

Д. т. н. В. Я. Дзюзер (✉)

ФГБОУ ВО «Уральский федеральный университет»,
Екатеринбург, Россия

УДК 621.311.22:666.1.031.2/6

АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВАРОЧНОГО БАСЕЙНА СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ

Рассмотрено влияние теоретических затрат теплоты на стекловарение и потерь теплоты в окружающую среду на энергоэффективность варочного бассейна стекловаренной печи. Показано, что основным способом повышения энергоэффективности варочного бассейна является снижение потерь теплоты в окружающую среду. Разработана новая конструкция футеровки ванны, пригодная для варки всех марок тарного стекла. Ее применение в производстве зеленого и бесцветного стекла обеспечивает снижение потерь теплоты до 3,91 и 4,16 % соответственно от предельно низкого удельного энергопотребления 3,8 МДж/кг стекла.

Ключевые слова: стекловаренная печь, варочный бассейн, конструкция футеровки, энергоэффективность, тепловой поток, коэффициент теплопередачи.

В международной практике энергоэффективность стекловаренных печей характеризуют удельным расходом теплоты на варку 1 кг стекла:

$$q_{уд} = \frac{BQ_p}{P_n},$$

где $q_{уд}$ — удельный расход теплоты кДж/кг; B — расход топлива, м³/с; Q_p — теплотворная способность газа, кДж/м³; P_n — производительность печи, кг/с.

При варке тарного стекла средний уровень энергопотребления составляет 4,6–5,0 МДж/кг. Наиболее эффективные печи имеют $q_{уд} = 4,25$ МДж/кг. В то же время технически достижимое значение $q_{уд}$ приближается к 3,8 МДж/кг [1, 2]. Мировой объем производства стеклянной тары превышает 60 млн т/год, поэтому снижение $q_{уд}$ до технически возможного уровня является важнейшей задачей стекольной промышленности. Ее актуальность обусловлена не только уменьшением производственных затрат, но и значительным снижением выбросов диоксида углерода в окружающую среду. Понятно, что минимизация удельного энергопотребления представляется комплексной задачей, решение которой предусматривает оптимизацию процессов генерации и регенерации (в регенераторе) теплоты, а также ее эффективное использование в технологических целях. Последнее неразрыв-

но связано с повышением энергоэффективности печных ограждений [3–6].

В стекловаренной печи выделяют зону генерации теплоты (рабочее пространство) и зону технологического процесса (варочный бассейн). Выделенные зоны ограждены от окружающей среды футеровкой и разделены поверхностью ванны, температура нагрева которой зависит от организации внешнего теплообмена и определяется величиной результирующего теплового потока на поверхность стекломассы. Если энергетика процесса стекловарения является основным и необходимым условием для его протекания, то количество энергии, передаваемой в ванну через ее поверхность, должно соответствовать стокам теплоты в варочном бассейне. К их числу относят затраты теплоты на технологический процесс стекловарения и потери теплоты в окружающую среду через футеровку ванны [5].

Многостадийность процесса стекловарения предопределяет условное разделение варочного бассейна на зоны варки и осветления (рис. 1). В зоне варки плавление шихты, загружаемой на поверхность стекломассы, завершается образованием первичного расплава. Дегазация вновь сваренной стекломассы происходит в зоне осветления. Суммарный расход энергии на испарение влаги, эндотермические реакции стеклообразования, нагрев продуктов дегазации шихты (20–1500 °С) и нагрев стекломассы до температуры плавления (20–1400 °С) относят к теоретическим (минимальным) затратам теплоты на стекловарение. Величина теоретических затрат зависит от химического состава стекла и сырьевых материалов, влажности шихты (0–4 %), доли стеклобоя в суммарной массе шихты и боя (0–100 %) и других параметров [3, 4, 7–9]. В российском стандарте [10] теоретические затраты



В. Я. Дзюзер

E-mail: vdzuzer@yandex.ru

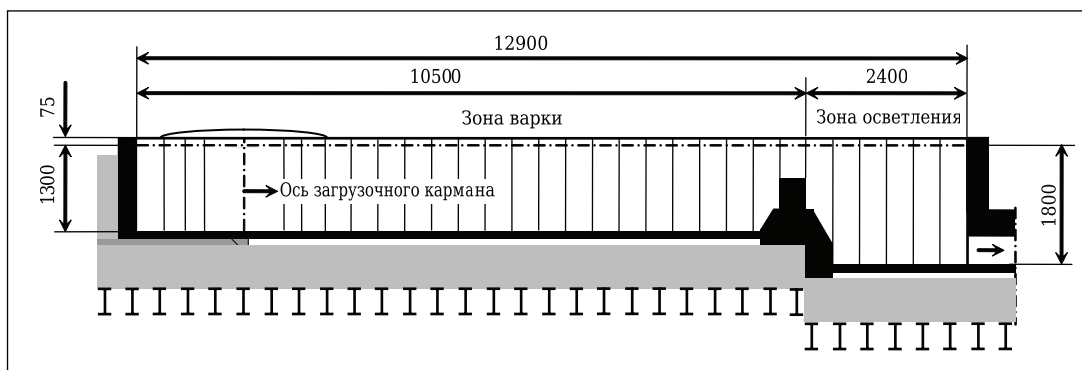


Рис. 1. Схема продольного разреза варочного бассейна стекловаренной печи производительностью 280 т/сут с подковообразным пламенем

энергии на варку тарного стекла регламентируют величиной 2740 кДж/кг.

Наибольшее влияние на теоретические затраты теплоты оказывает содержание стеклобоя. Показано [11], что минимальные затраты теплоты на плавление шихты без стеклобоя составляют 2671 кДж/кг стекла. При варке стекла из 100 %-ного стеклобоя теоретический расход энергии уменьшается до 1886 кДж/кг, что обусловлено исключением затрат теплоты на эндотермические реакции и нагрев продуктов дегазации шихты. Типичная структура теоретических затрат теплоты на плавление сухой шихты без стеклобоя включает расход энергии на эндотермические реакции (487 кДж/кг), нагрев продуктов дегазации шихты (289 кДж/кг) и плавление стекломассы (1760 кДж/кг) [12]. Как правило, теоретический расход теплоты нормируют к 50 %-ному содержанию боя и принимают равным 2275 кДж/кг [13].

Следует отметить, что теоретические затраты теплоты, определяемые технологией стекловарения, относят к «несжимаемым» стокам энергии в ванне. Поэтому их не рассматривают в качестве способа повышения энергоэффективности варки стекла. В то же время конструкция футеровки ванны, задаваемая проектом печи, значительно влияет на энергетику зоны технологического процесса. Энергоэффективность футеровки ванны оценивают потерями теплоты в окружающую среду, отнесенными к производительности печи. Например, в публикации [3] рассмотрена имитационная модель стекловаренной печи производительностью 100 т/сут с удельным расходом теплоты 3,830 МДж/кг. В структуре энергопотребления печи суммарные потери теплоты через футеровку ванны равны 191,6 кДж/кг, что составляет 5 % от $q_{\text{уд}} = 3,830$ МДж/кг. Следует отметить, что прикладная ценность приведенных данных не является очевидной, поскольку они получены на модели, существенно отличающейся от промышленных стекловаренных печей; это замечание относится к глубине ванны (1 м), заниженной на 30–40 %, и к составу

ее футеровки. Несмотря на избыточную (25–30 %) толщину дна ванны (1,025 м), его конструкция не гарантирует коррозионную стойкость пода к воздействию расплавленных капель металла и стекломассы. Еще более проблематичными представляются данные, приведенные в публикации [14]. В математической модели стекловаренной печи производительностью 200 т/сут потери через футеровку ванны заданы 1,6 МВт, что соответствует 691,2 кДж/кг. Многократно завышенные потери теплоты свидетельствуют о некорректном выборе прототипа модели в части энергоэффективности кладки ванны.

Рассмотрим современную футеровку варочного бассейна (рис. 2, 3) стекловаренной печи производительностью 280 т/сут. Печь предназначена для варки всех марок тарного стекла. Площадь ванны 109,65 м² (12,9×8,5 м), глубина стекла в зонах варки и осветления 1,3 и 1,8 м соответственно (см. рис. 1). Расчет тепловых потерь в окружающую среду выполнен для зеленого и бесцветного ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,05$ %) стекла. Эффективную теплопроводность $\lambda_{\text{эфф}}$ стекол определяют по уравнениям $\lambda_{\text{эфф}} = 1,1298 - 0,5 \cdot 10^{-3}t + 6,0 \cdot 10^{-6}t^2$ и $\lambda_{\text{эфф}} = 213,18 - 449,23 \cdot 10^{-3}t + 292 \cdot 10^{-6}t^2$ Вт/(м²·К) соответственно, где t — температура, °С.

Применительно к условиям стекловаренной печи расчет потерь теплоты в окружающую среду выполняют по одномерному уравнению стационарной теплопроводности при смешанной постановке граничных условий I и III рода:

$$q = K(t_{\text{вн}} - t_{\text{окр}}), \quad (1)$$

где q — плотность теплового потока, Вт/м²; K — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); $t_{\text{вн}}$ — температура внутренней поверхности, на которой задано граничное условие I рода, °С; $t_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды (граничное условие III рода), равная 30 °С.

При расчете теплопередачи через дно ванны $t_{\text{вн}}$ — средняя температура поверхности стекломассы в зонах варки и осветления 1369,1 и 1415,3 °С соответственно [5]. При расчете теплопередачи через стены ванны $t_{\text{вн}}$ — температура стекла на

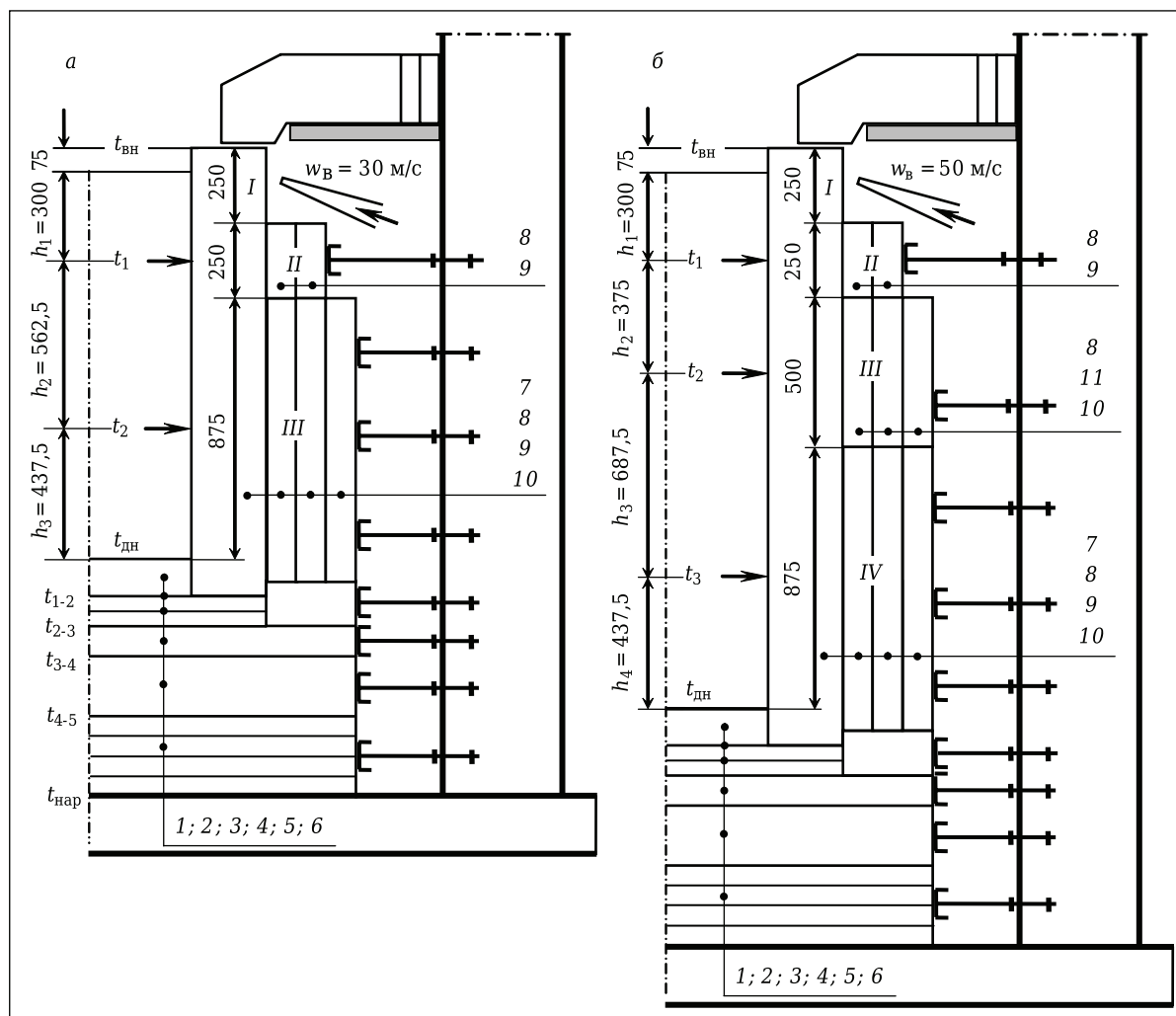


Рис. 2. Расчетная схема и конструкция футеровки варочного бассейна: *а* — зона варки; *б* — зона освещения; I–IV — расчетные участки; толщина изделий в поз. 1–11: 120, 5, 2×50, 100, 200, 260, 250, 100, 100, 100 и 100 мм соответственно

контакте с кладкой, которую принимают равной t_1 , t_2 и t_3 (см. рис. 2) и определяют при расчете потерь теплоты через ванну (табл. 1). Для этого в зонах варки и освещения выделяют три и четыре слоя стекла соответственно.

При расчете теплопередачи через ванну

$$K = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\lambda_{эфф}} + \sum_{j=1}^m \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_{нар}}}, \quad (2)$$

где h_i — толщина i -го слоя стекломассы, м; δ_j — толщина j -го слоя кладки, м; λ_j — теплопроводность j -го слоя кладки Вт/(м²·К); $\alpha_{нар}$ — коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности кладки, Вт/(м²·К); n — число слоев стекломассы; m — число слоев кладки.

Величину, обратную коэффициенту теплопередачи ($R = 1/K$, м²·К/Вт), называют термическим сопротивлением. В формуле (2) первое слагаемое в знаменателе — термическое сопротивление стекломассы. При расчете теплопередачи через стены ванны оно из формулы (2) исключается.

При естественном охлаждении наружной поверхности кладки

$$\alpha_{нар} = k_n \sqrt[4]{t_{нар} - t_{окр}} + \frac{C_0 \varepsilon_n}{t_{нар} - t_{окр}} \left[\left(\frac{T_{нар}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{окр}}{100} \right)^4 \right], \quad (3)$$

где k_n — коэффициент, учитывающий положение поверхности и направление теплоотдачи в пространстве: для боковых стен и дна ванны k_n составляет 2,4 и 1,6 соответственно; C_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела, $C_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴); ε_n — степень черноты наружной поверхности футеровки (принимается $\varepsilon_n = 0,8$); $t_{нар}$ — температура наружной поверхности кладки, °С; T — температура, К.

Принудительное охлаждение наружной поверхности кладки характеризуется выражением

$$\alpha_{нар} = (9,5 + 0,07t_{нар})(1 + 0,2w_a), \quad (4)$$

где w_a — скорость охлаждающего воздуха, м/с.

При конструировании кладки варочного бассейна учитывают ее долговечность, безопасность, энергоэффективность, технологичность

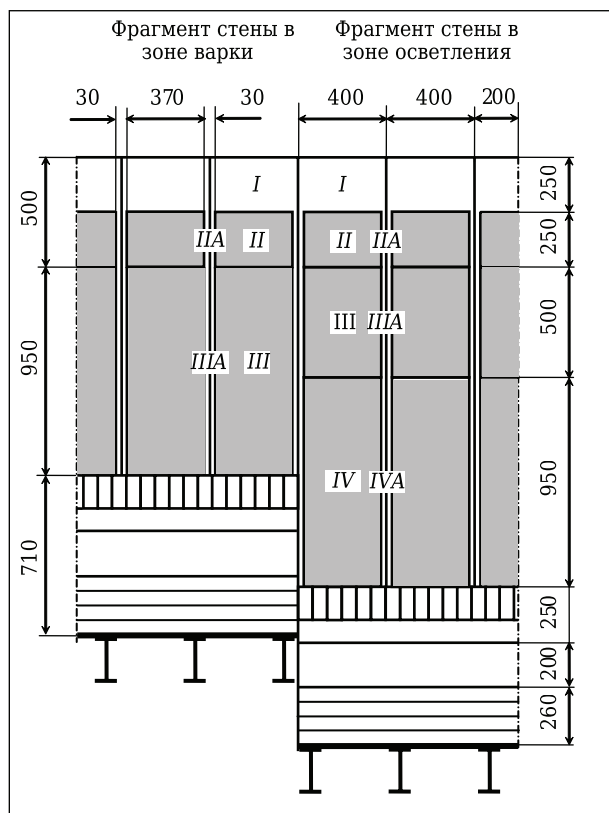


Рис. 3. Фрагмент боковой стены варочного бассейна: I --- поверхность с принудительным воздушным охлаждением; II–IV --- теплоизолированные поверхности; IIА–IVА --- поверхности с естественным охлаждением

монтажа и условия службы. Сформулированные требования учтены при разработке конструкции футеровки дна и стен ванны, показанной на рис. 2 и 3. Характеристика используемых материалов приведена в табл. 2. Позиции изделий в табл. 2 и на рис. 2 идентичны друг другу.

Выбор плавленосиликатных алюмоцирконийселикатных (AZS) огнеупоров для контакта с расплавом стекла (см. рис. 2, поз. 1 и 7) обусловлен 10-летней плановой кампанией печи и удельным съемом стекломассы 2,55 т/(м²·сут) [15]. Толщина полнотелой (без усадочной раковины) донной плитки (AZS-33 FC) равна 120 мм, что соответствует условиям ее службы. Стены ванны выполнены палисадными брусками с редуцированной

Таблица 1. Результаты расчета теплопередачи через ванну

Параметр ^{*1}	Зона варки		Зона освещения	
	зеленое стекло	бесцветное стекло	зеленое стекло	бесцветное стекло
$t_{вн}, ^\circ\text{C}$	1369,1	1369,1	1415,3	1415,3
$t_1, ^\circ\text{C}$	1339,0	1366,4	1387,1	1412,8
$t_2, ^\circ\text{C}$	1278,9	1361,2	1350,3	1409,6
$t_3, ^\circ\text{C}$	—	—	1277,5	1403,6
$t_{дн}, ^\circ\text{C}$	1228,3	1357,2	1226,8	1399,8
$t_{1-2}, ^\circ\text{C}$	1199,9	1329,1	1198,4	1372,0
$t_{2-3}, ^\circ\text{C}$	1117,5	1235,6	1116,2	1275,0
$t_{3-4}, ^\circ\text{C}$	1077,6	1192,0	1076,3	1230,3
$t_{4-5}, ^\circ\text{C}$	907,2	1000,3	906,2	1031,4
$t_{нар}, ^\circ\text{C}$	120,4	129,6	120,3	132,7
$q, \text{Вт/м}^2$	1148,9	1312,4	1147,1	1368,3
$K, \text{Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$	0,96	0,99	0,96	1,00
$F, \text{м}^2$	94,63 ^{*2}	94,63 ^{*2}	20,4	20,4
$Q, \text{кВт}$	108,72	124,19	23,40	27,91

^{*1} F — площадь поверхности дна в зоне; Q — потери теплоты через дно зоны.

^{*2} С учетом площади двух загрузочных карманов; обозначение температур показано на рис. 2.

заливочной раковиной (AZS-41 RC) с типичной толщиной 250 мм. Высота брусков в зонах варки и освещения 1,5 и 2,0 м соответственно. На уровне контакта с поверхностью стекломассы верхняя часть брусков (250 мм) не изолируется. Для уменьшения скорости коррозии она охлаждается плоскими струями воздуха. В зонах варки и освещения скорость воздуха 30 и 50 м/с, расход 1,0 и 1,5 м³/м длины стены соответственно [16]. Приведенные параметры воздуха обеспечивают эффективное охлаждение наружной поверхности брусков: в зонах варки и освещения $\alpha_{нар}$ составляет 144,6 и 203,2 Вт/(м²·K) соответственно.

Проблема безопасности дна ванны, обусловленная загрязнением стеклослой металлическими включениями, хорошо известна [17]. Направленная вниз вертикальная ячеистая коррозия AZS-плитки может привести к проникновению расплава металла и стекла в нижние слои кладки дна, выполненные донным брусом и теплоизоляционным кирпичом (см. рис. 2, поз. 5 и 6). Для защиты шамотных изделий от коррозии и разрушения в футеровке дна предусмотрены четыре слоя безопасности. Первый слой выполня-

Таблица 2. Характеристика изделий, используемых в футеровке ванны (см. рис. 2)

Позиция	Изделие	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/(м·K)
1	Плитка AZS-33 FC (33 % ZrO ₂)	3700	$7,37 - 9,26 \cdot 10^{-3}t + 5,92 \cdot 10^{-6}t^2$
2	Мертель — зерно < 0,5 мм (30 % ZrO ₂)	3100	—
3	Смесь — зерно < 5 мм (30 % ZrO ₂)	3200	$1,9 - 0,9 \cdot 10^{-3}t + 0,4 \cdot 10^{-6}t^2$
4	Плитка — 600×500×100 мм (31 % ZrO ₂ , 48 % Al ₂ O ₃)	3200	$4,5 - 3,78 \cdot 10^{-3}t + 2,1 \cdot 10^{-6}t^2$
5	Брус — 1000×500×200 мм (44 % Al ₂ O ₃)	2200	$1,15 + 0,2 \cdot 10^{-3}t$
6	Кирпич теплоизоляционный (37 % Al ₂ O ₃ , 10 МПа)	1150	$0,22 + 0,375 \cdot 10^{-3}t - 0,125 \cdot 10^{-6}t^2$
7	Брус AZS-41 RC (41 % ZrO ₂)	3900	$4,5 - 2,3 \cdot 10^{-3}t + 1,93 \cdot 10^{-6}t^2$
8	Плитка теплоизоляционная: с 67 % Al ₂ O ₃	900	$0,28 + 0,1 \cdot 10^{-3}t$
9	с 37 % Al ₂ O ₃	600	$0,1 + 0,1 \cdot 10^{-3}t$
10	волокнистая	290	$0,042 + 0,165 \cdot 10^{-3}t$
11	с 52 % Al ₂ O ₃	800	$0,23 + 0,1 \cdot 10^{-3}t$

ют мултиоциркониевой плиткой толщиной 100 мм (см. рис. 2, поз. 4). В кладке дна использована крупноформатная плитка ERMOLD 300 фирмы SEFPRO (Франция). Изготовленная методом вибролитья из плавнелитых AZS-зерен, она имеет высокую коррозионную стойкость к расплаву стекла, воздействию пара и тепловому шоку. Ее очевидным достоинством является незначительное термическое расширение. Плиты ERMOLD 300 укладывают без температурных швов. Они создают плотную основу для монолитной футеровки (см. рис. 2, поз. 3), выполняемой крупнозернистой мултиоциркониевой смесью, затворяемой водой и затвердевающей в течение 30 мин при температуре окружающей среды. Этот слой футеровки рассматривают в качестве основного способа защиты кладки дна от проникновения расплава металла. Следует отметить, что безопасность дна будет обеспечена при условии, что в процессе первичного нагрева печи монолитная структура этого слоя не будет нарушена в результате термического расширения нижерасположенных слоев кладки из формованных огнеупоров. Для сохранения целостности монолитной футеровки фирма SEFPRO предложила двухслойную (по 50 мм) заливку дна крупнозернистой смесью. В этом случае для верхнего слоя, защищенного нижним слоем от перемещения формованных изделий во время нагрева печи, создаются условия для свободного термического расширения и сохранения целостности монолитной плиты. Верхний слой безопасности (5 мм) выполняется водным раствором мелкозернистого мултиоциркониевого мертеля (см. рис. 2, поз. 2). После затвердевания на него укладывают AZS-плитку. Общая толщина кладки дна ванны 785 мм.

При конструировании теплоизоляции стен ванны учитывают особенности коррозии огнеупорной кладки [15]. Для уменьшения износа брусьев по швам примыкания в холодной футеровке предусмотрен разрыв шириной 30 мм. На рис. 3 неизолированные фрагменты поверхности стен обозначены с индексом (например, ЛА). Теплопередача через эти участки происходит при естественном теплообмене на наружной поверхности стен.

Ниже принудительно охлаждаемого участка стены (250 мм) устанавливают съемную теплоизоляцию высотой 250 и толщиной 200 мм (см. рис. 2, 3). Известно, что в результате вертикальной ячеистой коррозии в огнеупоре на границе раздела трех фаз (газ — расплав — огнеупор) образуется коррозионная полость. Интенсивное растворение AZS-огнеупора наблюдается также на участке стены, расположенном ниже поверхности стекломассы, на глубине до 350 мм. В процессе эксплуатации печи при достижении критической толщины огнеупора в коррозионной полости (20–25 мм) съемную теплоизоляцию

снимают и на ее место устанавливают защитную плитку (AZS-33 FC) высотой 500 и толщиной 75 или 100 мм. Тем самым создают условия для продления срока службы стен ванны. Незначительный износ остальной части палисадного бруса (~50 мм) позволяет увеличить толщину холодной футеровки до 300 мм. Следует отметить, что унификация типоразмеров теплоизоляционных плит обеспечивает технологичность кладки холодной футеровки стен ванны.

Выполним оценку энергоэффективности футеровки варочного бассейна. Рассмотрим теплопередачу через дно ванны. Расчетная схема показана на рис. 2, результаты расчета приведены в табл. 1. При конструировании варочного бассейна, предназначенного для варки всех марок тарных стекол, состав футеровки адаптируют к эффективной теплопроводности окрашенного (оптически плотного) стекла. Требование к футеровке формализуют температурой стекла на дне ванны при граничных условиях естественной конвекции: для зеленого стекла $t_{\text{дн}} \geq 1200^\circ\text{C}$, что соответствует динамической вязкости 102 Па·с, при которой стекло находится в текучем состоянии. Понятно, что при переходе к варке прозрачного стекла температура на дне ванны будет существенно выше. Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что при $K \leq 1,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$ рассмотренная структура кладки обеспечивает температуру зеленого стекла на дне ванны, превышающую ее минимально допустимое значение. Следовательно, термическое сопротивление энергоэффективной структуры футеровки дна ванны должно соответствовать условию: $R \geq 1,0 \text{ м}^2\cdot\text{K}/\text{Вт}$. Этот вывод, во-первых, согласуется с данными публикаций [5, 17], в которых термическое сопротивление кладки дна для зеленого стекла принято равным 0,98 и $1,0 \text{ м}^2\cdot\text{K}/\text{Вт}$ соответственно. Во-вторых, вывод не подтверждает обоснованность задания коэффициента теплопередачи K для дна ванны в работах, описанных в публикациях [14] и [18]: 5 и $3,89 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$ соответственно. В подтверждение последнего рассмотрим следующий пример.

Данные, приведенные в публикации [18], позволяют рассчитать параметры теплопередачи через дно ванны при $K = 3,89 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$. Эффективная теплопроводность стекла представлена выражением $\lambda_{\text{эфф}} = 213,0 - 0,3698T + 1,658 \cdot 10^{-4}T^2 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$. При средней температуре поверхности стекломассы $1369,1^\circ\text{C}$ температура придонного слоя расплава составляет $1270,7^\circ\text{C}$, а плотность теплового потока в окружающую среду $4828,2 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Столь высокий уровень потерь теплоты через дно ванны является недопустимым для стекловаренных печей, что свидетельствует о некорректном задании параметра K . Для сравнения: при $K = 1,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$ придонная температура стекла равна $1354,0^\circ\text{C}$, а тепловой поток составляет $1324,1 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Данные параметры в

большей мере соответствуют практике работы стекловаренных печей.

В целом потери теплоты через дно ванны (зеленое / бесцветное стекло) составляют 132,12 / 152,10 кВт (см. табл. 1), или 40,77 и 46,93 кДж/кг соответственно. Расчет потерь теплоты через стенки варочного бассейна является более сложной процедурой. На наружной поверхности палисадного бруса выделяют участки, теплопередача через которые определяется различными граничными условиями (см. рис. 3). Для получения объективной информации расчет потерь теплоты выполняют для 1-го метра длины стен в зонах варки и освещения. При этом в зоне освещения выделяют длину (1,4 м) вертикальной стенки протока, которая не изолируется. Верхнюю часть стенки (1,4×0,25 м) охлаждают воздухом ($w_b = 50$ м/с). Расчет теплопередачи через остальную часть стенки (1,4×0,925 м) выполняют при граничных условиях естественной конвекции. Потери теплоты для зеленого и бесцветного стекла через неизолированную стенку протока составляют 26,034 и 27,214 кВт соответственно.

Параметры теплопередачи через выделенные участки стен на длине 1 м приведены в табл. 3 и 4. Длина стен (с учетом карманов) в зоне варки равна 35,118 м. Потери теплоты через стены в зоне варки для зеленого и бесцветного стекла составляют 235,045 и 240,362 кВт соответственно. В зоне освещения длина теплоизолированной стены 11,9 м. Потери теплоты через стены в зоне освещения 94,906 и 98,795 кВт соответственно

для зеленого и бесцветного стекла. Общие потери теплоты через стены ванны для зеленого и бесцветного стекла составляют 355,99 и 366,37 кВт, или 109,85 и 113,05 кДж/кг соответственно.

Таким образом, абсолютные потери теплоты через футеровку варочного бассейна для зеленого и бесцветного стекла равны 488,11 и 518,47 кВт соответственно, а в расчете на 1 кг сваренного стекла 150,6 и 160,0 кДж/кг, или 3,91 и 4,16 % от 3,8 МДж/кг соответственно.

Результаты расчета, приведенные в табл. 3 и 4, позволяют определить средневзвешенные параметры теплопередачи через стены ванны. К этим параметрам относят $\bar{q}$ — среднюю плотность теплового потока, t_{cp} — среднюю температуру внутренней поверхности стенки и $\bar{K}$ — средний коэффициент теплопередачи.

Высокая плотность теплового потока через боковые стенки (табл. 5) в значительной степени определяется потерями теплоты через участок бруса с принудительным воздушным охлаждением. Вторыми по величине являются потери теплоты через разрывы в холодной футеровке. Обе статьи потерь теплоты технологически обуслов-

Таблица 5. Усредненные параметры теплопередачи через боковую стенку ванны

Параметр	Зона варки		Зона освещения	
	зеленое стекло	бесцветное стекло	зеленое стекло	бесцветное стекло
$\bar{q}$, Вт/м ²	4867,6	4977,7	4253,5	4427,8
t_{cp} , °C	1298,7	1363,2	1321,0	1407,6
$\bar{K}$, Вт/(м ² ·K)	3,84	3,73	3,29	3,21

Таблица 3. Результаты расчета теплопередачи через боковую стенку ванны длиной 1 м в зоне варки (зеленое/бесцветное стекло)

Параметр	Расчетный участок				
	I	II	IIA	III	IIIA
$t_{вн}$, °C	1369,1	1339,0/1366,4	1339,0/1366,4	1278,9/1361,2	1278,9/1361,2
t_{1-2} , °C	—	1272,5/1299,1	—	1242,6/1223,1	—
t_{2-3} , °C	—	946,8/966,2	—	1071,1/1138,1	—
t_{3-4} , °C	—	—	—	712,6/755,2	—
$t_{нар}$, °C	159,4	115,4/117,2	423,9/429,3	82,3/86,4	411,6/428,3
q , Вт/м ²	18724,7	1273,3/1309,2	14541,2/14959,0	678,3/745,5	13651,4/14879,8
F , м ²	0,25	0,23125	0,01875	0,809375	0,065625
Q , Вт	4681,2	294,4/302,8	272,6/280,5	549,0/603,4	895,8/976,5
Q_{Σ} , Вт			6693,0/6844,4		

Таблица 4. Результаты расчета теплопередачи через боковую стенку ванны длиной 1 м в зоне освещения (зеленое / бесцветное стекло)

Параметр*	Расчетный участок						
	I	II	IIA	III	IIIA	IV	IVA
$t_{вн}$, °C	1415,3	1387,1/1412,8	1387,1/1412,8	1350,3/1409,6	1350,3/1409,6	1277,5/1403,6	1277,5/1403,6
t_{1-2} , °C	—	1319,2/1344,2	—	1305,8/1359,2	—	1241,2/1364,6	—
t_{2-3} , °C	—	980,8/999,0	—	1090,1/1108,8	—	1070,0/1172,6	—
t_{3-4} , °C	—	—	—	825,3/798,3	—	711,9	—
$t_{нар}$, °C	128,2	118,5/120,2	434,0/439,2	93,3/101,6	426,1/438,5	82,2/88,5	411,3/437,3
q , Вт/м ²	19946,4	1336,6/1370,9	15271,4/15674,2	862,6/1010,3	14713,0/15623,7	677,2/781,2	13631,0/15529,2
F , м ²	0,25	0,23125	0,01875	0,4625	0,0375	0,809375	0,065625
Q , Вт	4986,6	309,1/317,0	286,3/293,9	399,0/467,3	551,7/585,9	548,1/632,3	894,5/1019,1
Q_{Σ} , Вт				7975,3/8302,1			

* F — площадь выделенной поверхности (см. рис. 3); Q — потери теплоты через выделенную поверхность; Q_{Σ} — общие потери теплоты на 1 м длины стенки.

лены и не подлежат сокращению. Низкие потери теплоты через теплоизолированные участки бруса свидетельствует об эффективности использованной теплоизоляции. Как следствие, средние значения коэффициента теплопередачи в зонах варки и освещения для зеленого и бесцветного стекла характеризуются относительно низкими значениями (см. табл. 3 и 4). В целом для стен варочного бассейна средневзвешенный коэффициент теплопередачи для зеленого и бесцветного стекла равен 3,66 и 3,56 Вт/(м²·К) соответственно; эти значения сопоставимы с представленными в публикации [5]: $K = 3,57$ Вт/(м²·К). В то же время они значительно ниже, чем принятые в публикациях [14] и [18]: 5 и 5,57 Вт/(м²·К) соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Энергоэффективность варочного бассейна определяют теоретические затраты теплоты на стекловарение и потери теплоты в окружающую среду. Первые из них относят к «несжимаемым»

стокам энергии в ванне, величина которых зависит от параметров технологического процесса. При 50 %-ном содержании стеклобоя в шихте они составляют около 2275 кДж/кг стекла. Вторые, определяемые структурой футеровки ванны, рассматривают как основной способ воздействия на потребление энергии в варочном бассейне. Применительно к условиям промышленной стекловаренной печи производительностью 280 т/сут разработана конструкция кладки ванны, которая учитывает требования к ее долговечности, безопасности, энергоэффективности, технологичности монтажа и условиям службы. Состав футеровки варочного бассейна адаптирован к варке окрашенного (оптически плотного) и бесцветного (прозрачного) тарного стекла. Оценка энергоэффективности кладки ванны показала, что суммарные потери теплоты в окружающую среду для зеленого и бесцветного стекла составляют 150,6 и 160,0 кДж/кг соответственно, или 3,91 и 4,16 % от предельно низкого удельного расхода теплоты на стекловарение 3,8 МДж/кг.

Библиографический список

1. **Beerkens, R.** Energy efficiency benchmarking of glass furnaces / R. Beerkens, H. Limpt, G. Jacobs // Glass Science and Technology. — 2004. — Vol. 77, № 2. — P. 47–57.
2. **Beerkens, R.** Energy efficiency benchmarking of glass furnaces / R. Beerkens, H. Limpt // 62th conference on glass problems : Ceramic Engineering and Science Proceedings. — 2008. — Vol. 23, № 1. — P. 93–105.
3. **Sardeshpande, V.** Model based energy benchmarking for glass furnace / V. Sardeshpande, U. Gaitonde, R. Banerjee // Energy Conversion and Management. — 2007. — Vol. 48, № 10. — P. 2718–2738.
4. **Beerkens, R.** Energy balances of glass furnaces: parameters determining energy consumption of glass melt processes / R. Beerkens // Ceramic Engineering and Science Proceedings. — 2008. — Vol. 28, № 1. — P. 102–116.
5. **Дзюзер, В. Я.** Проектирование энергоэффективных стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий. — М. : Теплотехник, 2009. — 340 с.
6. **Beerkens, R.** Energy saving options for glass furnaces and recovery of heat from their flue gases and experiences with batch and cullet pre-heaters applied in the glass industry / R. Beerkens // 69th conference on glass problems: ceramic engineering and science proceedings. — 2009. — Vol. 30, № 1. — P. 143–162.
7. **Madivate, C.** Calculation of the theoretical energy requirement for melting technical silicate glasses / C. Madivate // J. Am. Ceram. Soc. — 1998. — Vol. 81, № 12. — P. 3300–3306.
8. **Verheijen, O.** Thermal and chemical behavior of glass forming batches / O. Verheijen. — Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2003. — 209 p.
9. **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.
10. **ГОСТ Р 56828.28–2017.** Наилучшие доступные технологии. Производство стекла. Аспекты повышения энергетической эффективности. — М. : Стандартинформ, 2019.
11. **Trier, W.** Glass furnace: design construction and operation / W. Trier. — Sheffield : Society of Glass Technology, 1987. — 285 p.
12. **Beerkens, R.** Advanced heating techniques for glass melting / R. Beerkens, J. Schaaf. — Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2002. — 44 p.
13. **Beerkens, R. G. C.** Energy efficiency benchmarking of glass furnaces / R. G. C. Beerkens, H. Limpt // Proceedings of 62nd Conference on Glass Problems, University of Illinois Urbana-Campaign, United States, 16–17 October 2001.
14. **Khoshmanesh, K.** Reduction of fuel consumption in an industrial glass melting furnace / K. Khoshmanesh, A. Z. Kouzani, S. Nahavandi, A. Abbasi // Conference Paper : TENCON 2007 – 2007 IEEE Region 10 Conference.
15. **Dzyuzer, V. Ya.** Use of refractories in the melting tank of a high-production-capacity glass melting furnace / V. Ya. Dzyuzer // Refract. Ind. Ceram. — 2019. — Vol. 59, № 5. — P. 435–440.
16. **Дзюзер, В. Я.** Служба огнеупоров в варочном бассейне высокопроизводительной стекловаренной печи / В. Я. Дзюзер // Новые огнеупоры. — 2018. — № 9. — С. 3–9.
17. **Дзюзер, В. Я.** Анализ параметров качества плавленых AZS-огнеупоров для стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер // Новые огнеупоры. — 2021. — № 4. — С. 3–9.
18. **Moreau, R.** Verschleiß von Wannenböden Technische Gegenmaßnahmen / R. Moreau // Fachberichte: Sprechsaal. — 1986. — Bd. 119, № 8. — S. 696–701.
19. **Pilon, L.** Three-dimensional flow and thermal structures in glass melting furnaces. Part I. Effects of the heat flux distribution / L. Pilon, G. Zhao, R. Viskanta // Glass Science and Technology. — 2002. — Vol. 75, № 2. — P. 55–68. ■

Получено 04.08 21

© В. Я. Дзюзер, 2021 г.