

Д. т. н. В. Я. Дзюзер (✉), д. т. н. В. С. Швыдкий

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

УДК 666.762.1.043:666.1.031

## ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ФУТЕРОВКИ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ С ИННОВАЦИОННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Приведены результаты численного моделирования внешнего теплообмена в инновационной газовой стекловаренной печи с удельным съемом стекломассы  $2,92 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$  и удельным расходом теплоты  $4,187 \text{ МДж}/\text{кг}$ . Определены граничные условия для расчета и конструирования футеровки рабочего пространства. Установлено, что средняя и максимальная температура свода составляет  $1512,6$  и  $1608,4 \text{ }^\circ\text{C}$ , продольной стенки (отапливаемая сторона печи) —  $1548,3$  и  $1596,3 \text{ }^\circ\text{C}$  и торцевой (у протока) стенки —  $1553,2$  и  $1622,2 \text{ }^\circ\text{C}$  соответственно. Средняя температура поверхности ванны в зонах варки и осветления  $1404,8$  и  $1426,6 \text{ }^\circ\text{C}$  соответственно.

**Ключевые слова:** стекловаренная печь, внешний теплообмен, математическое моделирование, граничные условия, футеровка, температура, тепловой поток.

**А**ктуальной проблемой в производстве тарного стекла является повышение удельной производительности печей до  $3 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$  при удельном расходе теплоты  $q_{\text{уд}} \leq 4,187 \text{ МДж}/\text{кг}$  ( $1000 \text{ ккал}/\text{кг}$ ) без применения дополнительного электроподогрева. Следовательно, речь идет о параметрах технической эффективности, не имеющих аналогов в мировой практике стекловарения. При этом межремонтный период эксплуатации печей должен составлять 9–10 лет, а выработка стекла с  $1 \text{ м}^2$  площади варочного бассейна за кампанию печи должна превышать  $9000 \text{ т}/\text{м}^2$ . Очевидно, что достижение заданного уровня эффективности становится возможным лишь при условии соответствия футеровки печей параметрам их тепловой работы.

Структура футеровки стекловаренных печей определяется тепловым напряжением рабочего пространства и допустимой величиной потерь теплоты в окружающую среду. Для высокопроизводительных печей тепловое напряжение рабочего пространства достигает  $100 \text{ кВт}/\text{м}^3$ , а потери теплоты через теплоизолированные участки кладки регламентируются плотностью теплового потока  $500\text{--}900 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . В целом потери теплоты через футеровку печи не должны превышать 7 % от суммы приходных статей теплового баланса.

Разработка футеровки печи непрерывного действия базируется на результатах расчета стационарной теплопередачи через многослой-

ную стенку. При этом способ задания граничных условий определяется достоверностью исходных данных по температуре газовой среды в рабочем пространстве или на поверхности стены. В стекловаренной печи сжигание газа происходит в турбулентном факеле, поэтому определение эффективной температуры продуктов сгорания в рабочем пространстве не представляется возможным. Как следствие, расчет теплопередачи производится при смешанной постановке граничных условий I и III рода [1]. В этом случае основным граничным условием расчета является температура нагрева соответствующих конструктивных элементов печи.

При расчете футеровки рабочего пространства стекловаренной печи выделяются свод, продольные и торцевые стены, для которых должны быть заданы как средние, так и максимальные (локальные) температуры нагрева. Для футеровки варочного бассейна основным граничным условием расчета является средняя температура поверхности стекломассы в зонах варки и осветления. Понятно, что указанные температуры не могут быть определены экспериментально. В свою очередь, инновационный уровень декларируемых параметров технической эффективности печей исключает возможность использования ранее полученных опытных данных. Таким образом, граничные условия для расчета и конструирования футеровки могут быть определены лишь в результате математического моделирования внешнего теплообмена для печи с заданными производительностью, тепловой нагрузкой и геометрическими размерами.

Математические модели тепловой работы печей находят все большее применение при решении прикладных задач. При этом достовер-



В. Я. Дзюзер

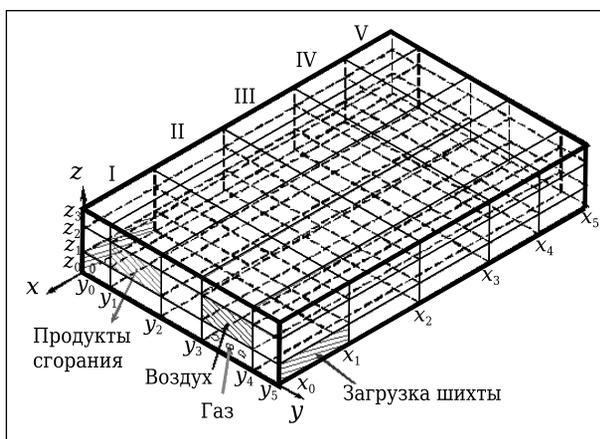
E-mail: vdzuser@yandex.ru

ность полученных результатов в значительной мере зависит от адекватности модели физическим условиям функционирования прототипа. Опыт показывает, что для анализа тепловой работы стекловаренных печей представляется эффективным применение зональных моделей, формализованных системой нелинейных алгебраических уравнений. Их структура учитывает не только особенности теплогенерации и тепловых аспектов технологии стекловарения, но и трехмерную геометрию рабочего пространства [2].

В качестве объекта исследования выбрана регенеративная стекловаренная печь с подковообразным пламенем производительностью  $P_n = 3,7$  кг/с (320 т/сут). Площадь варочного бассейна  $109,65 \text{ м}^2$  ( $12,9 \times 8,5$  м); удельный съем стекломассы  $2,92 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ . Топливо — природный газ с низшей рабочей теплотворной способностью  $33778 \text{ кДж}/\text{м}^3$ . При удельной затрате теплоты  $q_{уд} = 4,187 \text{ МДж}/\text{кг}$  и температуре подогрева воздуха  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$  суммарный приход теплоты в печь равен  $24,7 \text{ МВт}$ .

Геометрическая аппроксимация рабочего пространства печи (рис. 1) выполнена в виде параллелепипеда. По длине рабочее пространство разбито на 5 расчетных участков (I–V) с координатами  $x_0, x_1, \dots, x_5$ , равными  $0, 3,01, 6,02, 9,03, 10,965, 12,9$  м соответственно. Заданная протяженность участков позволяет достаточно четко отобразить состояние поверхности ванны, обусловленное плавлением куч шихты. Прежде всего отметим, что отношение суммарной длины участков I–III к общей длине ванны отвечает практическим представлениям о соотношении протяженности зон варки и осветления.

Разделение зоны варки (участки I–III) на три равные части длиной  $3,01$  м каждая позволяет выделить участки поверхности ванны, занятые шихтой (I), шихтой и рафинажной пеной (II) и рафинажной пеной (III). Зона осветления (участ-



**Рис. 1.** Аппроксимированная геометрическая модель рабочего пространства стекловаренной печи с подковообразным пламенем: I–V — расчетные участки

ки IV и V) разбивается на две равные части по  $1,935$  м каждая, одну из которых можно отнести к участку максимального нагрева поверхности ванны, другую — к участку «чистого» зеркала стекломассы. Приведенное разбиение рабочего пространства модели по оси  $x$  представляется также весьма удобным для задания аэродинамического контура факела и выгорания топлива по его длине [2]. Для их отображения поперечное сечение параллелепипеда разбивается на 5 зон по оси  $y$  и на 3 по оси  $z$ . Координаты зон по ширине и высоте рабочего пространства:  $y_0, y_1, \dots, y_5$  равны  $0, 1,15, 3,35, 5,15, 7,35, 8,5$  м,  $z_0, z_1, \dots, z_3$  равны  $0, 0,85, 1,70$  и  $2,3$  м соответственно. Приведенное расчленение поперечного сечения рабочего пространства позволяет достаточно реалистично задать условия ввода газа и воздуха в печь, а также настильное движение потока продуктов сгорания топлива. Расчет внешнего теплообмена выполнен при оптимальной длине факела, равной длине рабочего пространства [2].

Таким образом, рабочее пространство печи, включая поверхность стекломассы, представлено в виде 75 объемных и 110 поверхностных зон. Последние подразделяются на поверхности с граничными условиями I (adiaбатические поверхности), II и III рода. К адиабатическим (виртуальным) поверхностям (на рис. 1 заштрихованы) относятся влеты горелочных устройств и проемы в продольных стенах, предназначенные для загрузки шихты и боя. На отапливаемой стороне печи температура этих поверхностей принята равной  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ , на отводящей стороне —  $1450 \text{ }^\circ\text{C}$ . Для огнеупорной футеровки рабочего пространства граничные условия III рода задаются коэффициентом теплопередачи, равным  $1$  и  $2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  для свода и боковых стен соответственно. Для поверхностных зон стекломассы граничные условия II рода заданы плотностью результирующего теплового потока, равного относительной доле технологически обусловленных затрат теплоты на стекловарение  $Q_T$ , кВт. Величина  $Q_T$  включает затраты теплоты на стеклообразование, а также на нагрев первичного расплава и вторичного боя стекла до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$Q_T = P_n [G_{ш} (q_{\Sigma} + q_1 + q_2 + q_3 + q_4) + q_6], \quad (1)$$

где  $G_{ш}$  — расход шихты на  $1$  кг стекломассы, кг/кг;  $q_{\Sigma}$  — суммарный тепловой эффект реакций стеклообразования на  $1$  кг шихты, кДж/кг;  $q_1, q_2, q_3, q_4$  — затраты теплоты на испарение влаги, нагрев первичного расплава (от температуры плавления  $665,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ), нагрев продуктов дегазации (до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и плавление стекла соответственно, кДж/кг;  $q_6$  — затраты теплоты на нагрев боя, вводимого для варки  $1$  кг стекломассы, кДж/кг.

Расчет компонентов в формуле (1) выполнен для химического состава зеленого стекла при  $30$  %-ной доле боя в шихте влажностью  $4$  %:  $G_{ш} = 0,812 \text{ кг}/\text{кг}$ ,  $q_{\Sigma} = 355,0$ ,  $q_1 = 100,6$ ,  $q_2 = 1715,0$ ,  $q_3 =$

= 409,3,  $q_4 = 278,7$  и  $q_6 = 599,9$  кДж/кг. Величина  $Q_r = 10808,0$  кВт распределяется по расчетным участкам I–III в соотношении 40, 40 и 20 %, что соответствует плотности результирующего теплового потока для поверхностных зон стекломассы 169,0, 169,0 и 84,5 кВт/м<sup>2</sup>.

Результаты расчета зональных температур поверхностей (с погрешностью ± 4 %) аппроксимируются бикубическими непрерывными функциями. Для этой цели используется стандартная программа Maple [2]. Визуализация аппроксимирующих функций выполняется в виде двумерного поля изотерм (рис. 2–5). Для футеровки определяются максимальная (локальная) температура  $t_{\max(F)}$ , °С, и ее геометрические координаты, а также среднеинтегральная температура поверхности  $t_{\text{cp}(F)}$ , °С (см. таблицу).

Применим данные, полученные при анализе эффективности ранее разработанной футеровки рабочего пространства высокопроизводительной стекловаренной печи [1, 3]. Для структуры футеровки свода и боковых стен предельная температура применения равна 1620 и 1640 °С соответственно, что превышает  $t_{\max(F)}$  для футеровки инновационной печи. При  $t_{\text{cp}(F)}$  удельный тепловой поток в окружающую среду равен 601,6, 581,0 и 584,0 Вт/м<sup>2</sup> соответственно для свода, продольной и торцевой боковых стен. Таким образом, уровень потерь теплоты через футеровку инновационной печи соответствует требованиям к энергоэффективности печных ограждений.

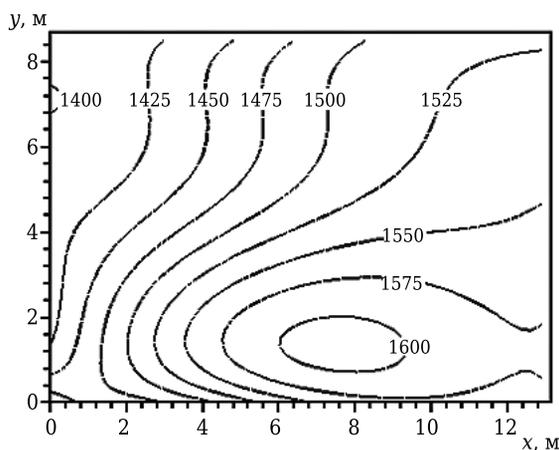


Рис. 2. Поле температур, °С, свода рабочего пространства

**Максимальная и среднеинтегральная температуры поверхности, °С**

Поверхность	$t_{\max(F)}$	$t_{\text{cp}(F)}$
Свода	1608,4 ( $x = 7,57, y = 1,34$ )	1512,6
Продольной стены (отопливаемой)	1596,6 ( $x = 8,76, z = 1,36$ )	1548,3
Торцевой стены (у потока)	1622,2 ( $y = 8,22, z = 0$ )	1553,2

Для поверхности стекломассы двумерное аппроксимирующее уравнение приводится к одномерному виду:

$$t_{\text{cp}(B)} = 1252,0 + 82,44x - 24,19x^2 + 3,46x^3 - 0,16x^4, \quad (2)$$

где  $t_{\text{cp}(B)}$  — средняя по ширине ванны температура поверхности стекломассы, °С.

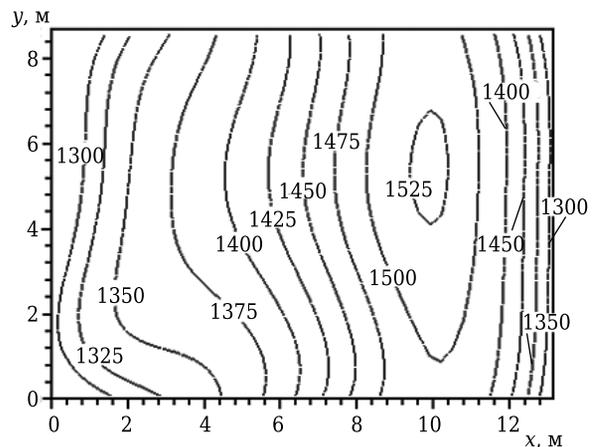


Рис. 3. Поле температур, °С, поверхности ванны

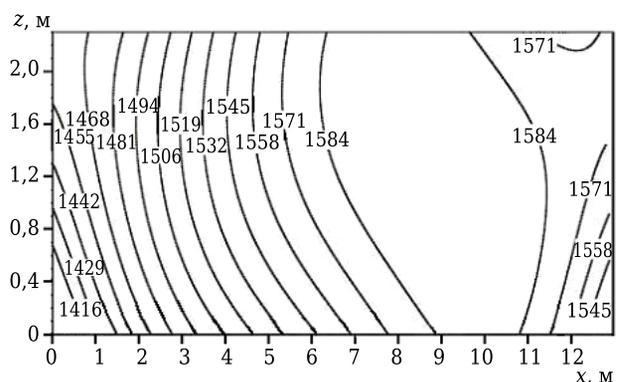


Рис. 4. Поле температур, °С, на поверхности продольной стены рабочего пространства на отопливаемой стороне печи

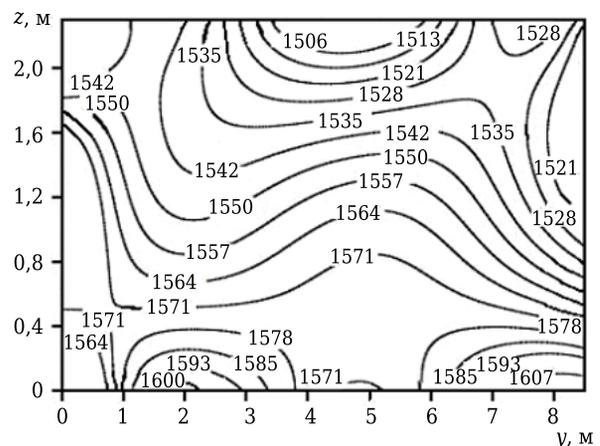


Рис. 5. Поле температур, °С, на поверхности торцевой стены рабочего пространства (у протока)

Анализ полинома (2) показывает, что максимальное значение  $t_{cp(B)} = 1517,3$  °С находится в точке с координатой  $x = 9,9$  м. Средняя температура поверхности ванны в зонах варки и осветления равна 1404,8 и 1426,6 °С соответственно. Полученные данные позволяют рассчитать граничные условия для расчета футеровки ограждающих поверхностей варочного бассейна [1].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка стекловаренной печи с инновационными параметрами технической эффективности

### Библиографический список

1. **Дзюзер, В. Я.** Энергоэффективная тепловая изоляция бадделейитокорундовой кладки в стекловаренных печах / В. Я. Дзюзер // Новые огнеупоры. — 2013. — № 10. — С. 13–16.

**Dzyuzer, V. Ya.** Energy-efficient thermal insulation for the baddeleyite-corundum lining of glass-founding furnaces / V. Ya. Dzyuzer // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 54, № 5. — P. 358–361.

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

предусматривает определение представительных температур, характеризующих нагрев печных ограждений. Среднеинтегральная и максимальная температуры всех конструктивных элементов футеровки могут быть определены по результатам математического моделирования внешнего теплообмена в рабочем пространстве печи.

\* \* \*

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

3. **Дзюзер, В. Я.** Разработка теплоизолированного свода высокопроизводительной стекловаренной печи / В. Я. Дзюзер // Новые огнеупоры. — 2014. — № 7. — С. 27–31.

**Dzyuzer, V. Ya.** Development of a heat insulated roof of a high-capacity glassmaking furnace / V. Ya. Dzyuzer // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 4. — P. 306–310. ■

Получено 14.07.15

© В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий, 2015 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

June 26 – 30, 2016	Toronto Marriott Downtown Eaton Centre Hotel   Toronto, Ontario Canada
9 <sup>th</sup> International Conference on High Temperature Ceramic Matrix Composites – HTCMC 9	Global Forum on Advanced Materials and Technologies for Sustainable Development – GFMAT 2016
<h2>HTCMC 9 – 9-я международная конференция по высокотемпературной керамике и композитам</h2> <p>26–30 июня 2016 г. <span style="float: right;">г. Торонто, Канада</span></p> <p><b>Темы:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Моделирование и конструирование новых материалов и процессов</li> <li>• Проектирование и разработка современных керамических волокон в композитах: симпозиум в честь профессора R. Naslain</li> <li>• Инновационный дизайн, передовые обработки и технологии производства</li> <li>• Материалы для экстремальных условий: сверхвысокотемпературная керамика и наноламинированные тройные карбиды и нитриды (MAX-фазы)</li> <li>• Полимерные производные керамики и композитов</li> <li>• Расширенные тепловые и экологические барьерные покрытия: обработка, свойства и применение</li> <li>• Термомеханическое поведение и производительность композитов</li> <li>• Керамическая интеграция и добавки в технологии производства</li> <li>• Компонент тестирования и оценка композитов</li> <li>• Энергетика в аэрокосмической промышленности: проблемы и возможности</li> </ul> <p style="text-align: center;"><a href="http://www.ceramics.org">www.ceramics.org</a></p>	