ISSN 1561-8331 (Print)
ISSN 2524-2342 (Online)
УДК 666.363.4-492:666.15
https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-2-166-176

Поступила в редакцию 20.06.2025
Received 20.06.2025

С. П. Гречуха[1,2], Ю. Г. Павлюкевич[1], Л. Ф. Папко[1], Е. Е. Трусова[1], А. П. Кравчук[1]

[1]Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь
[2]ОАО «Гомельстекло», Гомель, Беларусь

ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА КВАРЦЕВОГО ПЕСКА НА ПРОЦЕССЫ СТЕКЛООБРАЗОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ЛИСТОВОГО СТЕКЛА

Аннотация. Проведено исследование влияния гранулометрического состава кварцевого песка месторождения «Лениндар» (Республика Беларусь) на процессы стекловарения при синтезе стекол системы Na_2–MgO–CaO–SiO_2. Получены данные по влиянию различных фракций кварцевых песков на последовательность процессов, протекающих при термической обработке шихты, и скорость растворения зерен кремнезема, определяющую продолжительность процесса стеклообразования. С использованием сканирующей электронной микроскопии установлено влияние температурно-временных режимов термической обработки на размеры зерен остаточного кремнезема и степень однородности расплава на стадии стеклообразования. По данным электронно-зондового микроанализа проведены расчеты скорости и времени растворения зерен кремнезема различного фракционного состава в стеклообразующем расплаве. При исследовании процессов стеклообразования и качества листового стекла выявлена возможность использования кварцевого песка расширенного фракционного состава, в том числе включающего зерна размером 0,8–1,25 мм, при варке стекол в высокопроизводительных стекловаренных печах, что позволит более рационально расходовать ограниченные запасы данного сырья.

Ключевые слова: кварцевый песок, листовое стекло, концентрация элементов, коэффициент диффузии, скорость растворения

Для цитирования. Влияние гранулометрического состава кварцевого песка на процессы стеклообразования в технологии листового стекла / С. П. Гречуха, Ю. Г. Павлюкевич, Л. Ф. Папко [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. – 2026. – Т. 62, № 2. – С. 166–176. https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-2-166-176

S. P. Grechuha[1, 2], Y. G. Pavlyukevich[1], L. F. Papko[1], E. E. Trusova[1], A. P. Kravchuk[1]

[1]Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus
[2]JSK «Gomelglass», Gomel, Belarus

INFLUENCE OF THE GRANULOMETRIC COMPOSITION OF SILICA SAND ON THE GLASS FORMATION PROCESS IN FLAT GLASS TECHNOLOGY

Abstract. The effect of granulometric composition of silica sand from the Lenindar deposit (Republic of Belarus) on glass-formation processes during the Na_2O–MgO–CaO–SiO_2 glass system synthesis was studied. The data were obtained on influence of different fractions of silica sand on the sequence of processes occurring during the batch heat treatment and the dissolution rate of silica grains which determines the duration of glass formation. Scanning electron microscopy was used to study the influence of temperature and time modes of the heat treatment on the grain sizes of residual silica and the degree of melt homogeneity at the glass formation stage. Based on the data of electron probe microanalysis, the rate and time of dissolution of silica grains of different fractional composition in the glass-forming melt were calculated. The results of glass formation processes monitoring and the quality of flat glass revealed that the usage of the expanded silica sand fractional composition is possible. This composition can include the grains of 0.8–1.25 mm in size when the glass melting proceeds in high-performance furnaces. That will allow more rational use of limited resources of this raw material.

Keywords: silica sand, flat glass, element concentration, diffusion coefficient, dissolution rate

For citation. Grechuha S. P., Pavlyukevich Y. G., Papko L. F., Trusova E. E., Kravchuk A. P. Influence of the granulometric composition of silica sand on the glass formation process in flat glass technology. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2026, vol. 62, no. 2, pp. 166–176 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-2-166-176

Введение. Силикатные стекла, основным стеклообразующим компонентом которых является кремнезем, составляют более 90 % объемов производства всех видов стекол, включая листовое строительное, автомобильное, тарное, медицинское, светотехническое и др. Кварцевые пески, основной источник кремнезема в производстве стекла, представляют собой рыхлую осадочную

породу, состоящую из зерен кварца размером 0,1–1,25 мм. Рациональное использование сырьевых ресурсов является важнейшей задачей промышленного стеклоделия. В первую очередь это относится к кварцевому песку, запасы которого истощаются. Одним из путей увеличения объемов производства обогащенного кварцевого песка является расширение его фракционного состава за счет использования более крупных фракций. Зерновой состав одних кварцевых песков отличается значительной неоднородностью, а для других характерен большой выход крупных и мелких фракций. Для использования таких песков в стекловарении необходима их дополнительная обработка. Размер зерен стекольных песков оказывает влияние на скорость процессов силикато- и стеклообразования, а также на количество кристаллических и газообразных включений в стекле [1–4].

Скорость стеклообразования, как и всякая скорость растворения, зависит от свойств растворяющегося вещества – зерен кварца, от свойств растворителя – расплава силикатов, а также от внешних условий – температуры, давления и скорости обмена растворителя вокруг растворяющегося вещества. Для различных диапазонов размеров зерен кварцевого песка существует кубическая или квадратическая зависимость времени провара от размера зерен [4–7].

В стекловаренных печах высокой производительности шихта и образуемый ею расплав находятся длительное время, что создает возможность пересмотра применения стандартного гранулометрического состава сырьевых материалов, в частности кварцевого песка.

Листовое стекло относится к системе Na_2O–MgO–CaO–SiO_2, при этом оксиды-модификаторы вводятся карбонатами натрия, магния и кальция. При термической обработке шихты на первых стадиях стекловарения происходят твердофазовые реакции с образованием $Na_2Mg(CO_3)_2$ (300–550 °C) и $Na_2Ca(CO_3)_2$ (550–850 °C). В интервале температур 700–850 °C кальцинированная сода может реагировать с кварцевым песком, образуя метасиликат или дисиликат натрия, что отвечает стадии силикатообразования. Жидкая фаза в шихте появляется в интервале температур 780–880 °C в результате плавления карбоната натрия, двойных карбонатов ($Na_2Mg(CO_3)_2$ и $Na_2Ca(CO_3)_2$) и эвтектик между данными соединениями и Na_2CO_3. Мелкие частицы кварца растворяются на первых стадиях стеклообразования (при температуре 800 °C), тогда как более крупные частицы кварца растворяются в основном в стекломассе путем диффузии. Процесс растворения может замедляться из-за скопления мелких частиц кремнезема (кластеризации) [8–12].

С помощью метода экспериментального определения выясняется оптимальный размер частиц кварца в шихте стекла по отношению к скорости плавления и однородности расплава. Выражая доли нерастворенного кварца в зависимости от температуры и начального размера частиц кварца, рассчитывается доля кварца, вступающего в реакции образования силикатов, скорость растворения кварца в расплаве стекла и температура, при которой кварц полностью растворяется [13].

Для установления продолжительности полного растворения зерен песка в расплаве используется методика расчета коэффициента диффузии SiO_2 по кинетическим кривым растворения зерен кремнезема в расплавах системы Na_2O–SiO_2 и предлагается эмпирическая формула. Основными факторами, влияющими на данный процесс, являются температура и силикатный модуль расплава, определяемый его составом [14–16].

Методология настоящей работы включает определение скорости процесса растворения зерен кремнезема в стеклообразующем расплаве на основе экспериментальных данных влияния фракционного состава кварцевого песка на процессы стеклообразования при синтезе листового стекла. Это позволит определить возможность использования крупных фракций кварцевого песка отечественного месторождения в технологии листового стекла с целью рационального использования данного сырьевого материала.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования являются кварцевые пески месторождения «Лениндар» следующего фракционного состава: 0,1–0,315, 0,315–0,8, 0,8–1,25 мм. С использованием кварцевого песка различного фракционного состава проводилась подготовка шихты листового стекла следующего состава, мас.%: SiO_2 – 72,9; Na_2O – 13,6; MgO – 3,8; CaO – 8,6; Al_2O_3 – 0,8.

Согласно химическому анализу, проведенному с помощью лазерного анализатора LEA-S500, содержание SiO_2 составляет 99,39–99,75 мас.%, Fe_2O_3 – от 0,016 мас.% для песка фракции

0,8–1,25 мм до 0,023 мас.% в пробах песка фракции 0,1–0,315 мм. В соответствии с результатами анализа пробы кварцевого песка соответствуют марке ОВС-030-В.

Для исследования процессов стеклообразования проведена термическая обработка шихты, при составлении которой использовался песок различного фракционного состава, в газовой печи периодического действия с регулируемым температурным и газовым режимами при температурах 1 200–1 500 °С с шагом 100 °С при скорости подъема температуры в печи 250 °С/ч. При достижении заданной температуры тигли извлекались из печи последовательно без выдержки, а также после выдержки в течение 0,5 и 1 ч.

Электронная микроскопия продуктов термической обработки шихты проводилась с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-5610 LV с системой химического анализа EDX JED-2201.

Рамановская спектроскопия выполнялась с помощью сканирующего лазерного микроскопа ConfotecMR350 3D и лазера с длиной волны 532 нм при комнатной температуре.

Рентгенофазовый анализ проб песка и продуктов термической обработки шихты проводился с помощью дифрактометра D8 Advance фирмы Bruker. По данным рентгенофазового анализа примесные минералы в кварцевом песке представлены цирконом $ZrSiO_4$ и $Zr(SiO_4)$, рутилом TiO_2, псевдорутилом $Fe_2Ti_3O_9$, сидеритом $FeCO_3$.

Определение времени растворения зерен кварцевого песка в силикатном расплаве осуществлялось по результатам исследования образцов, прошедших термическую обработку в температурном интервале 1 200–1 400 °С. Для расчета использовали уравнение:

$$\frac{d\nu}{dx} = \beta(C_{\text{н}} - C_{\tau}), \tag{1}$$

где $\frac{d\nu}{dx}$ – скорость растворения вещества в единицу времени; $C_{\text{н}}$ – концентрация насыщения; C_{τ} – фактическая концентрация в данный момент; β – коэффициент пропорциональности, зависящий от диффузии вещества в расплаве:

$$\beta = \frac{D}{\delta}, \tag{2}$$

где D – коэффициент диффузии; δ – толщина диффузионного слоя.

Фактическую концентрацию оксида кремния устанавливали экспериментально электронно-зондовым микроанализом.

Для расчета коэффициента диффузии использовали метод вероятностной диаграммы, позволяющий по экспериментально полученному распределению концентраций элементов в диффузном слое на микроуровне вычислить коэффициент диффузии оксида кремния в приграничном слое для реальной системы с учетом всех влияющих на процесс факторов [17].

Особенностью метода является то, что для нахождения коэффициента диффузии не требуется знание всей кривой концентрации $C(x,\tau_k)$, полученной при диффузии между компонентами системы с исходными концентрациями C_1 и C_2, а достаточно несколько значений $C(x,\tau_k)$ для некоторых координат x (при известной продолжительности термической обработки τ) с последующим усреднением полученных результатов.

Для диффузионной задачи с краевыми (начальными и граничными) условиями:

$$\begin{aligned} C(x<0,\tau=0) &= C_1, \\ C(x>0,\tau=0) &= C_2, \\ C(x=\infty,\tau>0) &= C_1, \\ C(x=+\infty,\tau>0) &= C_2. \end{aligned} \tag{3}$$

Уравнение для определения коэффициента диффузии:

$$\frac{d(x,\tau)}{d\tau} = D\frac{\partial^2 C(x,\tau)}{\partial x^2} \tag{4}$$

имеет вид:

$$\theta = \frac{C(x,\tau) - C_1}{C_1 - C_2} = \frac{1}{2}\left\{1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int\limits_0^{\frac{x}{2\sqrt{D\tau}}} e^{-a} da\right\} = \frac{1}{2}\{1 - erf(Z)\},$$

где $erf(Z)$ – интеграл ошибок Гаусса (функция Гаусса), $Z = \frac{x}{\sqrt{D\tau}}$.

Для вычисления коэффициента диффузии по данным точечного химического анализа на микроуровне определялось отношение $\frac{C(x,\tau) - C_1}{C_1 - C_2}$ как функция x и τ, находилось значение $erf(Z)$:

$$erf(Z) = 1 - 2\frac{C(x,\tau) - C_1}{C_1 - C_2}. \quad (5)$$

По найденному значению $erf(Z)$ по протабулированным значениям функции Гаусса определялось значение аргумента Z и по известным значениям x, Z и τ вычислялся коэффициент диффузии D:

$$D = \frac{x^2}{4Z^2\tau}. \quad (6)$$

Результаты и их обсуждение. Позиционная термическая обработка шихты, при составлении которой использовался кварцевый песок фракций 0,1–0,315, 0,315–0,8 и 0,8–1,25 мм, при температуре 1 200 °С с выдержкой 0,5–1 ч выявляет разделение остеклованной массы на два слоя: стеклообразный (расплав) и слой кремнеземистой корки, включающий кристаллическую, стеклообразную и газовую фазы.

Согласно данным рентгенофазового анализа и рамановской спектроскопии использование кварцевого песка фракции 0,8–1,25 мм замедляет процессы плавления продуктов реакций силикатообразования. В фазовом составе данного образца до температуры термообработки 1 200 °С сохраняются силикаты кальция и магния, в то время как в остальных образцах кристаллическая фаза представлена только кремнеземом, при этом в интервале температур 1 300–1 350 °С происходит превращение кварца в кристобалит.

Наибольшая скорость процесса стеклообразования характерна для образца шихты с кварцевым песком фракции 0,1–0,315 мм: при выдержке при температуре 1 300 °С в течение 0,5 и 1 ч на поверхности расплава имеются единичные зерна кремнезема и их конгломераты, при 1 400 °С с выдержкой 1 ч достигается однородность расплава. Использование крупнодисперсного кварцевого песка фракции 0,8–1,25 мм требует большей температуры (до 1 500 °С) и продолжительности термической обработки для завершенности процесса стеклообразования: выдержка в течение 1 ч обеспечивает завершение стеклообразования, зерна кремнезема полностью растворяются.

Использование электронного микроскопа с системой химического анализа позволяет провести исследование процессов растворения кремнезема на стадии стеклообразования. Для изучения влияния гранулометрического состава кварцевого песка на скорость растворения зерен кремнезема использовались образцы, прошедшие позиционную термическую обработку при температурах 1 200, 1 300 и 1 400 °С с различным временем выдержки.

Результаты исследования структуры образцов, при подготовке которых использовалась фракция кварцевого песка 0,1–0,315 мм, показаны на рис. 1. В структуре образца, прошедшего термическую обработку при 1 200 °С, имеются конгломераты зерен кремнезема размером 150–170 мкм. Повышение температуры термообработки до 1 300 °С с выдержкой в течение 1 ч обусловливает уменьшение количества и размера зерен кремнезема, составляющего 50–70 мкм. Последовательно проведен анализ химического состава от центра кристаллического зерна с шагом 25 мкм по линиям, указанным на ЭМ-снимках. На рис. 2 представлены концентрационные кривые содержания оксида кремния в диффузионном слое при разных температурно-временных условиях термической обработки. Величина диффузионного слоя составляет 25–50 мкм и уменьшается с ростом температуры.

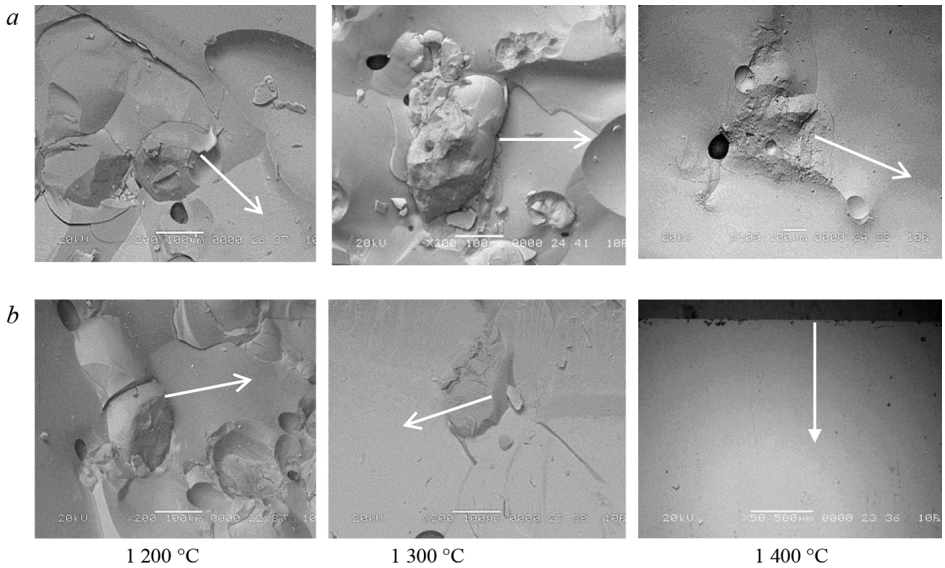

Рис. 1. ЭМ-исследование образцов, синтезированных с использованием кварцевого песка фракции 0,1–0,315 мм при температурах 1 200, 1 300 и 1 400 °C без выдержки (*a*) и с выдержкой 1 ч (*b*)

Fig. 1. Electron microscopy of samples synthesized using silica sand of fraction 0.1–0.315 mm at temperatures of 1 200, 1 300 and 1 400 °C without holding (*a*) and by holding for 1 h (*b*)

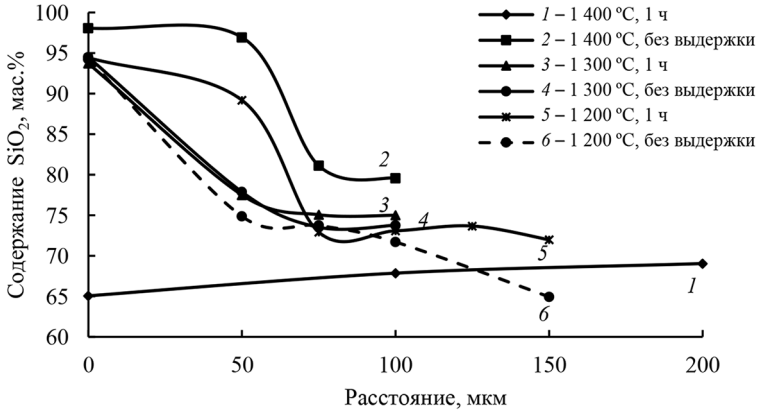

Рис. 2. Изменение содержания SiO_2 по линии анализа для кварцевого песка фракции 0,1–0,315 мм

Fig. 2. Change in SiO_2 content along the analysis line for silica sand of fraction 0.1–0.315 mm

Зерна кремнезема в образце, полученном при температуре 1 400 °C без выдержки, не имеют четко очерченных контуров (см. рис. 1), а кривая распределения SiO_2 по исследуемой линии имеет своеобразный вид.

Очевидно, данное крупное образование является конгломератом зерен кремнезема, включающим стеклофазу с высоким содержанием SiO_2 (порядка 80 мас.%).

Результаты исследования структуры образцов шихты, содержащей кварцевый песок фракции 0,315–0,8 мм, прошедших термическую обработку, представлены на рис. 3 и 4. Размер зерен кремнезема в структуре образцов составляет 200–450 мкм. У границы зерна состав стеклофазы характеризуется повышенным содержанием SiO_2, далее его содержание снижается до близкого к заданному значению. При использовании фракции кварцевого песка 0,315–0,8 мм термическая обработка до температуры 1 300 °C (без выдержки) приводит к уменьшению размера частиц остаточного кремнезема до 200–300 мкм. Выдержка при температуре 1 300 °C закономерно приводит к уменьшению размера зерен остаточного кремнезема – от 50–250 мкм при выдержке в течение 0,5 ч до 50–150 мкм при выдержке в течение 1 ч. В процессе выдержки образца при данной температуре при растворении кремнезема создается переходная зона с повышенной концентра-

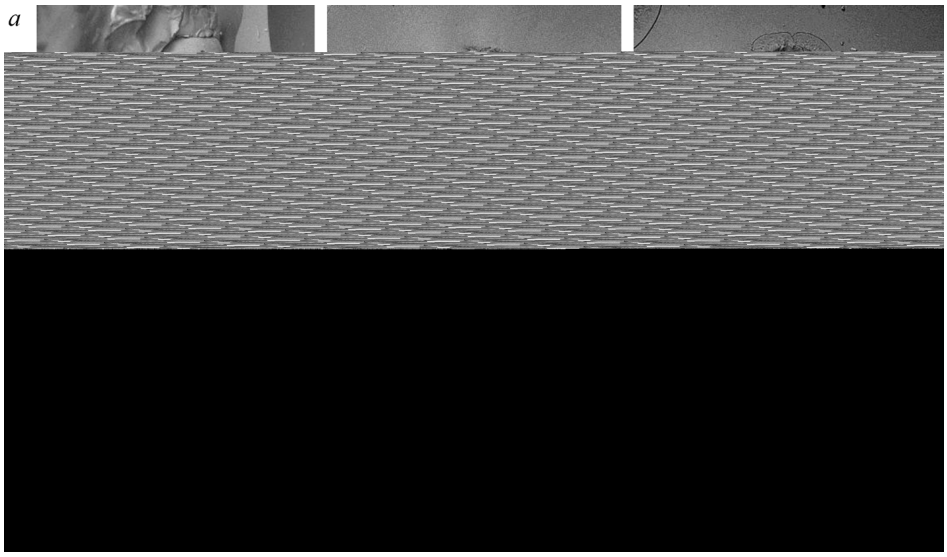

Рис. 3. ЭМ-исследование образцов, синтезированных с использованием кварцевого песка фракции 0,315–0,8 мм при температурах 1 200, 1 300 и 1 400 °С без выдержки (*a*) и с выдержкой 1 ч (*b*)

Fig. 3. Electron microscopy of samples synthesized using silica sand of fraction 0.315–0.8 mm at temperatures of 1 200, 1 300 and 1 400 °C without holding (*a*) and by holding for 1 h (*b*)

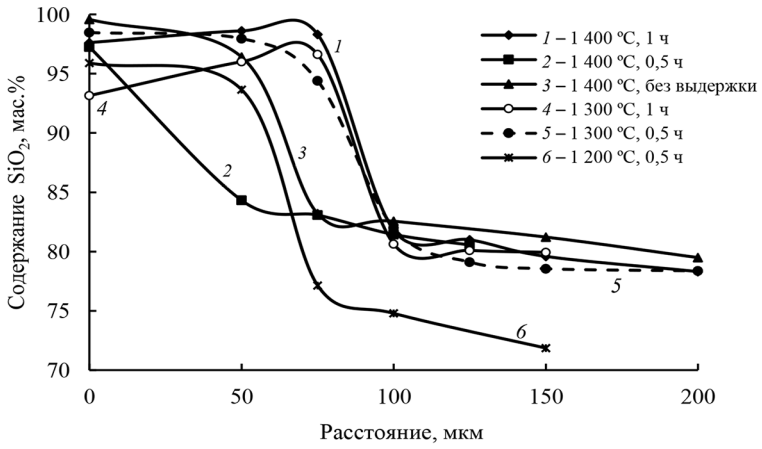

Рис. 4. Изменение содержания SiO_2 по линии анализа для кварцевого песка фракции 0,315–0,8 мм

Fig. 4. Change in SiO_2 content along the analysis line for silica sand of fraction 0.315–0.8 mm

цией SiO_2 у зерен кристаллической фазы. Изменение времени выдержки позволяет оценить влияние фактора времени на процесс растворения зерен кремнезема. При этом важным является не только время полного растворения кристаллической фазы, но и время достижения химической однородности стеклофазы.

Особенностью исследуемых образцов является наглядное выделение переходной зоны вокруг зерен кремнезема на ЭМ-снимках. На картах распределения кремния, полученных на образцах без выдержки при максимальной температуре, границы зерна размером порядка 200 мкм четко очерчены, переходная зона имеет размер 25–30 мкм (рис. 5). Аналогичные зоны имеются в образцах, термическая обработка которых при 1 400 °С проводилась с выдержкой 0,5 и 1 ч. Размер кристаллических образований составляет 100–160 мкм.

На рис. 6 представлены результаты исследования образцов, полученных при использовании фракции песка 0,8–1,25 мм.

Фазовый состав образца, полученного при использовании крупнозернистого кварцевого песка при температуре термообработки 1 200 °С, включает силикаты кальция и магния. Выдержка образца при температуре 1 200 °С в течение 1 ч достаточна для плавления силикатов. В струк-

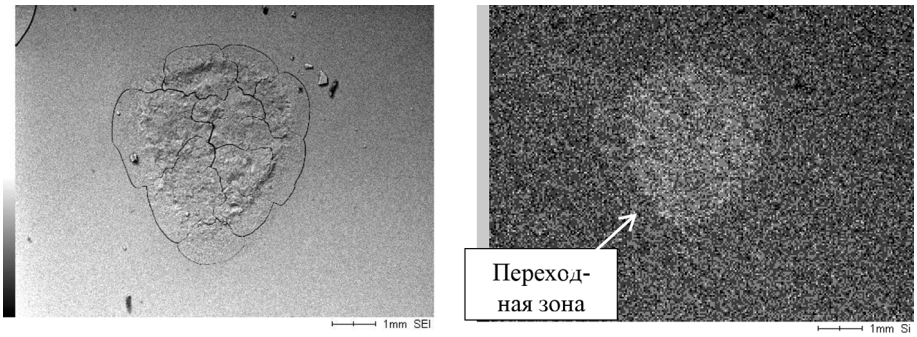

Рис. 5. Карта распределения кремния по сечению образца, обработанного при температуре 1 400 °C

Fig. 5. Mapping of Si for sample section, heat treatment at 1 400 °C

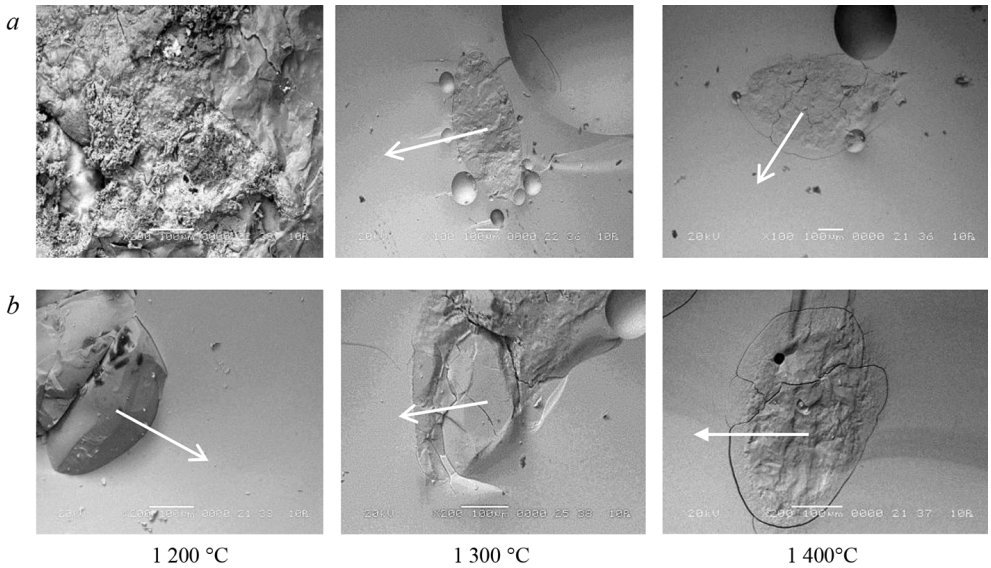

Рис. 6. ЭМ-исследование образцов, синтезированных с использованием кварцевого песка фракции 0,8–1,25 мм при температурах 1 200, 1 300 и 1 400 °C без выдержки (*a*) и с выдержкой 1 ч (*b*)

Fig. 6. Electron microscopy of samples synthesized using silica sand of fraction 0.8–1.25 mm at temperatures of 1 200, 1 300 and 1 400 °C without holding (*a*) and by holding for 1 h (*b*)

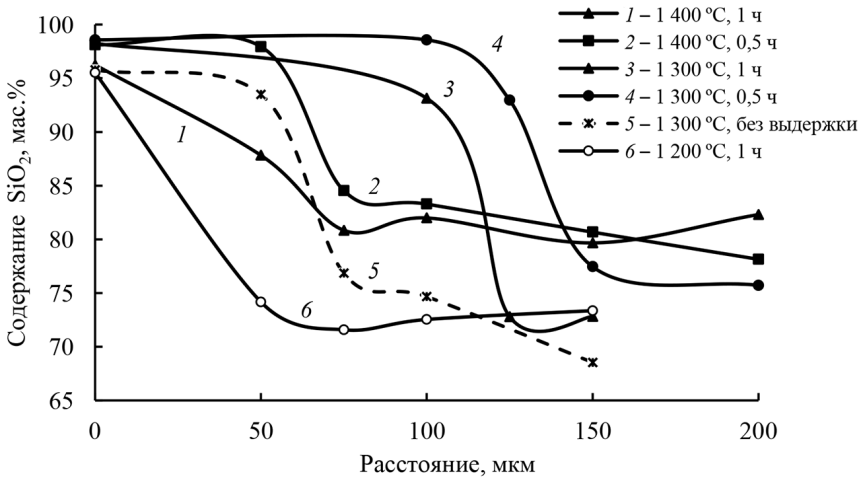

Рис. 7. Изменение содержания SiO_2 по линии анализа для кварцевого песка фракции 0,8–1,25 мм

Fig. 7. Change in SiO_2 content along the analysis line for silica sand of fraction 0.8–1.25 mm

туре образца, полученного при обработке шихты при температуре 1 200 °С с выдержкой 1 ч, имеются зерна кремнезема размером до 400 мкм. На расстоянии 70–150 мкм от границы зерна имеется зона активной диффузии оксида кремния (рис. 7). Карты распределения элементов свидетельствуют о химической неоднородности стеклофазы. Отмечается меньший объем газовой фазы, чем в случае использования мелкодисперсного кварцевого песка.

Термическая обработка образца шихты, содержащей крупнодисперсный кварцевый песок, при температуре обработки 1 400 °С с выдержкой в течение 1 ч обеспечивает более активные диффузионные процессы. Переходная зона стеклофазы вокруг зерен кремнезема составляет порядка 25 мкм, химический состав более однороден, хотя размер зерен остаточного кремнезема достаточно велик – 200–400 мкм. Термическая обработка при 1 400 °С с выдержкой 1 ч не обеспечивает завершенности процессов стеклообразования в шихте при использовании кварцевого песка фракции 0,8–1,25 мм.

Полученные методом электронной микроскопии данные являются экспериментальным основанием для расчета скорости процесса растворения зерен кремнезема в стеклообразующем расплаве.

При выполнении расчетов использовали следующие допущения: зерна кремнезема состоят из монодисперсных частиц размером 0,1, 0,315, 0,8 и 1,25 мм; частицы кремнезема имеют сферическую форму и состоят из чистого оксида кремния; началом координат на выбранном распределении является предельная концентрация оксида кремния в образце.

Толщина диффузионного слоя устанавливалась по концентрационным кривым распределения оксида кремния в пограничном слое и определялась как расстояние между зонами с предельной и минимальной концентрациями (см. рис. 2, 4, 7). Для температуры 1 200 °С толщина слоя составляет 60–75 мкм, для 1 300 °С – 40–50 мкм, для 1 400 °С – 20–25 мкм. Угол наклона концентрационной кривой, характеризующий интенсивность диффузионного процесса, с ростом температуры увеличивается и почти не зависит от размера зерен кремнезема.

Для вычисления коэффициента диффузии непрерывное распределение концентрации диффундирующего элемента заменяли вероятностной (сеточной) функцией. Из экспериментальных данных определяли отношение $\frac{C(x,\tau)-C_1}{C_1-C_2}$ как зависимость от x и τ и находили значение функции Гаусса по формуле (5). По найденному значению $erf(Z)$ по протабулированным значениям функции Гаусса определялось значение аргумента Z.

В таблице и на рис. 8 представлены результаты расчетов.

Характеристика процесса растворения кремнезема в силикатном расплаве

Characteristics of silica dissolution process in silicate melt

Температура, °С	Коэффициент диффузии $\overline{D}$, м^2/с	Скорость растворения, м/с	Зерна кремнезема, мм			
			0,1	0,315	0,8	1,25
			Время растворения, ч			
1 400	$2{,}29 \cdot 10^{-10}$	$2{,}35 \cdot 10^{-4}$	0,43	1,34	3,41	5,32
1 300	$8{,}90 \cdot 10^{-11}$	$1{,}69 \cdot 10^{-4}$	0,59	1,86	4,73	7,39
1 200	$2{,}50 \cdot 10^{-11}$	$7{,}05 \cdot 10^{-5}$	2,21	6,96	17,68	27,62

Как видно из представленной зависимости, для исследованной системы и условий синтеза время растворения частиц размером 0,1 мм существенно ниже, чем частиц размером 0,315, 0,8 и 1,25 мм. В первом случае процесс растворения идет с большей скоростью во всем рассматриваемом интервале температур. Разный наклон изменения времени растворения от размера зерна свидетельствует о разной скорости поступления оксида кремния от каждой фракции в расплав. При этом чем выше температура расплава, тем больше скорость растворения (см. рис. 8).

Из полученных данных видно, скорость процесса подчиняется экспоненциальному закону, что соответствует физике процесса, и с ростом температуры увеличивается. Большое влияние

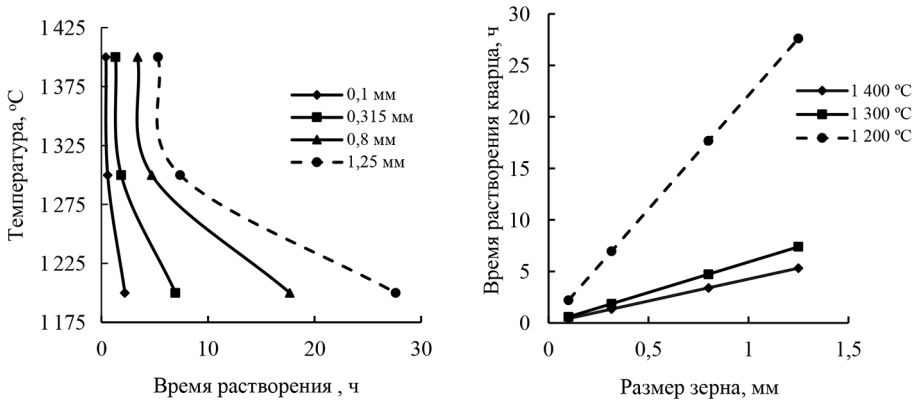

Рис. 8. Время растворения зерен кремнезема в силикатном расплаве в зависимости от температуры варки и размера зерна

Fig. 8. Dissolution time of silica grains in silicate melt depending on the melting temperature and grain size

на время растворения кремнезема, скорость процесса оказывает толщина диффузионного слоя. В условиях естественной конвекции (без перемешивания), когда расплав движется относительно растворяющихся частиц за счет разности плотностей образующегося расплава и стекломассы (растворителя), скорость процесса растворения может лимитироваться только диффузией оксида кремния из приповерхностного слоя частиц кремнезема в объем расплава, тем самым оказывая непосредственное и самое сильное влияние на процесс растворения.

Заключение. При использовании электронной микроскопии и электронно-зондового микроанализа получены сведения о влиянии температурно-временных режимов термической обработки на размеры зерен остаточного кремнезема и степень однородности стеклорасплава на стадии стеклообразования. Установлено, что величина диффузионного слоя определяется температурой термообработки: для температуры 1 200 °С толщина слоя составляет 60–75 мкм, для 1 300 °С – 40–50 мкм, для 1 400 °С – 25–30 мкм.

Результаты исследования методом электронной микроскопии и рентгеноспектрального анализа являются экспериментальным основанием для расчета скорости процесса растворения тугоплавких кристаллических фаз. Расчетные данные показывают, что при температурах до 1 200 °С время растворения достаточно большое: для зерна кремнезема размером 0,315 мм – до 6,96 ч; 0,8 мм – до 17,68 ч; 1,25 мм – до 27,62 ч. Время растворения кремнезема при температуре 1 400 °С составляет для частиц размером 0,1–0,315 мм до 1,34 ч; 0,315–0,8 мм – до 3,41 ч; 0,8–1,25 мм – до 5,32 ч.

Таким образом, с увеличением температуры обработки от 1 200 до 1 400 °С время растворения частиц кремнезема независимо от их размера снижается в 5,2 раза. В этой связи за счет повышения максимальной температуры варки от 1 550 до 1 600 °С в высокопроизводительных стекловаренных печах представляется возможным использовать кварцевый песок с расширенным фракционным составом, в том числе включающим зерна размером 0,8–1,25 мм.

Список использованных источников

1. Технология стекла. Справочные материалы / под ред. П. Д. Саркисова, В. Е. Маневича, В. Ф. Солинова, К. Ю. Субботина. – М. : РХТУ, 2012. – 647 с.

2. Маневич, В. Е. Сырьевые материалы, шихта и стекловарение / В. Е. Маневич, К. Ю. Субботин, В. В. Ефремов. – М. : РИФ «Стройматериалы», 2008. – 224 с.

3. Панкова, Н. А. Стекольная шихта и практика ее приготовления / Н. А. Панкова, Н. Ю. Михайленко. – М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 1997. – 80 с.

4. Власова, С. Г. Основы химической технологии стекла / С. Г. Власова. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2013. – 108 с.

5. Uusitalo, Ol. Float Glass Innovation in the Flat Glass Industry / Ol. Uusitalo. – New York : Springer Cham Heidelberg, 2014. – 109 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06829-9

6. Kamihori, T. Primary Fabrication of Flat Glass / T. Kamihori // Encyclopedia of Glass Science, Technology, History, and Culture / ed. P. Richet, R. Conradt, A. Takada, J. Dyon. – New Jersey : John Wiley & Sons Inc., 2021. – P. 67–80. https://doi.org/10.1002/9781118801017.ch1.4

7. Терещенко, И. М. Технология листового стекла / И. М. Терещенко. – Мн. : БГТУ, 2009. – 360 с.

8. Verheijen, O. S. Mathieu Hubert. Batch Chemistry and Reactions / O. S. Verheijen, M. Hubert // Handbook of Glass / eds: J. D. Musgraves, J. Hu, L. Calvez. – Springer : Cham, Switzerland, 2019. – P. 1231–1256. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93728-1_35

9. Le Bourhis, E. Glass. Mechanics and Technology / E. Le Bourhis. – Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2014. – 383 p. https://doi.org/10.1002/9783527617029

10. Гулоян, Ю. А. Технология стекла и стеклоизделий / Ю. А. Гулоян. – Владимир : Транзит-ИКС, 2015. – 712 с.

11. Hujová, M. Influence of fining agents on glass melting / M. Hujová, M. Vernerová // Ceramics – Silikáty. – 2017. – Vol. 61, № 2. – P. 119–126. https://doi.org/10.13168/cs.2017.0017

12. Cluster formation of silica particles in glass batches during melting / M. J. Schweiger, P. Hrma, C. J. Humrickhouse [et al.] // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2010. – Vol. 356, № 25–27. – P. 1359–1367. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2010.04.009

13. Conversion of batch to molten glass, II: Dissolution of quartz particles / P. Hrma, J. Marcial, K. J. Swearingen [et al.] // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2011. – Vol. 357, № 3. – P. 820–828. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2010.11.096

14. Ten, B. Ya. Diffusion Mass Exchange in Dissolving Silica in Na_2O–SiO_2 Melts / B. Ya. Ten // Glass and Ceramics. – 2004. – Vol. 61, № 3–4. – P. 70–72. https://doi.org/10.1023/b:glac.0000034049.94187.bb

15. Ten, B. Ya. Calculation of SiO_2 Diffusion Coefficients Based on Kinetic Curves of Silica Grain Dissolution / B. Ya. Ten // Glass and Ceramics. – 2004. – Vol. 61, № 3–4. – P. 111–113. https://doi.org/10.1023/b:glac.0000034061.78803.a4

16. Ten, B. Ya. Generalized Universal Calculation of SiO_2 Diffusion Coefficients in Melts of the Na_2O–SiO_2 System / B. Ya. Ten // Glass and ceramics. – 2004. – Vol. 61, № 9–10. – P. 288–290. https://doi.org/10.1023/b:glac.0000048692.35038.cc

17. Лобанов, М. Л. Методы определения коэффициентов диффузии / М. Л. Лобанов, М. А. Зорина – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 100 с.

References

1. Sarkisov P. D., Manevich V. E., Solinov V. F., Subbotin K. Yu. (eds). *Glass Technology.* Moscow, Mendeleev University of chemical technology Publ., 2012. 647 p. (in Russian).

2. Manevich V. E., Subbotin K. Yu., Efremov V. V. *Raw materials, batch and glassmaking.* Moscow, Stroymaterialy Publ., 2008. 224 p. (in Russian).

3. Pankova N. A., Mikhaylenko N. Yu. *Glass batch and practice of its preparation*. Moscow, Mendeleev University of Chemical Technology Publ., 1997. 80 p. (in Russian).

4. Vlasova S. G. *Fundamentals of chemical glass technology.* Ekaterinburg, Ural University Publ., 2013. 108 p. (in Russian).

5. Uusitalo Ol. *Float Glass Innovation in the Flat Glass Industry.* New York, Springer Cham Heidelberg, 2014. 109 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06829-9

6. Kamihori T. Primary Fabrication of Flat Glass. Richet P., Conradt R., Takada A., Dyon J. (eds.). *Encyclopedia of Glass Science, Technology, History, and Culture*. New Jersey : John Wiley & Sons Inc., 2021, pp. 67–80. https://doi.org/10.1002/9781118801017.ch1.4

7. Tereshchenko I. M. *Technology of flat glass.* Minsk, BSTU Publ., 2009. 360 p. (in Russian).

8. Verheijen O. S., Hubert M. Batch Chemistry and Reactions. Musgraves J. D., Hu J., Calvez L. (eds). *Handbook of Glass.* Springer, Cham, Switzerland, 2019, pp. 1231–1256. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93728-1_35

9. Le Bourhis E. *Glass. Mechanics and Technology.* Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2014. 383 p. https://doi.org/10.1002/9783527617029

10. Guloyan Yu. A. *Technology of glass and glass products.* Vladimir, Tranzit-IKS Publ., 2015. 712 p. (in Russian).

11. Hujová M., Vernerová M. Influence of fining agents on glass melting. *Ceramics – Silikáty*, 2017, vol. 61, no. 2, pp. 119–126. https://doi.org/10.13168/cs.2017.0017

12. Schweiger M. J., Hrma P., Humrickhouse C. J., Marcial J., Riley B. J., TeGrotenhuis N. E. Cluster formation of silica particles in glass batches during melting. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2010, vol. 356, no. 25–27, pp. 1359–1367. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2010.04.009

13. Hrma P., Marcial J., Swearingen K. J., Henager S. H., Schweiger M. J., TeGrotenhuis N. E. Conversion of batch to molten glass, II: Dissolution of quartz particles. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2011, vol. 357, no. 3, pp. 820–828. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2010.11.096

14. Ten B. Ya. Diffusion Mass Exchange in Dissolving Silica in Na_2O–SiO_2. Melts. *Glass and Ceramics*, 2004, vol. 61, no. 3–4, pp. 70–72. https://doi.org/10.1023/b:glac.0000034049.94187.bb

15. Ten B. Ya. Calculation of SiO_2 Diffusion Coefficients Based on Kinetic Curves of Silica Grain Dissolution. *Glass and Ceramics*, 2004, Vol. 61, no. 3–4, pp. 111–113. https://doi.org/10.1023/b:glac.0000034061.78803.a4

16. Ten B. Ya. Generalized Universal Calculation of SiO_2 Diffusion Coefficients in Melts of the Na_2O–SiO_2 System. *Glass and Ceramics*, 2004, vol. 61, no. 9–10, pp. 288–290. https://doi.org/10.1023/b:glac.0000048692.35038.cc

17. Lobanov M. L., Zorina M. A. *Methods for determining diffusion coefficients.* Ekaterinburg, Ural University Publ., 2017. 100 p. (in Russian).

Информация об авторах

Гречуха Сергей Петрович – главный технолог. ОАО «Гомельстекло» (ул. Михаила Ломоносова, 25, 246030, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: spgrechuha@yandex.ru

Павлюкевич Юрий Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pavliukevitch.yura@yandex.ru, pauliukevich@belstu.by

Папко Людмила Федоровна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: papko@belstu.by

Трусова Екатерина Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент кафедры. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: trusova@belstu.by

Кравчук Александр Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kravchuk@belstu.by

Information about the authors

Grechuha Sergey P. – Chief Technologist. JSC “Gomelglass” (25, Mikhail Lomonosov Str., 246030, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: spgrechuha@yandex.ru

Pavlyukevich Yuri G. – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of Department. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pavliukevitch.yura@yandex.ru, pauliukevich@-belstu.by

Papko Ludmila F. – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: papko@belstu.by

Trusova Ekaterina E. – Ph. D. (Engineering), Associate Professor of Department. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: trusova@belstu.by

Kravchuk Aleksandr P. – Ph. D. (Engineering), Associate Professor of Department. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kravchuk@belstu.by