УДК 536.491: 691.311

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАВЛЕНИЯ ЧАСТИЦЫ КВАРЦА В СИЛИКАТНОМ РАСПЛАВЕ БЕЗ УЧЕТА ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

NUMERICAL RESEARCH OF MELTING OF THE PARTICLE OF QUARTZ IN SILICATE FUSION WITHOUT PHASE TRANSITIONS

©Шеховцов В. В. Томский государственный архитектурно-строительный университет г. Томск, Россия, shehovcov2010@yandex.ru ©Shekhotsov V. Tomsk State University of Architecture and Building Tomsk, Russia, shehovcov2010@yandex.ru ©Волокитин О. Г. канд. техн. наук Томский государственный архитектурно-строительный университет г. Томск, Россия, volokitin oleg@mail.ru ©Volokitin O. PhD Tomsk State University of Architecture and Building Tomsk, Russia, volokitin_oleg@mail.ru ©Кузьмин В. И. канд. техн. наук Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН г. Новосибирск, Россия, vikuzmin57@mail.ru ©Kuzmin V. PhD Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics Novosibirsk, Russia, vikuzmin57@mail.ru

Аннотация. Рассмотрен процесс плавления частицы кварца в силикатном расплаве. Математически смоделированы этапы плавления частицы кварца в экспериментальной электроплазменной установке. Определен оптимальный размер и время полного расплавления частицы кварца в силикатном расплаве.

Abstract. Considered quartz particles melting process in the silicate melt. Mathematically modeled stages of melting quartz particles in the experimental Electrical plasma unit. The optimum size and time complete melting of quartz particles in the silicate melt.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, электроплазменная установка, частица кварца, высоко кремнеземистый расплав, математическая модель, теплообмен.

Keywords: low-temperature plasma, Electrical plasma unit, quartz particles, highly siliceous melt, mathematical model, heat transfer.

Высокие температуры плавления исходного сырья (кварцевый песок) определяют использование энергии плазмы для получения однородного по температуре и вязкости силикатного расплава. Плазменная технология получения силикатных расплавов основана на взаимодействии высококонцентрированных потоков плазмы с силикатным материалом. Предполагается, что процесс плавления частиц осуществляется в электроплазменной установке для получения силикатных расплавов [1–2]. Физические процессы, которые протекают при плавлении силикатных материалов сложны и многообразны [9]. Однако в рамках упрощенных моделей существует возможность произвести оценку времени полного расплавления частиц при внедрении их в высокотемпературную среду. Разработанная система подачи порошкообразного сырьевого материала в плазмохимический реактор обеспечивает внедрение силикатных частиц непосредственно в расплав. Процесс расплавления сырьевых материалов сводится к двум этапам. Потоки плазмы на первом этапе прогревают частицы до температуры плавления, а после расплавления нагревают получившийся расплав до стационарной температуры [3–5]. После заполнения объема реактора расплавом, частицы кварца подаются сразу в расплав, нагреваются за счет теплообмена с расплавом, обеспечивая непрерывность процесса плавления. Актуальным является установление оптимального размера и времени полного расплавления частиц кварца, что обеспечит бесперебойную работу плазмохимического реактора и выработку на основе кварцевого песка силикатного расплава с требуемыми значениями температуры и вязкости.

Целью расчетов являлось определение зависимости времени разогрева и плавления частицы от ее начального радиуса.

Начальные условия:

Температура расплава Tsr = Tras = 2123 К. При расчетах полагалось, что изначально нагреву подвергался песок, состоящий из α – кварца.

Температура плавления равна Tpl = 1713 C;

Удельная теплоемкость песка cch = 743 Дж/кг;

Плотность песка $\rho ch = 2230 \text{ кг/м3};$

Начальная температура песка $T_b = 300 K$,

Удельная теплота плавления песка $q_{pl} = 160000 \ \square m/\kappa c;$

Коэффициент теплопроводности расплава, окружающего частицу песка $\lambda_{sr} = 1,38 \ Bm/m/cek$.

Методика расчета:

Значение числа Нуссельта в расчетах полагалось равным единице, *Nu* = 1. Расчеты времени разогрева и плавления частицы проводились без учета влияния изменения радиуса частицы в процессе плавления на величину коэффициента теплообмена α.

Коэффициент теплообмена α определяется через число Нуссельта [6-7]:

$$\alpha = \frac{\lambda_{sr} N u}{r_{ch}}.$$

При отсутствии конвективного течения вокруг частицы число Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha r_{ch}}{\lambda_{sr}} = 1.$$

Предполагая, что расплавившаяся часть частицы остается на ее поверхности в виде шарового слоя, и пренебрегая изменением удельного объема вещества при плавлении, для определения коэффициента теплообмена а принимаем формулу

$$\alpha = \frac{\lambda_{sr} Nu}{r_{ch,0}}.$$
В этом случае время плавления: $t_2 = \frac{q_{pl} \rho_{ch} V_{ch}}{\alpha S_{ch} (T_{sr} - T_{pl})} + t_1$ [8].

Результаты и их обсуждение:

На Рисунке 1 представлен график изменения температуры частицы радиусом $r_{ch,0}=10^{-3}$ м во времени.



Рисунок 1. Профиль температуры частицы во времени для $r_{ch,0} = 10^{-3}$ м.

Участок кривой от t = 0 до $t = t_1$ (Рисунок 1) соответствует нагреву частиц до температуры плавления. Участок от $t = t_1$ до $t = t_2$ соответствует расплавлению частицы. Участок от $t = t_2$ соответствует дальнейшему разогреву расплава от температуры плавления до температуры расплава $T_{sr} = T_{ras} = 2123 K$.

На Рисунке 2 представлена зависимость времени расплавления $\Delta t_{21} = t_2 - t_1$ от радиуса частицы. На Рисунке 3 представлена зависимость времени t_2 от радиуса частицы. Результаты расчета Δt_{21} и t_2 также представлены в Таблице.



Рисунок 2. Зависимость Δt_{21} от начального радиуса частиц $r_{0,ch}$



Рисунок 3. Зависимость времени плавления t₂ от начального радиуса частиц r_{0,ch}

Таблица

$r_{ch,0}, M$	10-6	2.10^{-6}	5.10.6	2.10-5	5·10 ⁻⁵	10-4	2.10^{-4}	5.104	10-3	
$\Delta t_{21}, c$	6,8.10-7	2,7.10-6	1,7.10-5	2,7.10-4	1,7.10-3	6,8·10 ⁻³	2,7.10-2	0,17	0,68	
<i>t</i> ₂ , <i>c</i>	1,7.10.6	7.10.6	4,4·10 ⁻⁵	7.104	4,4·10 ⁻³	1,7.10-2	0,07	0,44	1,75	

ЗАВИСИМОСТЬ ДТ12 И ВРЕМЕНИ ПЛАВЛЕНИЯ Т2 ОТ РАЛИУСА ЧАСТИЦЫ

По результатам, проведенного математического моделирования и расчета расплавления частицы кварца в электроплазменной установке получены зависимости времени,

необходимого для полного расплавления частицы от ее размера. Определен оптимальный размер частиц кварца, необходимый для качественной работы плазмохимического реактора. Расчеты показывают, что частицы размером 2 мм (радиусом 1 мм) полностью расплавляются за время 1,7 с, что обеспечивает выработку однородного по температуре и химическому составу силикатного расплава на основе кварцевого песка и исключает процесс кипения расплава с выделением газовой фазы.

Список литературы:

1. Пат. 2503628 Российская Федерация. С03 В37/04. Плазменная установка для получения тугоплавкого силикатного расплава / О. Г. Волокитин, Е. В. Тимонов, Г. Г. Волокитин, А. А. Никифоров, В. К. Чибирков. Опубл. 10.01.2014, Бюл. №1.

2. Волокитин Г. Г. Скрипникова Н. К., Волокитин О. Г., Шеховцов В. В. Электродуговые и электроплазменные устройства для переработки силикатсодержащих отходов // Известия ВУЗов. Физика. Январь 2014. №3/3. С. 114–119.

3. Vlasov V. A., Volokitin O. G., Volokitin G. G., Skripnikova N. K., Shekhovtsov V. V. Calculation of the melting process of a quartz particle under low-temperature plasma conditions. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2016, v. 89, no. 1, January.

4. Щедровицкий Я. С. Высококремнистые ферросплавы. Свердловск: Свердловск. отд. ГНТИ Лит. по черн. и цвет. мет., 1961. 256 с.

5. Айлер Р. Химия кремнезема, пер. с англ., т. 1–2, М., 1982. 712 с.

6. Калиткин Н. Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.

7. Миньков С. Л., Миньков Л. Л. Основы численных методов: учебное пособие. Томск: Изд-во НТЛ, 2006. 260 с.

8. Справочник по теплообменникам. В двух томах. Т.1. М.: Энергоатомиздат, 1987. 560 с.

9. Безносюк С. А., Потекаев А. И., Жуковский М. С., Жуковская Т. М., Фомина Л. В. Многоуровневое строение, физико-химические и информационные свойства вещества. Томск, 2005. 264 с.

References:

1. Pat. 2503628 Rossiiskaya Federatsiya. C03 B37/04. Plazmennaya ustanovka dlya polucheniya tugoplavkogo silikatnogo rasplava / O. G. Volokitin, E. V. Timonov, G. G. Volokitin, A. A. Nikiforov, V. K. Chibirkov. Opubl. 10.01.2014, Byul. № 1.

2. Volokytin G. G. Arc and elektroplazmennye device for processing waste silicate / G. G. Volokytin, N. K. Skripnikova, O. G. Volokytin, V. V. Shekhovtsov // Proceedings of the universities. Physics. January 2014. № 3/3. Pp. 114-119.

3. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 89, No. 1, January, 2016, Calculation of the melting process of a quartz particle under low-temperature plasma conditions. V. A. Vlasov, O. G. Volokitin, G. G. Volokitin, N. K. Skripnikova, and V. V. Shekhovtsov.

4. Schedrovitsky Y.S. Vysokokremnistyh ferroalloys. Sverdlovsk Sverdlovsk. Dep. Lit GNTI. on black. and color. meth, 1961. 256 p.

5. Ayler R. Silica chemistry, trans. from English. vols. 1-2, Moscow, 1982. 712 p.

6. Kalitkin N.N. Numerical methods. M.: Nauka, 1978 G. 512 p.

7. Minkov S. L., Minkov L. L. Fundamentals of numerical methods: the manual. Tomsk: Publishing house of the YTL, 2006. 260 p.

8. Guide to the heat exchangers. In two volumes. V. 1. M.: Energoatomisdat 1987. 560 p.

9. Beznosyuk S. A., Potekaev A. I., Zhukovsky M. S., Zhukovsky T. M., Fomina L. V. Multilevel structure, physico-chemical properties of the substance and information. Tomsk, 2005. 264 p.

Работа поступила в редакцию 12.04.2016 г.

Принята к публикации 17.04.2016 г.