

Влияние качества шихты на стекловарение

д.т.н., профессор В.Е. Маневич (ОАО "Институт Стекла"), к.т.н. К.Ю. Субботин (ОАО "Стромизмеритель"), к.т.н. А.Г. Чесноков (ОАО "Институт Стекла")

Высокопроизводительные флоат-линии и новые линии для выработки полых изделий, пришедшие на смену старому стеклоформирующему оборудованию, потребовали существенной интенсификации работы стекловаренных печей. Необходимость повышения эффективности работы стекловаренных печей диктовали и экономические факторы (рост цен на огнеупоры, топливо и энергию), конъюнктурные факторы (обострение конкуренции производителей, повышение требований к качеству изделий). Самым важным моментом для производства листового стекла является то, что оно стало базовым продуктом для производства стеклопакетов, многослойного строительного и автомобильного стекла, стекол с покрытиями (зеркал, энергосберегающего, декоративного), т.е. изделий, к которым предъявляются повышенные требования в отношении их качества.

Использование флоат-стекла, как конечного продукта непрерывно сокращается. В 2002 г. в России произведено стекол с покрытиями – 5,5 млн. м², зеркал – 2,2 млн. м², многослойного стекла – 6,3 млн. м², стеклопакетов – 17 млн. м², закаленного стекла – 8,3 млн. м², что составляет 65 % от произведенного базового флоат-стекла.

Удельная производительность печей тарного и листового стекла достигла 2000 кг с м² варочной части печей и более. Продолжительность кампании печей 7 и более лет.

В этих условиях требования к качеству сырьевых материалов и шихты неизмеримо возросли. С низким качеством сырьевых материалов и шихты в значительной мере связан тот факт, что в России все еще низкий выход листового и полого стекла высокого качества и значительное количество этих материалов и изделий импортируется, создавая труднопреодолимую конкуренцию для отечественных производителей.

Рассмотрим процессы варки стекла и влияние на них качества шихты, основываясь на некоторых опубликованных нами ранее результатах [1].

На рис. 1 представлена схема плавления шихты в ванной печи

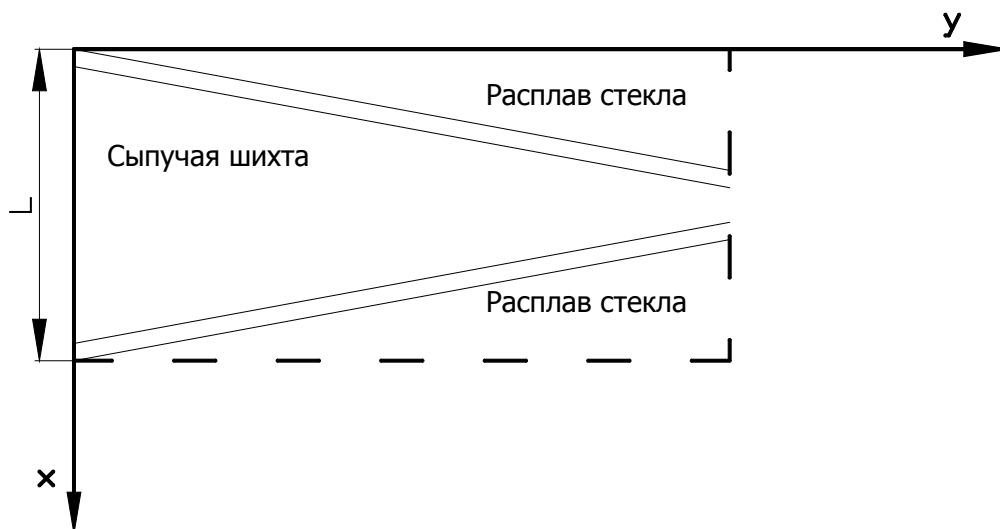


Рис. 1 Схема плавания шихты

Шихта загружается в печь на расплав стекла со скоростью загрузки V . В процессе движения слоя шихты вдоль печи толщина его меняется вследствие расплавления снизу и сверху. Расплав, образующийся сверху, стекает с куч шихты, снизу – непосредственно переходит в расплав стекла. В течение 1-2 мин. после загрузки шихты в печь, на ее поверхности появляется пленка вязкого расплава толщиной 10 мм, которая препятствует полному расплавлению шихты. Можно считать, что процесс нагрева и плавания шихты происходит в квазистационарном режиме, когда скорость образования расплава равна скорости стекания его с куч. Те же рассуждения можно распространить на процесс нагрева шихту снизу.

Пусть X и Y неподвижные координаты. Тогда для процесса растворения кремнезема в расплаве силикатов (силикатообразование и стеклообразование) справедливы следующие зависимости:

$$\frac{\partial C_{SiO_2}}{\partial t} = V \operatorname{grad} C_{SiO_2} - D\rho \Delta C_{SiO_2} - (C_{SiO_2}^m + \int_{t_0}^t \sum_{j=1}^m K_j \prod_{i=1}^m C_{ij} \partial \tau) / (t - t_0) \quad (1)$$

где C_{SiO_2} – концентрация SiO_2 ;

$$\Delta C_{SiO_2} = \frac{\partial^2 C_{SiO_2}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_{SiO_2}}{\partial y^2} - \text{оператор Лапласа};$$

$\int_{t_0}^t \sum_{j=1}^m K_j \prod_{i=1}^m C_{ij} \partial \tau$ - количество SiO_2 , связанного в результате силикатообразования ;

K_i - константа i -ой реакции силикатообразования;

D – коэффициент диффузии;

ρ - плотность расплава;

$C_{\text{SiO}_2}^{(ш)}$ – количество SiO_2 в шихте

Уравнение (1) дополняется уравнением теплообмена

$$\rho c' \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{ grad } T - q D \rho \text{ grad } C_p) - \rho v g \text{ grad } h \quad (2)$$

где c' – теплоемкость;

λ - эффективный коэффициент теплопроводности;

q – удельная теплота изотермического переноса;

C_p – концентрация расплава в смеси с растворенными частицами SiO_2 ;

h – энтальпия смеси расплава

$$h = h_{\text{SiO}_2} C_{\text{SiO}_2} + h_p c_p; \quad c' = \varphi_{\text{SiO}_2} C_{\text{SiO}_2} + \varphi_p c_p$$

φ_{SiO_2} , φ_p – доля SiO_2 и расплава в смеси.

Для анализа уравнения (1) использовались данные теплотехнического обследования печи флотат-системы (Саратовский завод) и системы вертикального вытягивания (Лисичанский завод).

Скорость измерения концентрации SiO_2 в продольном сечении печи аппроксимируется зависимостью:

$$C_{\text{SiO}_2} = 13,75 + 4,5x + 0,14y - 1,2t - 7,8x^2 + 1,6t^2$$

$$V \approx 8-15 \text{ м/час}; \quad D \approx 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$$

Тогда первый член в правой части уравнения (1) имеет порядок $V \frac{\partial C_{\text{SiO}_2}}{\partial x} \sim 40-80$;

$V \frac{\partial C_{\text{SiO}_2}}{\partial y} \sim 150-250$; второй член 10^{-4} , четвертый $10-30$.

Данные позволяют упростить задачу до одномерного случая и получить следующее трансцендентное уравнение относительно $\beta = S/\sqrt{2t}$, где $x=S$ – координата межфазовой границы расплав стекла – сыпучая шихта:

$$\frac{\lambda}{\sqrt{1/D_{ш}}} (T_{пл} - T_{шо}) - \frac{\exp\left(\frac{\beta^2}{2D_{ш}}\right)}{\exp\left(\frac{\beta}{2/D_{ш}}\right)} = j\rho\sqrt{\frac{\pi}{2}}\beta + \frac{\lambda_{ст}}{\sqrt{1/D_{ст}}} (T_{ст} - T_{пл}) - \frac{\exp\left(\frac{\beta^2}{2D_{ст}}\right)}{\exp\left(\frac{\beta}{\sqrt{2/D_{ст}}}\right)} \quad (3)$$

где j – теплота плавления

При расчете границы зоны варки приняты следующие данные.

Скорость загрузки шихты на печи флоат-линии – 16 м/час, на линии вертикального вытягивания – 10 м/час.

Для состава шихты, соответствующего рецепту стекла : $\lambda_{ш}=0,2227$ ккал/м*час*град; $\lambda_{ст}=1,32$ ккал/м*час*град; $C_{ш}=0,32$ ккал/м³град; $j=35$ ккал/кг.

Толщина слоя шихты $2/3 L=0,2$ м; $T_{пл}=1123$ °К

Тогда по (3) имеем, что время нагрева шихты до температуры плавления $T_{пл}$ равно $t_{пл}\approx 0,67$ час. С учетом скорости загрузки шихты это соответствует границе зоны варки для печи Лисичанского завода 6,7 м (район 2^{ой} горелки), Саратовского завода 11,4 м (район между 3^{ей} и 4^{ой} горелками).

Исходные параметры и, следовательно, результаты расчета зависят от температуры варки и стабильности состава шихты. При неизменной температуре варки и отклонении содержания SiO₂ в 2 % расчеты дают изменение границы зоны варки +1,3 м.

Известно, что стабильность границы зоны варки один из важнейших факторов стабильного режима варки, качества стекломассы, поступающей на формование и далее качества стекла.

Стабильность состава шихты в свою очередь определяется при прочих равных условиях точностью дозирования ее компонентов.

Точность дозирования, в свою очередь, определяется совершенством конструкции дозатора, качеством электронной системы управления. Кроме того, абсолютного соот-

ветствия заданного и фактического рецепта шихты не может быть получено вследствие того, что сырьевые материалы (компоненты шихты), как правило, вводят несколько компонентов стекла (оксидов).

Более строго можно сформулировать следующие технологические и физические ограничения на оценку точности дозирования [2, 3, 4]:

1. нормирование компонентов стекла;
2. некоторые компоненты стекла вводятся несколькими сырьевыми компонентами шихты;
3. в системе уравнений, описывающих зависимость состава шихты от заданного состава стекла, количество неизвестных может не совпадать с количеством уравнений (случай неквадратной матрицы);
4. решение системы уравнений «состав стекла – состав шихты» должно быть неотрицательным;
5. необходим учет механического уноса компонентов шихты;
6. необходим учет улетучивания компонентов стекла из расплава;
7. состав сырья, стекла, шихты измеряется с ошибками, зависящими от методики измерений и погрешности приборов.

В векторно-матричной форме зависимость «состав сырья – состав шихты» описывается следующим соотношением:

$$Y=AX \tag{4}$$

где $Y=\{y_i\}_n$ – n-мерный вектор состава шихты;

$X=\{x_j\}_m$ – m-мерный вектор отвесов сырья;

$A=\{a_{ij}\}$ – матрица состава сырья размерности n x m.

Переходя к разностной форме и сокращая члены второго порядка малости имеем:

$$\sigma_i^2 = \sum_{j=1}^n \left[\left(\hat{A}_j \sigma_{ij} \right)^2 + \left(\hat{x}_{ij} \sigma_j \right)^2 \right] \tag{5}$$

где σ_i – среднеквадратичное отклонение $\Delta \hat{y}_i$;

$$\Delta \hat{y}_i = \sum_{j=1}^n \left(\hat{A}_j \Delta \hat{x}_{ij} + \Delta \hat{A}_j \hat{x}_{ij} \right);$$

\hat{A}_j – измеренное значение j-го компонента сырья;

$\Delta \hat{x}_{ij}$ - абсолютная ошибка измерения I-го оксида в j-ом компоненте шихты;

$\Delta \hat{A}_j$ – абсолютная ошибка измерения веса j -го компонента сырья;

x_{ij} – измеренное значение содержания i го оксида в j -ом компоненте сырья;

$$\sigma_{ij} = \frac{\hat{x}_{ij} \alpha_j}{3};$$

$$\delta_j = \frac{\Delta \hat{A}_{j\max}}{3}$$

α_j – точность определения содержания основных оксидов в j -ом компоненте сырья.

Расчет по соотношению (5) произведен для двух видов дозаторов, используемых в стекольной промышленности России: дозатора ДВСТ конструкции ПО «Веда» с рычажной системой и фиксацией массы через стрелку индикатора и тензометрического дозатора ДСИ с микропроцессорным блоком управления МБУД, конструкции Института Стекла и фирмы «Стромизмеритель» (таблица 1).

Таблица 1

Максимальные погрешности дозирования

Сырьевой материал	Песок	Доломит	Мел	Сульфат	Сода	Полевой шпат
Дозатор	Погрешность дозирования (% от НПД)*					
ДВСТ	0,26	0,66	0,83	0,67	0,32	1,06
ДСИ	0,12	0,16	0,31	0,28	0,14	0,32
*НПД - наибольший предел дозирования						

Как следует из данных таблицы 1, только дозатор ДСИ обеспечивает точность дозирования на уровне требований Правил технической эксплуатации заводов листового и тарного стекла.

В предыдущем случае рассматривалось импульсное, единичное изменение состава шихты. При многоимпульсном отклонении содержания SiO_2 в шихте возможен другой подход к оценке допустимого уровня отклонений [5].

На рисунке 2 приведены графики колебания содержания SiO_2 в шихте и соответствующие им колебания содержания SiO_2 в стекле Токмакского завода.

$$\Delta_{\text{доп.ш}} = \frac{\Delta_{\text{доп.ст}}}{\sqrt{\sum_{c=1}^n f_{\Delta t}^2(i\Delta t)}}$$

$\Delta_{\text{доп.ш}}$ - допустимые колебания SiO₂ в шихте

$\Delta_{\text{доп.ст}}$ - допустимые колебания SiO₂ в стекле

$\Delta f_{\Delta t}$ - кривая изменения содержания SiO₂ в стекле (результат моделирования процесса гомогенизации)

i – количество импульсов

Результат расчета представлен на рис. 3

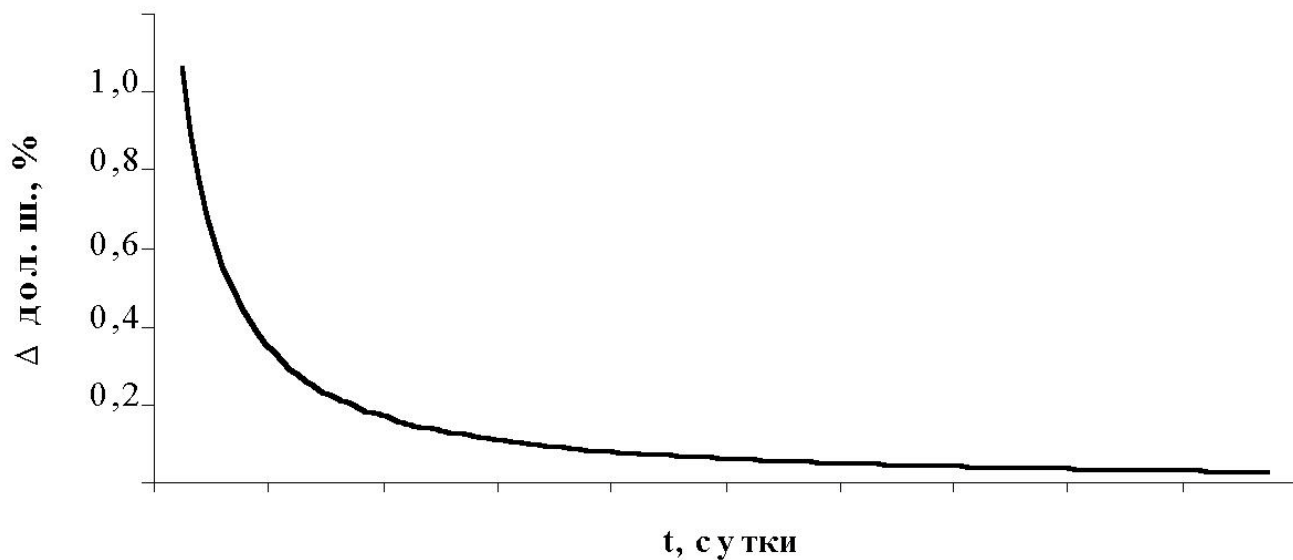
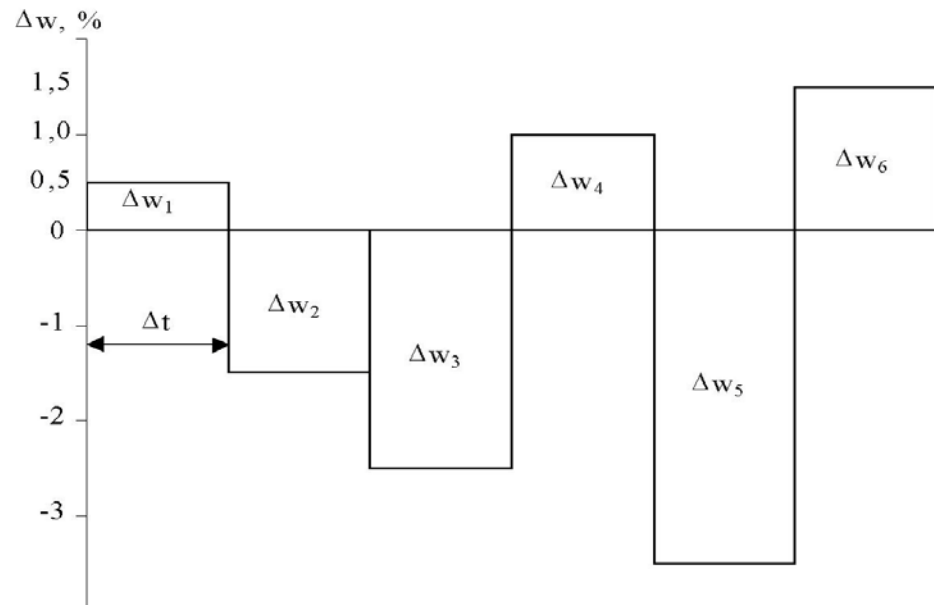


Рис. 3

Таким образом, можно допустить единичное отклонение (одна доза шихты) до 1 %, что связано с усредняющей способностью печи. Как правило, отклонение должно быть не более 0,15 %.

Такую точность дозирования могут обеспечить только дозаторы ДСИ (Россия) или импортные дозаторы класса точности не ниже ДСИ.

a)



б)

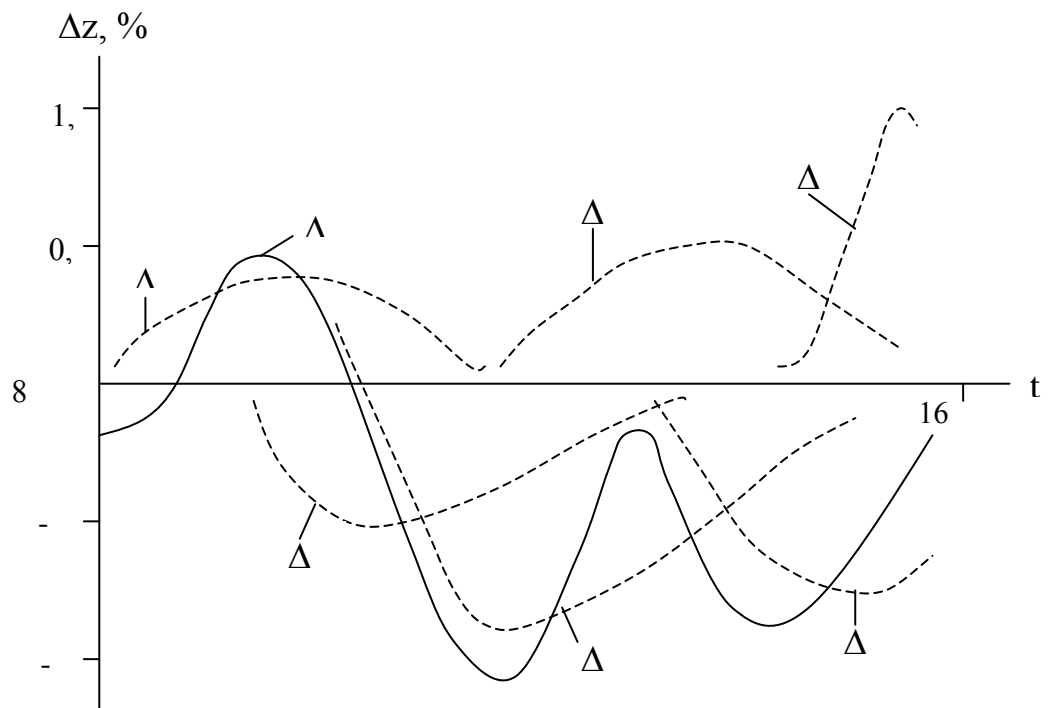


Рис. 2

Δw_i – изменение содержания SiO_2 в шихте в период Δt

Δz_i – соответствующее им изменение содержания SiO_2 в стекле

Литература

1. Кучеров О.Ф., Маневич В.Е., Клименко В.В. Автоматизированные системы управления в производстве стекла – Л.: Стройиздат, 1980, 178 с
2. Марков Е.П., Маневич В.Е., Куликов Б.М. Оценка максимально допустимых погрешностей работы дозаторов при подготовке многокомпонентной шихты – Строительные материалы, 1977, №1, с. 33-34
3. Марков Е.П., Чесноков А.Г., Маневич В.Е., Овчаренко А.И "Анализ методов расчета рецепта стекольной шихты" "Стекло и керамика", № 12, 1980, с. 3-42;
4. Чесноков А.Г., Марков Е.П. "Методическое пособие для проведения практических занятий по теме "Расчет на ЭВМ МИР-2 погрешностей дозирования при производстве стекольной шихты" М., ВИПК МПСМ СССР, 1981;
5. Першин М.Л., Маневич В.Е., Лисовская Г.П. Допустимые отклонения химического состава стекольной шихты - Стекло и керамика, 1986, №3, с. 12-13