печи задаются ее производительность и удельный расход теплоты на варку 1 кг стекла. Эти параметры определяют тепловую нагрузку печи. В свою очередь, распределение генерируемой энергии между составными частями печи (рабочее пространство, варочный бассейн, регенератор, каналы для дыма и стекломассы) определяется с использованием балансового метода анализа тепловой работы печей.

В общем случае энергоэффективность печи определяется соотношением полезных и непроизводительных затрат теплоты. Для регенеративной печи тарного стекла теоретически обусловленные затраты теплоты на стекловарение составляют 2,3–2,5 МДж/кг. Они включают расход энергии на стеклообразование (0,90–1,0 МДж/кг) и теплосодержание расплава на выходе из варочного бассейна (1,4–1,5 МДж/кг) [1]. Общие затраты энергии на варку стекла в значительной степени зависят от эффективности регенерации теплоты продуктов сгорания топлива (дыма) и потерь теплоты в окружающую среду. Последние слагаются из теплосодержания дыма перед трубой и тепловых потерь через футеровку варочной части печи, регенератора, а также каналов для дыма и стекломассы.

Таким образом, полный анализ тепловой работы печи не может быть выполнен в рамках традиционного теплового баланса, составляемого в границах рабочего пространства и варочного бассейна (варочной части) [2, 3] или в границах регенератор – варочная часть печи [4]. На наш взгляд, стекловаренную печь следует рассматривать как систему, состоящую из трех частей (рис. 1), энергетически взаимосвязанных единым источником тепловой энергии — теплотой, выделяемой при сжигании топлива.

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

В варочной части печи (см. рис. 1, контур *I*) протекают процессы теплогенерации и стекловарения. Одним из результатов этих процессов является сток теплоты в регенератор и выработочный канал стекломассы. Энергоэффективность процесса регенерации теплоты дыма задается температурой подогрева воздуха на горение. Величина последней зависит как от теплосодержания дыма на выходе из рабочего пространства и перед трубой, так и от потерь теплоты через футеровку регенератора и дымовых каналов. Расширение границ контура *II* (см. рис. 1) до дымовой трубы позволяет более обоснованно задать итоговые потери теплоты с дымом в окружающую среду. Эти потери определяются минимальной температурой дыма перед трубой, например 300 °С. При соответствующем остаточном теплосодержании дыма не предусматривается использование второй ступени теплоутилизации. В то же время оно достаточно для дымоудаления без применения дутьевых устройств. Контур *III* (см.

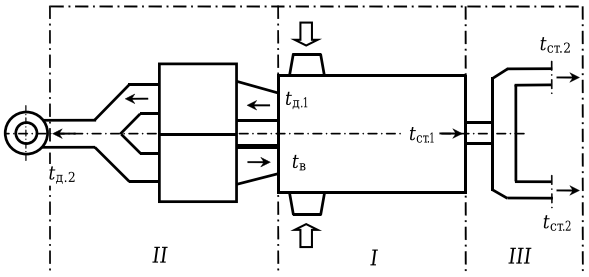

Рис. 1. Схема к расчету теплового баланса стекловаренной печи с подковообразным пламенем: *I* — варочная часть печи (рабочее пространство и варочный бассейн); *II* — регенератор и дымовые каналы; *III* — выработочный канал и каналы питателей стекломассы; температура: $t_в$ — воздуха; $t_{д.1}$, $t_{д.2}$ — дыма на выходе из печи и перед трубой соответственно; $t_{ст.1}$, $t_{ст.2}$ — на выходе из печи и из канала питателя соответственно

рис. 1) объединяет выработочный канал и каналы питателей стеклоформующих машин. При этом потери теплоты с расплавом на выработке задаются технологически обусловленной температурой, определяемой химическим составом стекла. Для тарного стекла — это температура капли, соответствующая вязкости расплава 10^2 Па·с [2].

Таким образом, обобщенный анализ тепловой работы печи должен выполняться в пределах контуров *I – III* (см. рис. 1). В этом случае обеспечивается объективное задание граничных условий, определяющих две важнейшие расходные статьи теплового баланса. Кроме того, анализ тепловых процессов в пределах контура *II* (см. рис. 1) позволяет рассчитать температуру подогрева воздуха. Тем самым исключить ошибку, свойственную тепловому балансу варочной части печи, в котором температура подогрева воздуха задается условиями расчета [2, 4].

При составлении уравнения теплового баланса варочной части печи (см. рис. 1, контур *I*), ввиду относительной малости величин исключается из рассмотрения физическая теплота газа, шихты и стеклобоя:

$$Q_{т.н} + Q_в = Q_{теор} + Q_{д.1} + Q_{ст.1} + Q_{х.н} + Q_{ф.п}, \quad (1)$$

где $Q_{т.н}$ — тепловая нагрузка печи, кВт, $Q_{т.н} = BQ_н^р$; $Q_в$ — теплосодержание подогретого воздуха, кВт, $Q_в = BL_\alpha c_в t_в$; $Q_{теор}$ — теоретические затраты теплоты на стекловарение, кВт, $Q_{теор} = q_{ст}P_п$; $Q_{д.1}$ — теплосодержание дыма на выходе из рабочего пространства, кВт, $Q_{д.1} = BV_\alpha c_{д.1} t_{д.1}$; $Q_{ст.1}$ — теплосодержание стекломассы на выходе из варочного бассейна, кВт, $Q_{ст.1} = P_п c_{ст.1} t_{ст.1}$; $Q_{х.н}$ — химический недожог газа, кВт, $Q_{х.н} = 0{,}02Q_{т.н}$; $Q_{ф.п}$ — потери теплоты через футеровку варочной части печи, кВт; B — расход газа, м³/с; $Q_н^р$ — низшая рабочая теплотворная способность газа, кДж/м³; $q_{ст}$ — теоретические затраты теплоты на варку 1 кг стекла, кДж/кг; $P_п$ — производительность печи, кг/с; L_α, V_α — расход воздуха и дыма на 1 м³ газа при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1{,}1$ соответственно, м³/м³; $c_в$, $t_в$ — средняя теплоемкость и температура воздуха соответственно, кДж/(м³·К) и °С; $c_{д.1}$, $c_{ст.1}$ — средняя теплоемкость дыма и стекломассы на выходе из печи соответственно, кДж/(м³·К) и кДж/(кг·К); $t_{д.1}$, $t_{ст.1}$ — температура дыма и стекломассы на выходе из печи соответственно, °С.

Тепловой баланс регенератора и дымовых каналов (см. рис. 1, контур II) формализуется уравнением

$$Q_{д.1} = Q_в + Q_{д.2} + Q_{ф.р}, \quad (2)$$

где $Q_{д.2}$ — теплосодержание дыма на входе в трубу, кВт, $Q_{д.2} = (1 + m_в)BV_\alpha c_{д.2} t_{д.2}$; $Q_{ф.р}$ — потери теплоты через футеровку регенератора и дымовых каналов, кВт; $m_в$ — коэффициент подсоса воздуха через футеровку регенератора и дымовых каналов; $c_{д.2}$, $t_{д.2}$ — средняя теплоемкость и температура дыма перед трубой соответственно, кДж/(м³·К) и °С.

Для $Q_{ф.р}$ можно записать

$$Q_{ф.р} = (1 - \eta)Q_{д.1}, \quad (3)$$

где η — коэффициент, учитывающий потери теплоты через футеровку регенератора и дымовых каналов. Для современной структуры футеровки регенератора $\eta = 0{,}97$ и $m_в = 0{,}1$ [5]. С учетом потерь теплоты через футеровку дымовых каналов и подсоса воздуха через шиберные устройства принимаем $\eta = 0{,}96$ и $m_в = 0{,}15$.

Подставив соотношение (3) в уравнение (2), получаем выражение

$$Q_{д.1} = (Q_в + Q_{д.2})/\eta, \quad (4)$$

из которого находим затраты теплоты на нагрев воздуха

$$Q_в = \eta Q_{д.1} - Q_{д.2}. \quad (5)$$

Для каналов стекломассы (см. рис. 1, контур *III*) уравнение теплового баланса имеет вид

$$Q_{ст.1} = Q_{ст.2} + Q_{ф.к}, \quad (6)$$

где $Q_{ст.2}$ — теплосодержание стекломассы на выходе из каналов питателя, кВт, $Q_{ст.2} = P_п c_{ст.2} t_{ст.2}$; $Q_{ф.к}$ — потери теплоты через футеровку каналов стекломассы, кВт; $c_{ст.2}$, $t_{ст.2}$ — средняя теплоемкость и температура стекломассы на выходе из канала питателя соответственно, кДж/(кг·К) и °С.

Известно, что каналы для стекломассы имеют автономные системы отопления. Поскольку дополнительные источники теплоты предназначены для термической гомогенизации расплава, они не учитываются при анализе использования тепловой энергии, генерируемой в рабочем пространстве печи. При этом теплота, генерируемая в каналах, входит в структуру потерь через их футеровку.

Подставим соотношения (5) и (6) в уравнение (1). После преобразований получим общее уравнение теплового баланса печи в пределах контуров *I – III* (см. рис. 1):

$$Q_{т.н} = Q_{теор} + Q_{д.2} + Q_{ст.2} + Q_{х.н} + Q_{ф.\Sigma}, \quad (7)$$

где $Q_{ф.\Sigma}$ — суммарные потери теплоты через футеровку печи, кВт, $Q_{ф.\Sigma} = Q_{ф.п} + Q_{ф.р} + Q_{ф.к}$.

В уравнении (7) сумма $(Q_{теор} + Q_{ст.2})$ — технологически обусловленные затраты теплоты на стекловарение, сумма $(Q_{д.2} + Q_{х.н} + Q_{ф.\Sigma})$ — непроизводительные потери теплоты.

Уравнение (7) может быть использовано как по прямому назначению — определению тепловой нагрузки печи, так и для расчета расходных статей теплового баланса при заданном проектом печи удельном расходе теплоты на варку 1 кг стекла:

$$q_{уд} = BQ_н^р/P_п, \quad (8)$$

где $q_{уд}$ — удельный расход теплоты на стекловарение, кДж/кг.

Использование уравнений (7) и (8) позволяет выполнить комплексный анализ тепловой рабо-

ты стекловаренной печи. В прикладном плане наибольший интерес представляют:

– расчет тепловыделений от печи, поскольку параметр $Q_{ф.\Sigma}$ является важнейшим при проектировании системы общеобменной вентиляции производственного корпуса;

– оценка влияния параметра $q_{уд}$ на соотношение полезных и непроизводительных затрат теплоты, а также потери тепла с дымом.

Выполним анализ тепловой работы стекловаренной печи с подковообразным пламенем производительностью $P_п$ = 320 т/сут (3,7 кг/с) и с удельным съемом стекла $P_{уд}$ = 3 т/(м²·сут). Тепловая экономичность печи задана $q_{уд}$ = 4,187÷6,280 МДж/кг (1000–1500 ккал/кг). Меньшее значение $q_{уд}$ соответствует мировому уровню энергоэффективности в производстве тарного стекла, большее значение — средней тепловой эффективности отечественных стекловаренных печей. Из формулы (8) определяется расход газа B = 0,459÷0,688 м³/с. Для химического состава стекла, сырьевых материалов и рецепта шихты на 100 кг стекла, приведенных в работе [1], $q_{ст}$ = 928,6 кДж/кг и $t_{ст.2}$ = 1204 °С. Природный газ характеризуется параметрами: $Q^р_н$ = 33778,0 кДж/м³, L_α = 10,66 м³/м³ и V_α = 11,59 м³/м³. Состав дыма на выходе из печи, об. %: CO_2 8,87, H_2O 17,31, N_2 72,08, O_2 1,74. С учетом разбавления воздухом на пути движения дыма от печи до трубы его состав преобразуется к виду, об. %: CO_2 7,71, H_2O 15,05, N_2 72,98, O_2 4,26. Этому составу дыма при $t_{д.2}$ = 300 °С соответствует средняя теплоемкость $c_{д.2}$ = 1,3902 кДж/(м³·К).

Результаты расчета расходных статей обобщенного теплового баланса печи по уравнению (7) приведены в табл. 1. В энергоэффективной стекловаренной печи ($q_{уд}$ = 1000 ккал/кг) 56,49 % тепловой нагрузки приходится на технологически обусловленные затраты теплоты. В то же время 43,51 % тепловой энергии, генерируемой в рабочем пространстве печи, расходуется на непроизводительные цели. При этом 25,05 % тепловой нагрузки печи затрачивается на компенсацию потерь теплоты через футеровку. Поскольку отношение $(Q_{теор} + Q_{ст.2})/Q_{т.н}$ является термическим коэффициентом полезного действия печи $\eta_{КПД}$, то заданной величине $q_{уд}$ соответствует $\eta_{КПД}$, = 56,49 %.

Для среднего уровня энергоэффективности печей ($q_{уд}$ = 1500 ккал/кг) в структуре затрат теплоты доминируют непроизводительные статьи расхода, доля которых составляет 62,31 %. Как следствие, коэффициент полезного действия печи уменьшается до 37,69 %, а суммарные потери тепла через футеровку возрастают до 43,85 %.

Анализ данных рис. 2 показывает, что максимальная величина удельных затрат теплоты на стекловарение не должна превышать 1130,6 ккал/кг. В этом случае наблюдается равенство суммы полезных и непроизводительных статей теплового баланса и $\eta_{КПД}$ = 50,0 %. При этом суммарные потери тепла через футеровку составляют 31,53 % (5523,1 кВт).

Таблица 1. **Структура расходных статей обобщенного теплового баланса стекловаренной печи производительностью 320 т/сут**

Статьи расхода теплоты	кВт	%	кВт	%
	$q_{уд}$ = 4,187 МДж/кг (1000 ккал/кг)		$q_{уд}$ = 6,280 МДж/кг (1500 ккал/кг)	
$Q_{теор}$	3435,8	22,16	3435,8	14,78
$Q_{ст.2}$	5323,5	34,33	5323,5	22,91
$Q_{д.2}$	2551,5	16,46	3824,4	16,46
$Q_{ф.\Sigma}$	3883,2	25,05	10190,8	43,85
$Q_{х.н}$	310,1	2,00	464,8	2,00
Итого	15504,1	100	23239,3	100

Составим тепловой баланс варочной части печи при $q_{уд}$ = 4,187 МДж/кг. По результатам математического моделирования принимаем $t_{д.1}$ = 1450 °С и $t_{ст.1}$ = 1320 °С [6]. Заданной температуре и составу дыма на выходе из рабочего пространства печи соответствует средняя теплоемкость $c_{д.1}$ = 1,5908 кДж/(м³·К) и $Q_{д.1}$ = 12271,0 кВт. По формуле (3) находим потери теплоты через футеровку регенератора и дымовых каналов $Q_{д.р}$ = 490,8 кВт, что составляет 12,64 % от общих потерь теплоты через футеровку печи $Q_{ф.\Sigma}$. По формуле (5) рассчитываем $Q_в$ = 9228,7 кВт. Данное количество теплоты обеспечивает подогрев воздуха до 1307 °С.

Заданной температуре и химическому составу стекла соответствует средняя теплоемкость и теплосодержание расплава на выходе из варочного бассейна $c_{ст.1}$ = 1,2103 кДж/(кг·К) и $Q_{ст.1}$ = 5911,1 кВт соответственно. Из формулы (6) определяем потери теплоты через футеровку каналов стекломассы $Q_{ф.к}$ = 587,6 кВт (15,13 % от $Q_{ф.\Sigma}$). Из соотношения для $Q_{ф.\Sigma}$ находим $Q_{ф.п}$ = 2804,8 кВт, что составляет 72,23 % от $Q_{ф.\Sigma}$.

Результаты расчета теплового баланса варочной части печи (табл. 2) свидетельствуют о том, что приходная часть баланса на 37,31 % формируется за счет регенерации теплоты дыма, доля которой в расходной части составляет 49,61 %. Полезные затраты теплоты равны сумме $Q_{теор}$ + + $Q_{ст.1}$. Отношение $(Q_{теор} + Q_{ст.1})/(Q_{т.н} + Q_в)$ = 37,79 %. Одним из отличительных признаков энергоэффективной стекловаренной печи является относительно низкий уровень потерь теплоты через футеровку рабочего пространства и варочного

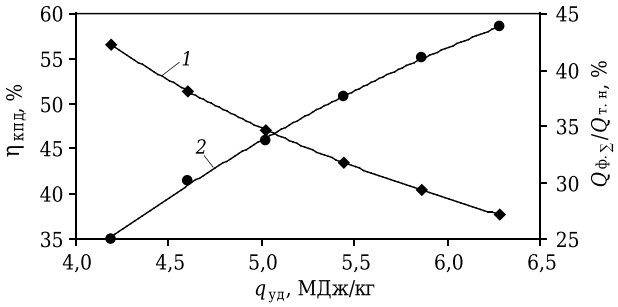

Рис. 2. Зависимость термического КПД печи (*1*) и относительных потерь теплоты через футеровку (*2*) от удельного расхода теплоты на варку 1 кг стекла

Таблица 2. **Тепловой баланс варочной части стекловаренной печи производительностью 320 т/сут ($q_{уд}$ = 4,187 МДж/кг)**

Приход теплоты	кВт	%	Расход теплоты	кВт	%
$Q_{т.н}$	15504,1	62,69	$Q_{теор}$	3435,8	13,89
$Q_{в}$	9228,7	37,31	$Q_{ст.1}$	5911,1	23,90
Итого	24732,8	100	$Q_{д.1}$	12271,0	49,61
			$Q_{ф.п}$	2804,8	11,34
			$Q_{х.н}$	310,1	1,26
			Итого	24732,8	100

бассейна. В нашем примере $Q_{ф.п}$ = 11,34 % от суммы приходных статей теплового баланса. Для сравнения отметим, что при $q_{уд}$ = 6,280 МДж/кг потери теплоты через кладку равны 8867,5 кВт, что составляет 23,92 % от суммарного поступления тепла в печь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует отметить, что предложенная методология анализа тепловой работы стекловаренных печей соответствует логической схеме процесса проектирования [7]. На первом этапе выполняется расчет расходных статей обобщенного теплового баланса печи. В результате определяются допустимые потери теплоты в окружающую среду, в том числе через футеровку. На втором этапе составляется тепловой баланс варочной части печи. Его приходные и расходные статьи являются исходными данными для расчета конструктивных параметров регенератора и структуры футеровки всех составных частей печи. Принятые при составлении теплового баланса температуры дыма и стекломассы на выходе из печи определяют требования к организации процесса горения топлива и конструкции варочного бассейна. В целом результаты расчета тепловых балансов позволяют сформировать информационную базу для моделирования сопряженных процессов тепломассообмена в реальной геометрии печи.

* * *

Статья написана по результатам исследований, проводимых в рамках реализации и за счет средств Программы повышения конкурентоспособности «5-100-2020».

Библиографический список

1. ***Дзюзер, В. Я.*** Теоретические затраты теплоты на стекловарение / *В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий, Е. Б. Садыков* // Стекло и керамика. — 2012. — № 7. — С. 3–5.

Dzyuzer, V. Ya. Theoretical heat consumption in glassmaking / *V. Ya. Dzyuzer, V. S. Shvydkii, E. B. Sadykov* // Glass and Ceram. — 2012. — Vol. 69, № 7/8. — P. 217–219.

2. ***Дзюзер, В. Я.*** Способы повышения энергоэффективности стекловаренных печей / *В. Я. Дзюзер* // Стекло и керамика. — 2012. — № 1. — С. 11–14.

3. ***Beerkens, R.*** Analysis of elementary process steps in industrial glass melting tanks – some ideas on innovations in industrial glass melting / *R. Beerkens* // Ceramics – Silikaty. — 2008. — Vol. 52, № 4. — P. 206–217.

4. ***Khoshmanesh, K***. Reduction of fuel consumption in an industrial glass melting furnace / *K. Khoshmanesh, A. Z. Kouzani, S. Nahavandi, A. Abbassi* // Conference Paper: TENCON 2007 – 2007 IEEE Region 10 Conference (DOI: 10.1109/TENCON 2007.4428958).

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

Dzyuzer, V. Ya. Energy-efficient structure for the lining of the high-temperature regenerator of a glassmaking furnace / *V. Ya. Dzyuzer* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 1. — P. 1–4.

6. ***Дзюзер, В. Я.*** Граничные условия для расчета футеровки стекловаренной печи с инновационными параметрами технической эффективности / *В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий* // Новые огнеупоры. — 2015. — № 12. — С. 9–12.

Dzyuzer, V. Ya. Boundary conditions for designing the lining of a glass-founding furnace with innovative parameters to improve technical efficiency / *V. Ya. Dzyuzer, V. S. Shvydkii* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 56, № 6. — P. 597–600.

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

Получено 09.08.16
© В. Я. Дзюзер, 2017 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

PACTRIM 12 — 12-я КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ТЕХНОЛОГИИ КЕРАМИКИ И СТЕКЛА

21–26 мая 2017 г. г. Вайколоа, США (Гаваи)