

Еще одно преимущество конструкции дозатора в том, что отсутствует боковое давление на частицы продукта, так как продукт имеет меньшее вертикальное перемещение. Целесообразно повысить быстродействие привода шиберной заслонки по сравнению с приводом шибера, это возможно, так как масса шиберной заслонки намного меньше массы шибера с мерными объемами.

Получены рекомендации по выбору конструкции дозатора. Итоговый вариант дозатора имеет более высокую производительность по сравнению с аналогами, устранены имеющиеся недостатки.

*V. L. Javner, I. A. Sineokova*

## **DISPENSING EQUIPMENT FOR FILLING BULK PRODUCTS WEIGHING UP TO 5 G**

*The results of technological process of filling bulk products including developing dispensing unit for filling bulk products weighing up from 0,2 to 5 g are determined. Designed circuit and constructive solutions of dispensing unit for filling bulk products. Two types of gate portioners with closed and open dimensional volume are analyzed.*

**Keywords:** Filling, packaging, sashet, bulk products, technological process, performance, algorithm of work, gate portioner.

Жавнер Виктор Леонидович — профессор кафедры «Автоматы» ГОУ ВПО «СПбГПУ», д-р техн. наук, профессор, vjavner@inbox.ru.

Синеокова Ирина Анатольевна — старший преподаватель кафедры «Теория механизмов и машин» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, sineokova\_64@mail.ru.

УДК 66-9

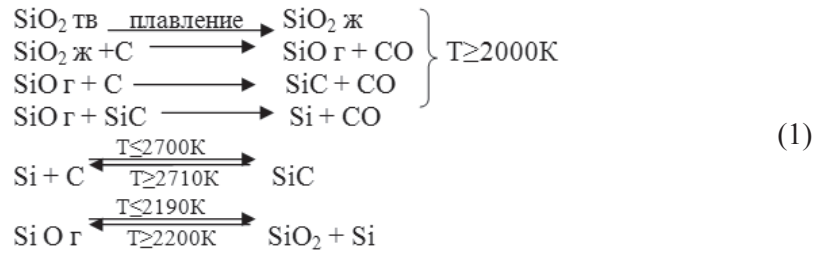
*А. М. Ветлицын, Ю. А. Ветлицын*

## **К ВОПРОСУ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА SiC КАРБИДА КРЕМНИЯ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА**

*Для надежного контроля и управления процессом плавки в автоматизированном производстве карбида кремния смоделировано эмпирическое решение формулы 3, позволяющие найти приблизительное значение температуры в центральной зоне печи сопротивления, где электрическая энергия превращается в тепловую.*

**Ключевые слова:** карбид кремния, автоматизированный контроль, плавка.

1. Промышленный способ производства SiC в печах сопротивления описывается химической схемой углетермического восстановления кремнезема [1].



2. Процессы тепло- и массопереноса в большинстве научных работ моделируются для основной химической реакции:



Описание процесса тепло- и массопереноса сводится к совместному решению уравнений теплового баланса, сохранения массы и химической кинетики, дополненных уравнениями фильтрации и состояния газа [1].

$$\begin{aligned}
 \sum c_i \rho_i \frac{\delta T}{\delta t} &= \frac{\delta}{\delta x} \left( \lambda \frac{\delta T}{\delta x} - c_{2a3} \rho v_{cp} T \right) - \frac{\rho_A^0}{(v\mu)_A} Q \frac{\delta \eta}{\delta t} \\
 \frac{\delta \rho}{\delta t} &= - \frac{\delta}{\delta x} (\rho v_{cp}) + \rho_A^0 \frac{(v\mu)_o}{(v\mu)_A} Q \frac{\delta \eta}{\delta t} \\
 \frac{\delta \eta}{\delta t} &= K(T) \times \frac{(1-\eta)^{1/3}}{R_o^{n+1} [1 - (1-\eta)^{1/3}]} \\
 v_{cp} &= k_{\phi} \frac{\delta \rho}{\delta x} \\
 \rho &= \frac{\rho}{\Pi \mu_{2a3}} RT
 \end{aligned} \quad (3)$$

С начальными и граничными условиями:

$$t = 0: T = T_o; \eta = \eta_o; \rho = \rho_o; \Pi = \Pi_o = \text{const};$$

$$x = 0: -\lambda \frac{\delta T}{\delta x} = \begin{cases} q_S(t), 0 < t \leq t_0 \\ 0, t > t_0 \end{cases}; v_{cp} = 0;$$

$$x = L: -\lambda \frac{\delta T}{\delta x} = (\infty + c_{2a3} \rho \times v)(T - T_o); v = v_{cp} \times \Pi$$

где  $\eta = (\rho_A^0 - \rho_A) / \rho_A^0$  — глубина превращения;  $c_i, \rho_i, v_i, \mu_i$  — удельные теплоемкости, плотности, стехиометрические коэффициенты и молекулярные веса исходных веществ и продуктов реакции;  $\rho_A^0$  и  $\rho_A$  — начальная и текущая концентрация вещества  $A_{\text{конд}}$ ;  $\rho, c_{2a3}, \mu_{2a3}$  — плотность, приведенные теплоемкость и молекулярный вес газа;  $\lambda$  — эффективный коэффициент теплопроводности;  $v_{cp}, k_{cp}$  — скорость и коэффициент фильтрации;  $T_S, q_S$  — температура и мощность источника тепла на поверхности нагрева;  $\rho$  — давление;  $\Pi$  — объ-

емная пористость;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $\rho_O$  — приведенный размер элементарной реакционной ячейки;

$$K(T) = \begin{cases} 0, T_S < T_{пл\ SiO_2} \\ K_0 \exp(-E / RT), T_S < T_{пл\ SiO_2} \end{cases}$$

3. Решение системы (3) вывести в общем виде, скорее всего, не возможно. Для практических целей контроля и управления процессом плавки предлагается смоделировать эмпирическое решение, рассчитывающее приблизительное значение температуры в центральной зоне печи сопротивления (где происходит основное превращения электрической энергии в тепловую).

Предположим, что на бесконечно малом интервале времени изменение температуры описывается следующим выражением:

$$d\Theta = (K_{нагр} \times m \times e^x - K_{изм} \times m \times e^y) dt \quad (4)$$

где  $K_{нагр}$  — [K/(час×кг)], функция повышения температуры печи от источников энергии;  $K_{изм}$  — [K/(час×кг)], функция изменения температуры печи под действием окружающего воздуха;  $x$  — функция, связывающая выделение энергии и возможность поглощения энергии печью;  $y$  — функция, связывающая отвод тепла в атмосферу и запас теплоты в печи;  $m$  — масса, загруженной печи, кг.

4. Применительно к технологии промышленного производства карбида кремния, используемой на ОАО «ВАЗ», предлагаются следующие выражения искомым функций:

$$X = U_2 \times I_2 / P_{ном},$$

$X = U_2 \times I_2$  — [ВА], мощность, отданная со вторичной обмотки печного трансформатора,

$P_{ном}$  — [ВА], номинальная мощность самоходной печи,

$$Y = (\Theta_{тек} - \Theta_{окр}) / (\Theta_{тек} + 273),$$

$\Theta_{тек}$  — [C], температура в печи на момент изменения,

$\Theta_{окр}$  — [C], температура окружающего печь воздуха,

$$K1_{нагр} = KL_{нагр} / (\Theta_{тек} + 273),$$

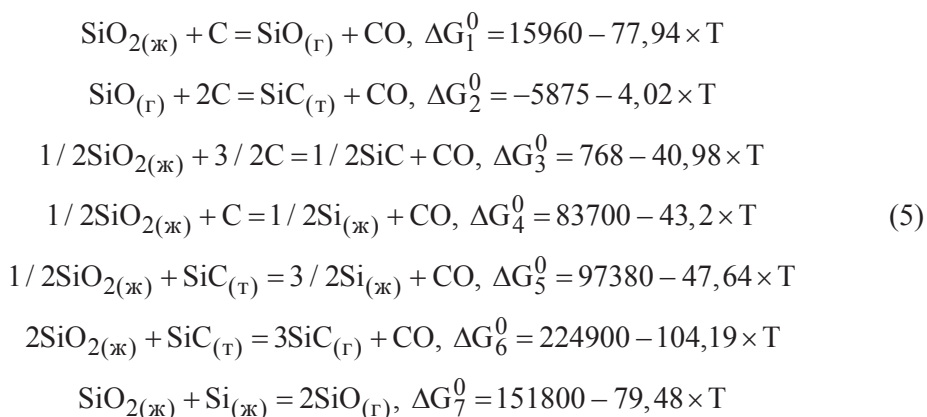
$$K1_{охл} = KL_{изм} / (\Theta_{тек} + 273),$$

$K1_{нагр} = f(m, W_{хим})$  — [K×K/(час×кг)], коэффициент нагрева, зависящий от изменения массы печи и эндотермических процессов при химических реакциях,

$K1_{охл} = f(m, W_{хим})$  — [K×K/(час×кг)], коэффициент охлаждения, зависящий от изменения массы печи и эндотермических процессов при химических реакциях.

5. Расчет температуры в центральной зоне печи выполняется при следующих допущениях:

На протяжении процесса плавки карбида кремния в печи протекают эндотермические химические реакции с отведением некоторых продуктов реакции в атмосферу [2]:



При таких условиях масса загруженной печи уменьшается, а коэффициенты  $K1_{\text{нагр}}$ ,  $K1_{\text{охл}}$ , увеличиваются, поэтому для расчета предлагается принять:

$$(m \times K1_{\text{нагр}}) = (m \times K1_{\text{охл}}) = 11000 \text{ [К} \times \text{К/час]}.$$

Из многолетней практики ОАО «ВАЗ» замечено, что оптимальная среднечасовая мощность процесса соответствует 2,6–3,2 МВА, поэтому принимаем:  $P_{\text{ном}} = 3000000 \text{ ВА}$ ;

Технологический процесс плавки начинается при окружающей температуре равной температуре воздуха, а после нескольких часов (2–3 в стандартной загрузке), газы, выделяющиеся из печи, разжигают, что приводит к повышению температуры, окружающего печь воздуха. В расчете принято, что розжиг возможен при нагреве печи до 250°C, а температура окружающего воздуха после розжига повышается на 250°C.

6. Для перехода к расчету текущей температуры учтем, что постоянная времени нагрева печи  $T_{\text{нагр}} \geq 10 \text{ час}$ . Тогда расчет температуры на конечном интервале времени, меньшем  $T_{\text{нагр}}$  можно произвести по выражению:

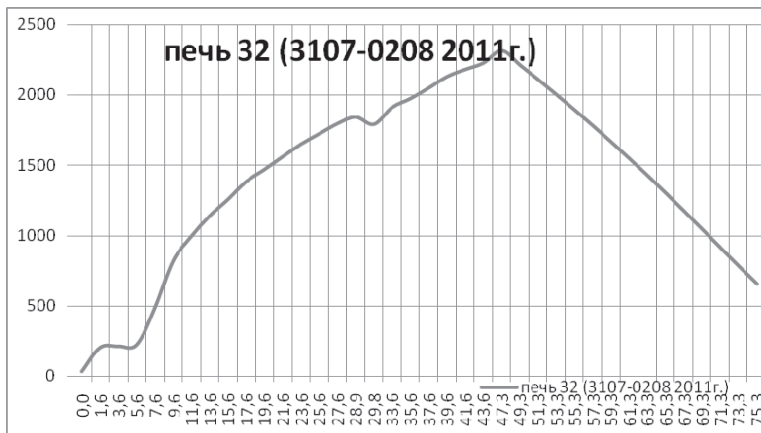
$$\begin{aligned}
\Theta_{\text{кон}} &= \Theta_{\text{нач}} + \Delta t \times 110000 \times \left( e^{u \times I / 3000000} - 1 \right) / \left( \Theta_{\text{нач}} + 273 \right) - \Delta t \times 110000 \times \\
&\times \left( e^{(\Theta_{\text{нач}} - \Theta_{\text{окр}}) / (\Theta_{\text{нач}} + 273)} - 1 \right) / \left( \Theta_{\text{нач}} + 273 \right)
\end{aligned}$$

$\Theta_{\text{нач}}$  — [°C] температура в начале временного интервала;  $\Theta_{\text{кон}}$  — [°C] температура в конце временного интервала;  $\Delta t$  — [час], расчетный интервал времени.

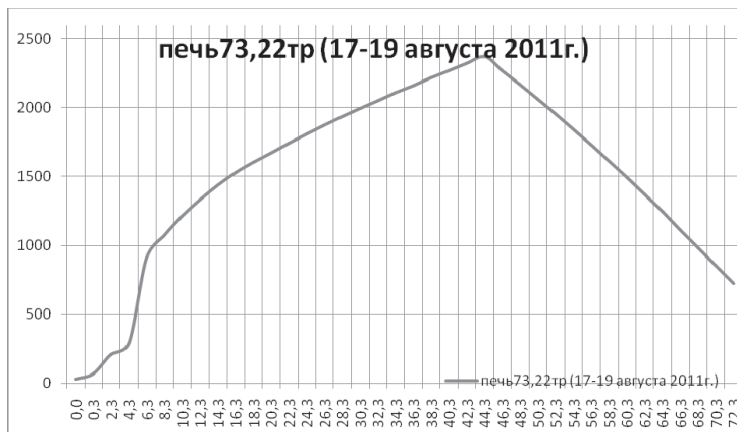
Результаты расчетов представлены графическими зависимостями расчетной температуры от времени процесса плавки. Для оценки точности расчета составлена сводная таблица результатов, где приведены результаты плавки и ориентировочные интервалы температурных диапазонов процесса.



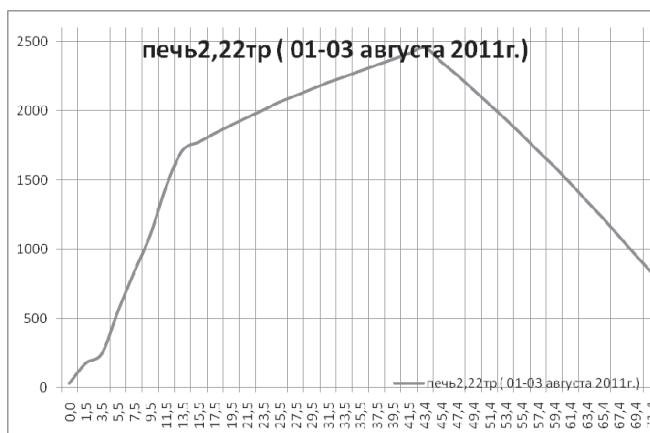
**Рис. 1.** Изменение температуры (°C) в центральной зоне печи от времени (час) плавки–охлаждения



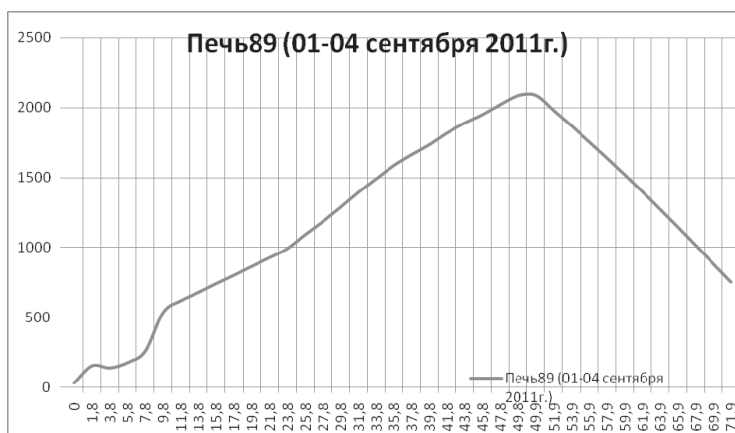
**Рис. 2.** Изменение температуры (°C) в центральной зоне печи от времени (час) плавки–охлаждения



**Рис. 3.** Изменение температуры (°C) в центральной зоне печи от времени (час) плавки–охлаждения



**Рис. 4.** Изменение температуры (°C) в центральной зоне печи от времени (час) плавки–охлаждения



**Рис. 5.** Изменение температуры (°C) в центральной зоне печи от времени (час) плавки–охлаждения

На рисунках 1–5 представлены расчетные графики  $\Theta = f(t)$  температуры в центральной зоне печи от времени процесса плавки.

Рисунок 1 — стандартная процедура плавки с поддержанием средней мощности.

Рисунок 2 — стандартная процедура плавки с поддержанием средней мощности, с паузой на удержание лимита электроэнергии.

Рисунок 3, 4 — процедура плавки с повышенной мощностью разогрева в начале процесса.

Рисунок 5 — процедура плавки с поддержанием средней мощности для печи с греющего ядра.

Процесс формирования блока SiC происходит в основном в диапазоне температур 2000–2500°K, при более высоких температурах SiC разлагается на Si и C, а при температурах более 2700°K Si и C в газообразных фракциях улетучиваются из печи [1].

Для косвенной оценки диапазона разложения SiC в табл. 1 представлены фактические результаты замеров после процессов плавки.

Таблица 1

№ печи, (особенности)	Дата плавки	Время образования блока SiC в центральной зоне, час	Время разложения блока SiC в центральной зоне, и образования блока SiC в верхних слоях, час	Графит, см × см, Исходный, Конечный, Разность (вертикально × горизонтально)
80	19–21 июля	11,5	10,3	2250 = (45 × 50) 7350 = (75 × 98) 5100
11	28–30 июля	12	10	2250 = (45 × 50) 7840 = (80 × 98) 5590
32	27–29 июля	12,7	13,5	2250 = (45 × 50) 7007 = (77 × 91) 4757
32	31 июля – 02 августа	11,1	1,5	2250 = (45 × 50) 7050 = (75 × 94) 4800
2	01–03 августа	13,2	10,2	2250 = (45 × 50) 9888 = (96 × 103) 7638
46	03–05 августа	11,9	9,9	2250 = (45 × 50) 8000 = (80 × 100) 5388
32	05–07 августа	10,4	3,5	2250 = (45 × 50) 6188 = (68 × 91) 3938
32	10–12 августа	11,3	3,7	2250 = (45 × 50) 8216 = (79 × 104) 5966
70	13–15 августа	11,2	6,1	2250 = (45 × 50) 8925 = (85 × 105) 6675
73	17–19 августа	11,3	4,4	2250 = (45 × 50) 8525 = (82 × 104) 6275
46, (CUMI)	17–19 августа	0	–	1200 = (30 × 40) 1566 = (27 × 58) 366
32	19–21 августа	11,4	3,4	2250 = (45 × 50) 8360 = (88 × 95) 6110
32	24–26 августа	11,2	3,1	2250 = (45 × 50) 6734 = (74 × 91) 4484
32	29–31 августа	10,2	7,8	2250 = (45 × 50) 5760 = (64 × 90) 3510
89, (CUMI)	01–04 сентября	5,7	–	1200 = (30 × 40) 1800 = (30 × 60) 600
32	09–11 сентября	11	5,3	2250 = (45 × 50) 7644 = (84 × 91) 5394
100, (CUMI)	09–11 сентября	0	–	1200 = (30 × 40) 3828 = (58 × 66) 1628

Времена образования и разложения SiC приблизительно определены из температурных графиков, началом образования считалась температура 2000°C, начало разложения 2300°C, на точность расчета оказывают влияние следующие факторы:

- точность измерения вторичного напряжения трансформатора ( $\pm 10\%$ );
- дискретность расчета температуры по карте электрорежима (2 часа);
- точность учета момента розжига газов ( $\pm 1$  час).

## Литература

1. Амосов С. Д. Макрокинетика углетермического восстановления кремнезема. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Черноголовка, 1986.
2. Соловейчик Э. Я., Удалов Ю. П., Лавров Б. А. Опробывание новых месторождений сырьевых материалов в производстве карбида кремния. Материалы научно-практической конференции волжского политехнического института (ВПИ), г. Волжский, Волгоградской области.

*A. M. Vetlicyn, Y. A. Vetlicyn*

### TO THE QUESTION OF THE INDUSTRIAL COMPUTER-AIDED OF SIC OF CARBIDE OF SILICON

*For reliable control and process of melting in the automated production of carbide of silicon control the empiric decision of formula is modelled 3, allowing to find an approximate value temperatures in the central area of stove of resistance, where electric energy grows into thermal.*

**Keywords:** carbide of silicon, model of empiric decision of equalization 3, automated control and process of melting of carbide of silicon control.

Ветлицын Александр Михайлович — заведующий кафедрой «Технология обработки материалов» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, канд. техн. наук, доцент.

Ветлицын Юрий Александрович — начальник базовой электротехнической лаборатории ОАО «Волжский абразивный завод».