

$$+ \int_{r_{\text{подв}}}^1 \xi[(B-1)\xi + 1]T^*(\xi, \tau^*)d\xi \quad (8)$$

при $r_{\text{подв}}^* = 0$

$$\tau_{\text{полн}} = \frac{1}{1 - T_{r_{\text{подв}}}^*(r_{\text{подв}}^*, \tau^*)} \left[\frac{\alpha(1+2B)}{6} + \int_0^1 \xi[(B-1)\xi + 1]T^*(\xi, \tau^*)d\xi \right]$$

Эта зависимость справедлива при условии, что температура на поверхности испарения влаги не достигает температуры разложения материала, а максимальное время полного высыхания частицы достигается при постоянной температуре среды. Температура испарения влаги зависит от давления пара P_n в слое материала [2]

$$T_{r_{\text{подв}}} (r_{\text{подв}}, \tau) = 83 + 16,6 \cdot 10^{-5} P_n$$

Данные расчета показывают, что на границе раздела влажной и сухой зон материала возникает избыточное давление пара ($P_n = 1 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^5$ Па) с соответствующим повышением температуры кипения воды. Поверхностную скорость \bar{v} перехода воды в виде пара из влажной в сухую зону материала можно выразить зависимостью

$$\bar{v} = - \frac{\rho_{\text{H}_2\text{O}} K K_{\text{отн}}}{\mu} \frac{d\psi}{dr}$$

где $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ — плотность воды или пара, кг/м³;
 K — проницаемость воды или пара, м²;
 $K_{\text{отн}}$ — относительная проницаемость жидкости;
 μ — динамическая вязкость воды или пара, Па·с;
 ψ — жидкостный потенциал;

ал; $\psi = \frac{P}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} + r$.
 Скорость перехода массы воды из влажной зоны в сухую

$$\bar{v}_n = - \frac{\rho_n K_n}{\mu_n} \frac{dP_n}{dr}$$

В данной постановке задача сводится к решению следующих уравнений для сухой зоны:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{\rho_n K_n}{\mu_n} \frac{dP_n(r, \tau)}{dr} \right] = 0;$$

$$\rho_n = \frac{P_n}{R_n T}, \quad (9)$$

где R_n — газовая постоянная, кДж/(кг·К).

Граничные условия:
 при $r = r_k$, $P_n(r_k, \tau) = P_0$; (10)

при $r = r_{\text{подв}}$ уравнение сохранения массы принимает вид

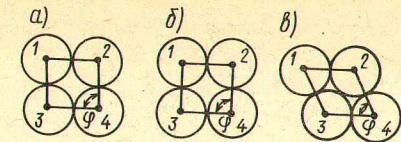


Рис. 2. Укладка гранул

a — общий вид; б — кубическая, $\varphi=90^\circ$;
 в — гексагональная, $\varphi=60^\circ$

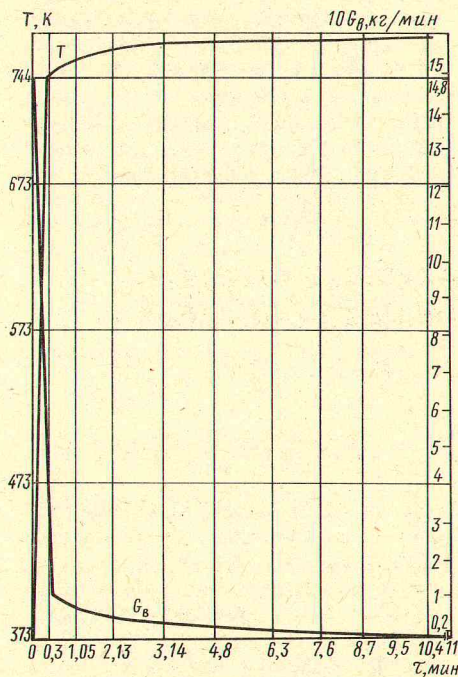


Рис. 3. Изменение во времени температуры поверхности T слоя и влаги G_v , испаряемой с поверхности слоя

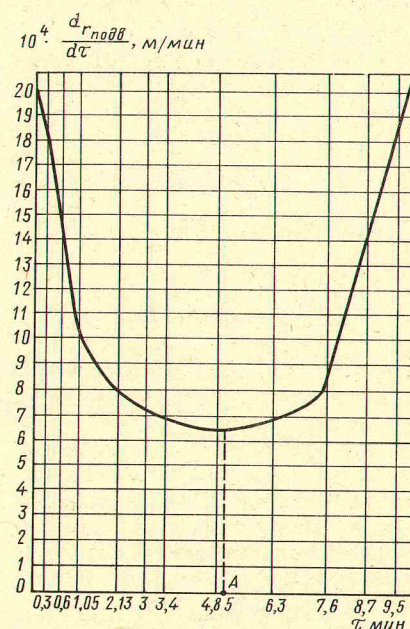


Рис. 4. Изменение во времени скорости движения границ испарения $d r_{\text{подв}} / dt$ влажного слоя

$$\frac{K_n \rho_n}{\mu_n} \frac{dP_n(r_{\text{подв}}, \tau)}{dr} = P_n V_n = \rho \frac{dr_{\text{подв}}}{d\tau} \quad (11)$$

Обычно относительное изменение температуры пара в общем виде $\Delta T/T$ гораздо меньше изменения давления $\Delta P/P$ при граничных условиях (9) — (11)

$$P_n(r_{\text{подв}}, \tau) = \sqrt{P_0^2 + \frac{2r_k(1-r_{\text{подв}}^*)\rho_n R_n T_0}{K_n/\mu_n} \frac{dr_{\text{подв}}}{d\tau}}$$

где P_0 — начальное давление пара (атмосферное давление);
 K_n , ρ_n , μ_n и R_n — соответственно проницаемость, плотность, вязкость и газовая постоянная пара;
 $T_0 = T_{r_{\text{подв}}} (r_k, \tau)$ — начальная температура испарения на поверхности материала.

Проницаемость пара в слое материала можно определить по формуле Казена — Кармена

$$K_n = \frac{(2r_k)^2}{180} \frac{m^3}{(1-m)^2}$$

где m — пористость материала, сферические частицы которого могут быть уложены различным способом [3].

Величина и форма пор зависит от вида укладки гранул. Угол φ (рис. 2) изменяется от 90 до 60°. При кубической укладке $m = 47,64\%$, гексагональной — $m = 25,95\%$. Пористость такой среды не зависит от диаметра частиц, а определяется только видом укладки, т. е. величиной φ .

Результаты расчета приведены на рис. 3 и 4, анализ которых позволяет сделать следующие выводы о механизме сушки сырьевых материалов. Процесс протекает в три стадии.

На первой стадии происходит быстрое повышение температуры поверхности слоя (материала), идет интенсивное испарение влаги с поверхности и прилегающих к ней слоев. При этом скорость движения границы испарения максимальна.

На второй стадии градиент температур по толщине слоя уменьшается, скорость перемещения границы резко снижается и процесс испарения замедляется.

На третьей стадии снова возрастает скорость перемещения движения границы испарения к центру

слоя и происходит постепенное уменьшение влажности слоя (материала).

Теоретическое время завершения процесса сушки сырьевых материалов (доломита, известняка), определенное при моделировании, составляет примерно 5 мин (точка А на рис. 4), что значительно меньше времени сушки в заводских

условиях (примерно 20 мин). Это свидетельствует о том, что имеются значительные резервы интенсификации данного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эль Десуки Мохамед Мохамед. Промышленная котельная на водо-

угольной суспензии: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 1988. — 16 с.
 2. Гринчик Н. Н. Тепломассоперенос в капиллярно-пористых средах при интенсивном парообразовании с учетом движущего фронта испарения // Теория и техника сушки влажных материалов. — Минск, 1979. — С. 45—49.
 3. Лыков А. В. Теоретические основы строительной теплофизики. — Минск, Изд-во АН БССР, 1961. — 519 с.

УДК 666.263.2

Н. М. БОБКОВА, Л. М. СИЛИЧ

Белорусский технологический институт им. С. М. Кирова

Закономерности формирования твердых растворов ситаллов стронциево-бариевой системы

В целях получения жаропрочных ситаллов, обладающих высокими механическими и диэлектрическими характеристиками и пониженным ТКЛР, были проведены исследования по синтезу ситаллов бесщелочной стронциево-бариевой системы SrO—BaO—Al₂O₃—TiO₂—SiO₂. Интерес к этой системе обусловлен высокими характеристиками основных кристаллических фаз стронциевого анортита SrAl₂Si₂O₈ (температура плавления — 1765 °С, ТКЛР — 40·10⁻⁷ К⁻¹) и цельзиана (1640 °С, 27·10⁻⁷ К⁻¹).

Ситаллы, которые были получены ранее на основе стронциевого анортита [1], обладают высокой жаропрочностью, повышенной износостойкостью и механической прочностью, однако уступают цельзиановым по диэлектрическим характеристикам. Цельзиановые ситаллы наряду с высокой стабильностью частотных и температурных зависимостей диэлектрических потерь имеют относительно низкую механическую прочность.

Поскольку ионы Sr²⁺ и Ba²⁺ обладают всеми основными критериями, определяющими образование твердых растворов замещения, а именно: близостью ионных радиусов (~15%), однотипностью химической связи с кислородом, малым различием величины электроотрицательности (по Полингу: Sr — 1,0, Ba — 0,9) и т. п., естественным было предположить возможность образования непрерывного ряда твердых растворов между стронциевым анортитом и цельзианом при получении ситаллов стронциево-бариевой системы.

Н. А. Сиражиддиновым с соавторами [2], проводившим исследование в системе SrAl₂Si₂O₈—BaAl₂Si₂O₈, были получены устойчивые в низкотемпературной области твердые растворы на основе гексагональных форм стронциевого анортита и цельзиана. Однако, поскольку обе эти фазы имеют ряд полиморфных форм (как низко-, так и высокосимметричных), можно было ожидать, что при высоких температурах возможности образования твердых растворов между ними будут ограничены.

Для установления закономерностей фазообразования в стронциево-бариевой системе было синтезировано пять серий стекол — от чисто стронциевых до чисто бариевых, содержащих (здесь и далее молярное содержание) 10, 15, 20 и 25% Al₂O₃, 12,5 и 15% TiO₂ и имеющих различное соотношение SrO:BaO. Стекла кристаллизовались при температуре 950—1200 °С.

Рентгенофазовый анализ чисто стронциевых и чисто бариевых составов стекол, закристаллизованных при указанных температурах, показал, что во всех случаях формируется либо триклинная форма стронциевого анортита ($d=0,324, 0,329, 0,345$ нм), либо моноклинный цельзиан ($d=0,334, 0,346, 0,326, 0,258$ нм).

В стронциево-бариевых стеклах, содержащих 10% Al₂O₃, продуктами низкотемпературной обработки (до 1100 °С) являлись различные по симметрии полиморфные модификации Sr- и Ba-полевых шпатов — триклинного стронциевого

анортита и гексагонального цельзиана. Однако при температуре обработки 1200 °С в серии стекол, содержащих 10% Al₂O₃, хотя и сохраняется характерная для этой серии многофазность (присутствие стронциевого анортита и гексагонального цельзиана) в продуктах кристаллизации, наблюдается некоторое смещение межплоскостных расстояний триклинного SrAl₂Si₂O₈ по мере увеличения в составах содержания BaO (рис. 1).

В стеклах, содержащих 15% Al₂O₃, в процессе термообработки при 1100 °С, а в стеклах с более высоким содержанием Al₂O₃ (20—25%) при еще более низких температурах (950 °С) обнаружено закономерное изменение межплоскостных расстояний как низкотемпературной формы стронциевого анортита, так и низкотемпературного цельзиана в зависимости от соотношения SrO:BaO.

В исследуемых продуктах термообработки при содержании SrO > BaO на рентгенограммах сохраняются почти все линии, характерные для триклинного стронциевого анортита. По мере увеличения в составах количества BaO межплоскостные расстояния SrAl₂Si₂O₈ претерпевают все большие изменения, выражающиеся в некотором повышении их значений. При преобладании BaO над SrO обнаруживается присутствие моноклинного цельзиана, межплоскостные расстояния последнего при этом также несколько изменены. Увеличение содержания SrO приводит к монотонному уменьшению