



Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)



II Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах (CTS'2017)

КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

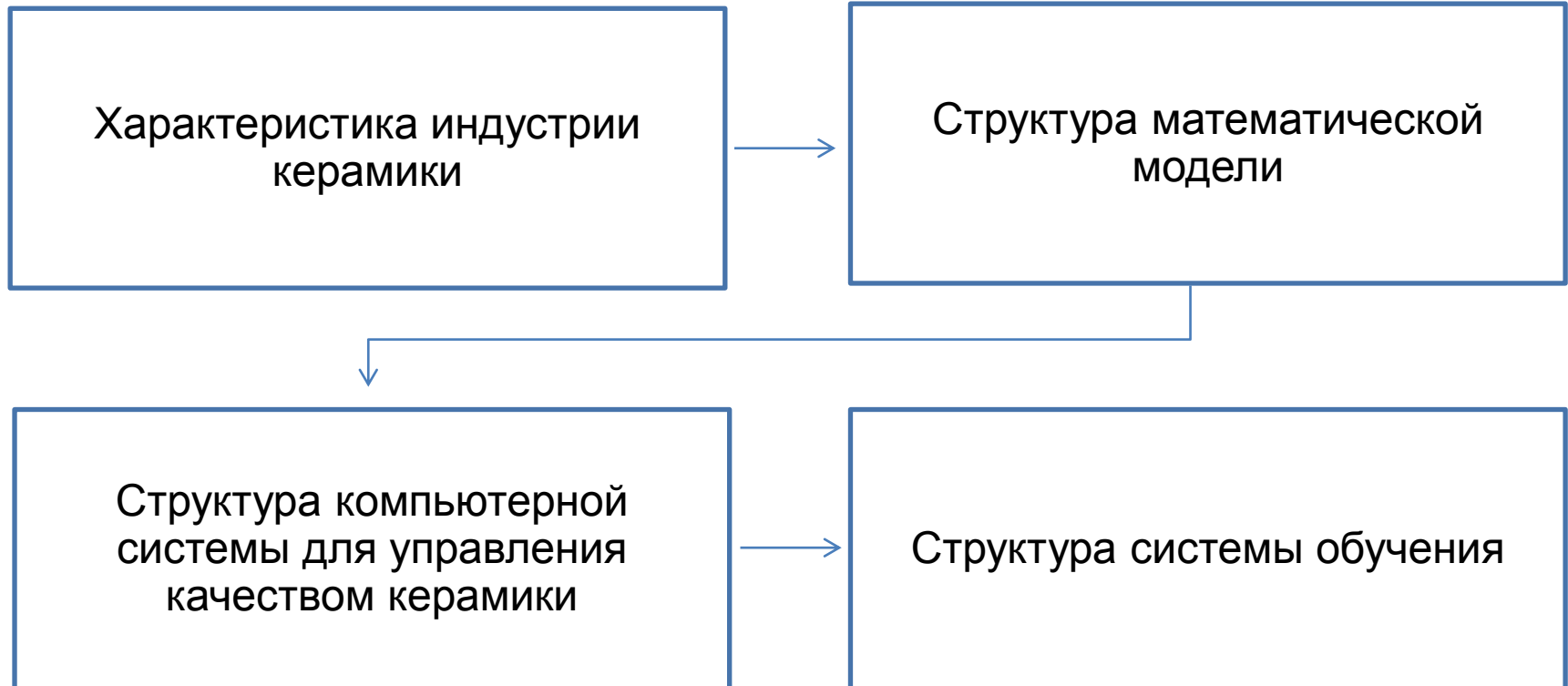
*Чистякова Тамара Балабековна,
заведующая кафедрой САПРиУ СПбГТИ(ТУ),
д-р техн. наук, проф.*

*Корниенко Иван Григорьевич,
ст. преподаватель кафедры САПРиУ СПбГТИ(ТУ),
к.т.н.*

*Новожилова Инна Васильевна,
доцент кафедры САПРиУ СПбГТИ(ТУ),
к.т.н., доц.*

Санкт-Петербург, 25 октября 2017 года

План доклада



Характеристика индустрии керамики

Индустрия инженерной керамики представлена более чем 300 международными компаниями.

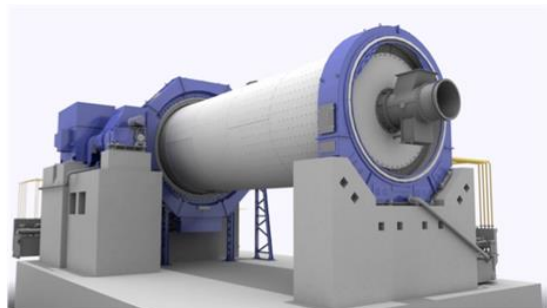
Общий оборот превышает 5 млрд. долларов США в год.

Среднегодовые темпы роста составляют около 3%.

Ассортимент высокотемпературной керамики представлен несколькими тысячами наименований.

Этапы синтеза высокотемпературной керамики

Помол



Приготовление смеси



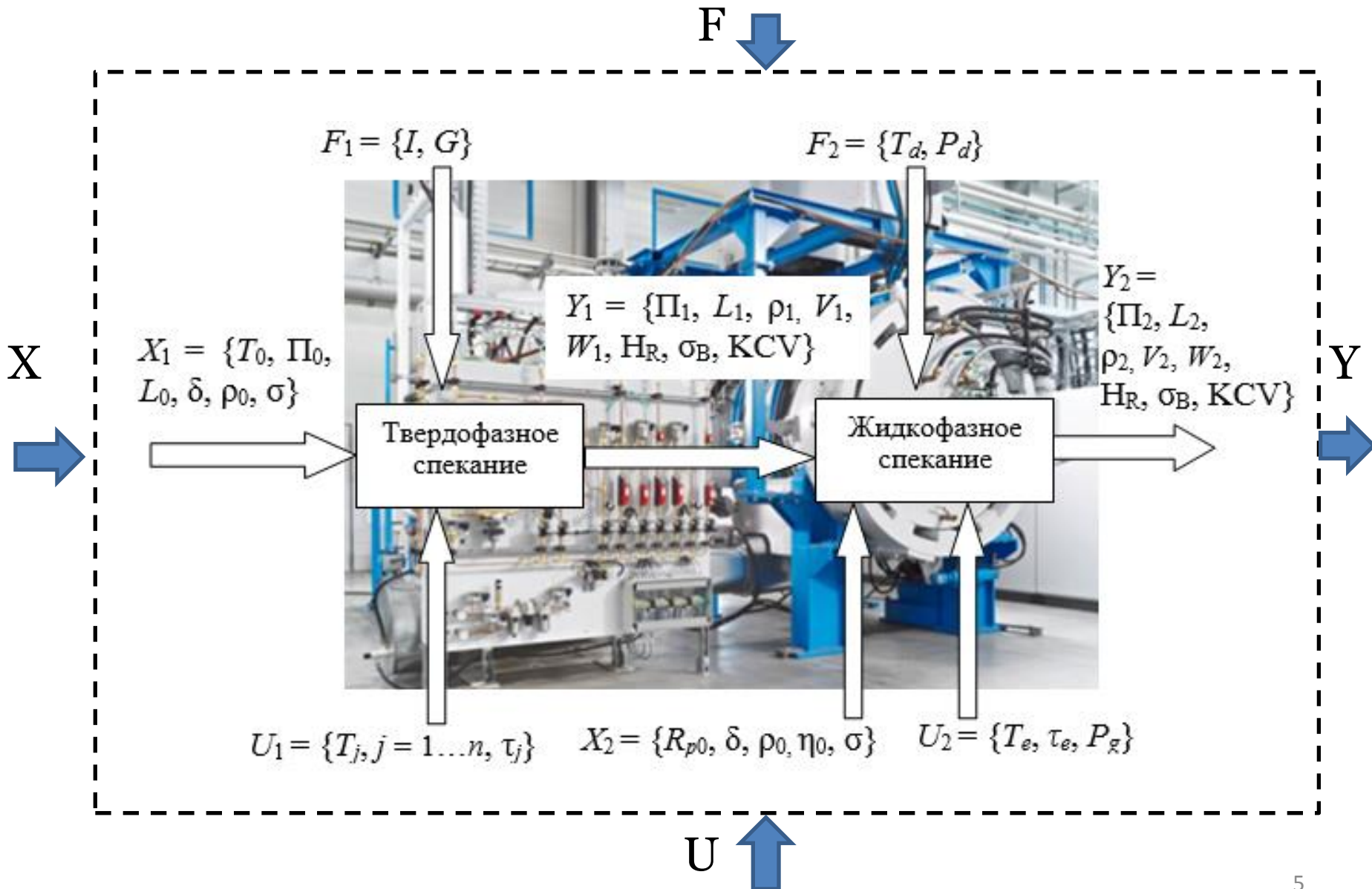
Спекание



Формование



Формализованное описание процесса спекания



Постановка задачи управления качеством продукции

Выбрать значения управляющих воздействий

$$U = \{T_j, j = 1 \dots n, \tau_j, T_e, \tau_e, P_g\},$$

в диапазонах $U^{min} \leq U \leq U^{max}$ определяемых характеристиками оборудования,

которые при действующих возмущениях

$$F = \{I, G, T_d, P_d\}$$

для заданных свойств материала

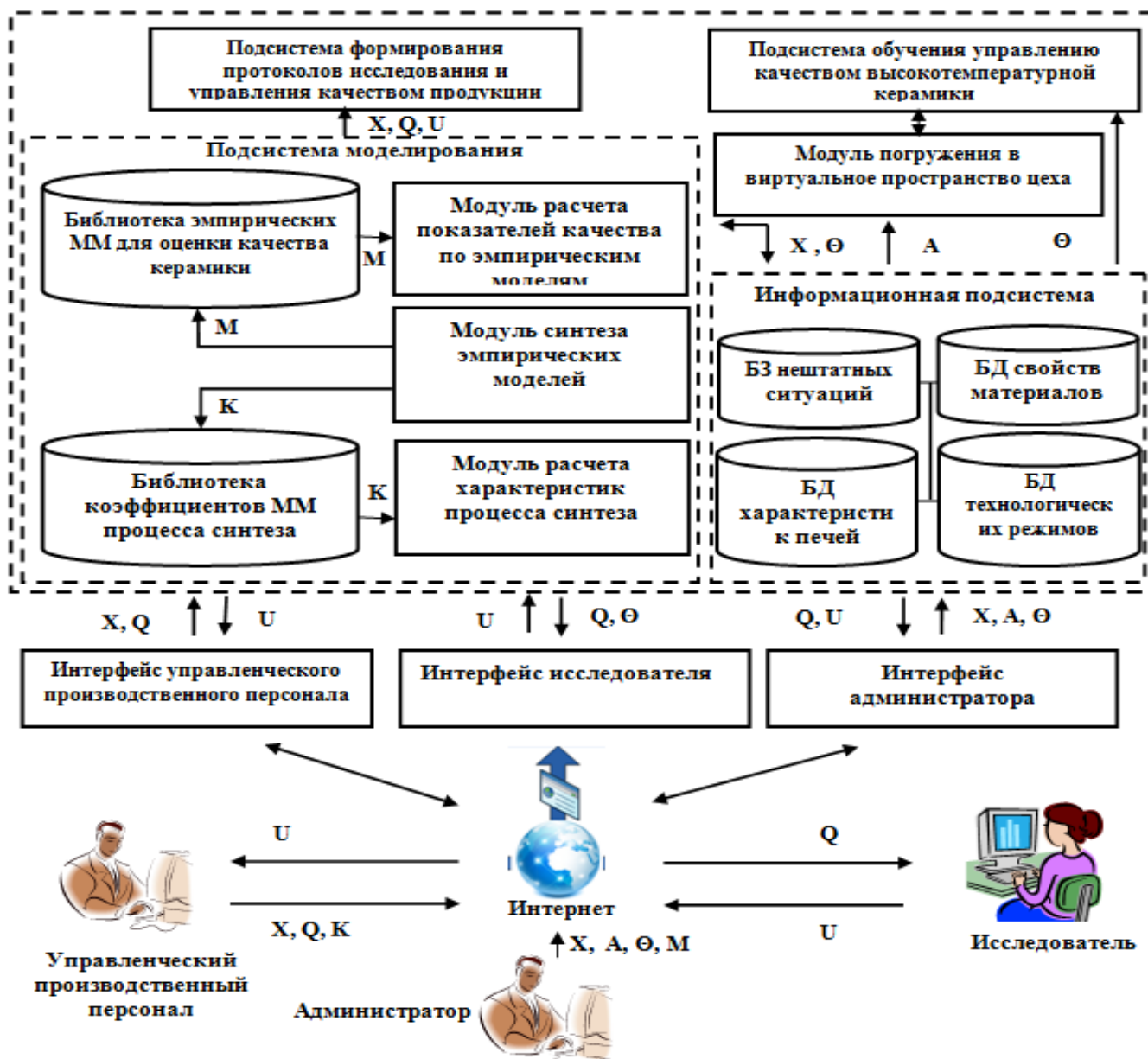
$$X = \{T_o, \Pi_o, L_o, \delta, \rho_o, \sigma, Rp_o, \eta_o\}$$

обеспечат необходимое качество продукции

$$Y = \{\Pi_2, L_2, \rho_2, V_2, W_2, H_R, KCV\},$$

в диапазонах заданных стандартами $Y^{min} \leq Y \leq Y^{max}$

Функциональная структура системы



Анализ математических моделей процесса спекания

Механизм лимитирующей стадии процесса уплотнения при спекании	Математическая модель механизма уплотнения		Автор
	Кинетическое уравнение	Примечание	
Вязкое течение твердой пористой ньютоновской среды с учетом давления пара в закрытых порах F	$\frac{dP}{d\tau} = -k_p P^{2/3} (1-P)^{1/3} + k_f \frac{P}{1-P}$	$k_p = 2,5 \frac{\gamma}{\eta_0 l_{03}}; k_f = \frac{3}{4} \frac{F}{\eta_0}$	Ю.В. Левинский
Вязкое течение твердой пористой ньютоновской среды при условии: $\eta = \eta_0 \exp(-\beta z); L = l_1 = l_{03} z^{2/3}$	$\frac{dz}{d\tau} = -k_z l_{03}^{-1} z^{2/3} \exp(\beta z)$	$k_z = \frac{9}{4} \frac{\gamma}{\eta_0} \frac{P_0}{1-P_0}$	В.М. Гропянов
Взаимодействие диффузии вакансий и вязкого течения с учетом распределения пор и зерен по размерам	$\frac{dz}{d\tau} = -k_z l_{03}^{(m+1)} z^m (a-z)^{2-m}$	$k_z = \frac{k_v}{(1-P_0)^{m-1}}; m \geq 2; a > 1$	Г.Х. Икэгами, Р.Л. Кобл, Д.П. Джонсон
Дислокационно-вязкое течение твердой пористой ньютоновской среды; статистической смеси пор и частиц при условии: $\eta = \eta_0 (1-P)^m$	$\frac{dP}{d\tau} = -k_p l_{03}^{-1} P (1-P)^{1+n-m}$	$k_p = \frac{9}{4} \frac{\gamma}{\eta_0}; n \leq m \geq (1 \div 2)$	В.В. Скороход
Зернограничное проскальзывание в процессе дислокационно-вязкого течения ньютоновской среды; статистической смеси пор и частиц при условии: $\eta(\tau) = (1-P)^m \eta_0(\tau)$	$\frac{dz}{d\tau} = -k_z l_{03}^{-3} \frac{z}{1 + l_{03}^{-2} \int_0^\tau k_L d\tau}$	$k_L = k_{0L} \exp\left(-\frac{E_L}{RT}\right)$ $k_z = k_{0z} \exp\left(-\frac{E_z}{RT}\right)$ $E_z \geq E_L; n = m$	В.А. Ивсенсен, В.В. Скороход
Зернограничное проскальзывание в процессе вязкого течения ньютоновской среды; статистической смеси пор и частиц с учетом $L = \varphi(z)$ и $E_z \approx E_L$	$\frac{dz}{d\tau} = -k_z l_{03}^{-(m+2)} z \left(1 + a \ln \frac{1}{z}\right)^{-m}$	$k_z = k_{0z} \exp\left(-\frac{E_z}{RT}\right); a \cong \frac{k_{0L}}{k_{0z} l_{03}^{m+1}}$	В.Н. Зернов, В.М. Гропянов

Структура модели синтеза керамики

Твердофазное спекание

$$D_b = f(D_{b0}, E_b, R, T)$$

D_b – коэффициент зернограничной диффузии, м²/с; D_{b0} – предэкспоненциальный множитель для коэффициентов диффузии, м²/с; E_b – энергия активации процесса зернограничной диффузии, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – температура, °С;

$$D_s = f(D_{s0}, E_s, R, T)$$

D_s – коэффициент поверхностной самодиффузии, м²/с; D_{s0} – предэкспоненциальный множитель для коэффициента диффузии, м²/с; E_s – энергия активации процесса поверхностной самодиффузии, Дж/моль;

$$L = f(R, D_s, \delta, \sigma, L_0, k, E_s, R, T)$$

L – средний диаметр зерна, м; δ – толщина поверхностного слоя зерна, м; σ – удельная поверхностная энергия, Дж/м²; k – постоянная Больцмана, Дж/К; L_0 – начальный диаметр зерна, м;

$$\Pi = f(D_b, \delta, \sigma, L_1, k, T)$$

Π – пористость, %;

Структура модели синтеза керамики

Жидкофазное спекание

$$R_p = f(\Pi)$$

R_p – средний радиус поры, м;

$$P_c = f(\sigma, R_p)$$

P_c – капиллярное давление, Па;

$$\Pi = f(P_c, P_g, \chi)$$

P_g – давление инертного газа вокруг материала, Па;

χ – объемная вязкость материала, Па·с;

$$L = f(Ds, \delta, \sigma, k, T_e, \tau_e)$$

T_e – температура изотермической выдержки на стадии жидкофазного спекания, °С;

τ_e – длительность изотермической выдержки на стадии жидкофазного спекания, с;

Структура модели синтеза керамики

Эмпирические зависимости

$$H_R = f(T_e, \tau_e, P_g)$$

H_R – твердость;

$$KCV = f(T_e, \tau_e, P_g)$$

KCV – ударная вязкость, кДж/м²;

Общие зависимости для стадий

$$\rho = f(\Pi, \rho_o)$$

ρ – плотность материала, кг/м³;

$$V = f(\rho, V_o)$$

V – степень объёмной усадки на i -й стадии процесса, %;

$$W = f(V)$$

W – скорость объёмной усадки, %/с;

Допущения модели синтеза керамики

- 1) структурным параметром материала является средний размер зерна (L);
- 2) уплотнение (ρ) на стадии спекания в вакууме осуществляется по механизму диффузионно-вязкого течения;
- 3) уплотнение (ρ) на стадии спекания под давлением осуществляется по механизму вязкого течения (χ, η);
- 4) при реологическом описании пористой структуры используется матричная модель пористого тела по Макензи;
- 5) рост зерен происходит термически активируемой диффузионной коалесценции дисперсных частиц;
- 6) температура ($T_j, j=1...n, T_e$) не изменяется по объему печного пространства;
- 7) температуры материала и внутripечного пространства равны.

Модель синтеза высокотемпературной керамики

Твердофазное спекание

$$D_{b,j} = D_{b0} \cdot \exp\left(-\frac{E_b}{R \cdot (T_{1,j} + 273)}\right) \quad D_{s,j} = D_{s0} \cdot \exp\left(-\frac{E_s}{R \cdot (T_{1,j} + 273)}\right)$$

$$dT_{1,j} / dt = w_{Tj}, \quad w_{Tj} = (T_j - T_{j-1}) / \tau_j$$

$$\frac{dL_{1,j}}{dt} = \frac{8 \cdot R \cdot D_{s,j} \cdot \delta^4 \cdot \sigma}{L_{1,j}^3 \cdot k \cdot E_s} \cdot \left[1 + \frac{E_s}{R \cdot (T_{1,j} + 273)} \right]$$

$$\frac{d\Pi_{1,j}}{dt} = -\frac{D_{b,j} \cdot \delta^4 \cdot \sigma}{L_{1,j}^4 \cdot k \cdot (T_{1,j} + 273)} \cdot \Pi_{1,j}$$

$$\Pi_1|_{t=0} = \Pi_0, \quad L_1|_{t=0} = L_0, \quad T_1|_{t=0} = T_0$$

Модель синтеза высокотемпературной керамики

Жидкофазное спекание

$$R_p = R_{p0} \cdot \left\{ \frac{[1 - 0,01 \cdot \Pi_1(t_n)] \cdot \Pi_2}{\Pi_1(t_n) \cdot (1 - 0,01 \cdot \Pi_2)} \right\}^{1/3}$$

$$P_c = k_{2e} \cdot \Pi_2 \cdot \sigma / R_p,$$

$$\chi = \frac{k_{1e} \eta \cdot (1 - 0,01 \cdot \Pi_2)}{\Pi_2}, \quad \eta = \eta_0 \cdot (1 - 0,01 \cdot \Pi_2)^{5/3}$$

$$\frac{d\Pi_2}{dt} = - \frac{P_c + P_g}{\chi} \cdot (100 - \Pi_2)$$

$$\frac{dL_2}{dt} = \frac{8 \cdot D_{s,n} \cdot \delta^4 \cdot \sigma}{L_2^3 \cdot k \cdot (T_e + 273)}$$

$$\Pi_2|_{t=t_n} = \Pi_1|_{t=t_n}, \quad L_2|_{t=t_n} = L_1|_{t=t_n}, \quad T_2|_{t=t_n} = T_1|_{t=t_n}$$

Модель синтеза высокотемпературной керамики

Эмпирические зависимости

$$H_R = f(a_0 \dots a_{26}, T_e, P_g, \tau_e)$$

$$KCV = f(c_0 \dots c_{26}, T_e, P_g, \tau_e)$$

Общие зависимости для стадий

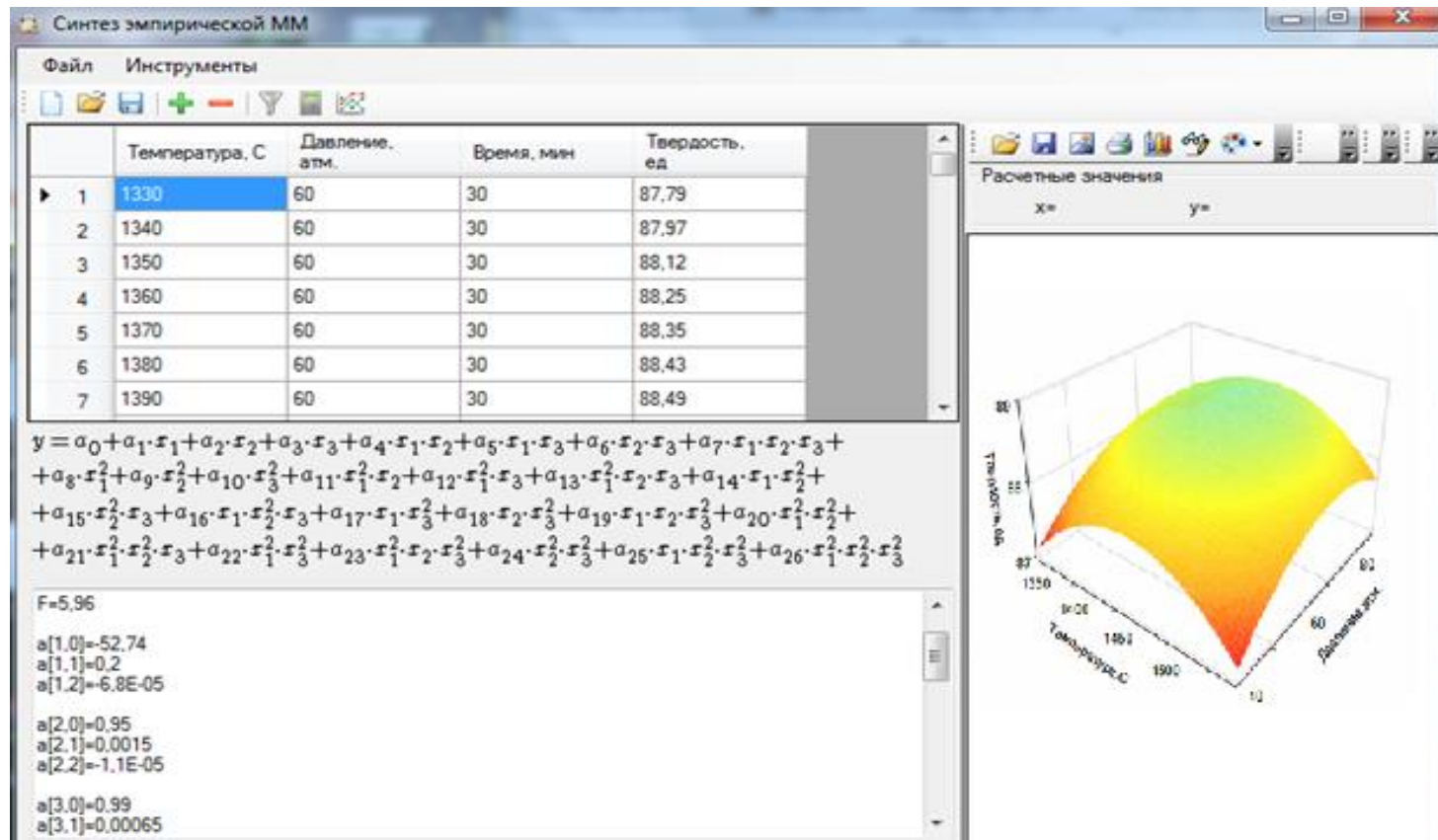
$$\rho_i = (1 - 0,01 \cdot \Pi_i) \cdot \rho_0, \quad i = 1, 2$$

$$V_i = (V_0 - \frac{m}{\rho_i}) / V_0;$$

$$W_i = dV_i / dt, \quad i = 1, 2$$

Модуль синтеза эмпирических моделей

Для добавления новых эмпирических зависимостей в систему встроен модуль синтеза эмпирических моделей



Проверка адекватности модели. Исходные данные.

Параметр	Условное обозначение	Значение	Значение	Единица измерения
Характеристики спекаемого материала				
Тип	T_M	WC-Co	WC-Ni	—
Начальный средний размер зерна	L_0	1	1	мкм
Толщина поверхностного слоя зерна	δ	0,3	0,3	нм
Начальная пористость	Π_0	40	40	%
Удельная поверхностная энергия	σ	3,5	3,5	Дж/м ²
Плотность компактного (беспористого) материала	ρ_0	14600	14700	кг/м ³
Вязкость компактного материала	η_0	170	173	МПа·с
Характеристики режимов				
Время неизотермического спекания в вакууме	τ_1	70	70	мин
Начальная температура в печи	T_0	20	20	°C
Конечная температура в печи	T_k	1450	1450	°C
Время изотермической выдержки под давлением в среде аргона	τ_2	30	30	мин
Давление аргона	P_g	6	6	МПа

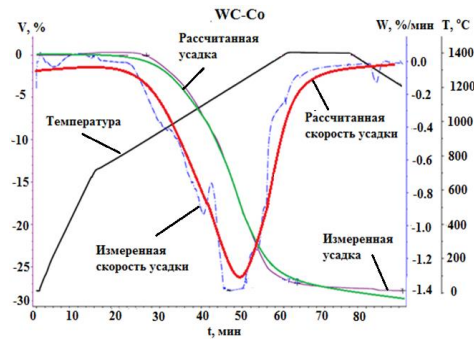
Проверка адекватности модели. Коэффициенты.

Тип	T_M	WC-Co	WC-Ni	—
Предэкспоненциальный множитель для коэффициента зернограничной диффузии, контролирующей уплотнение материала	D_{b0}	0,35	0,33	м ² /с
Энергия активации зернограничной диффузии	E_b	270	275	кДж/моль
Предэкспоненциальный множитель для коэффициента поверхностной самодиффузии, контролирующей рост зерен материала	D_{s0}	0,4	0,37	м ² /с
Энергия активации поверхностной самодиффузии	E_s	245	250	кДж/моль

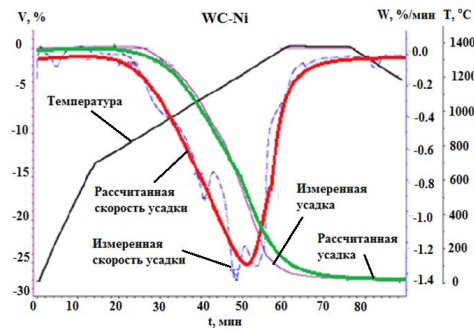
$$N_{R-WC-Co} = a_0 + a_1 \cdot T_k + a_2 \cdot P_g + a_3 \cdot \tau_2 + a_4 \cdot T_k \cdot P_g + a_5 \cdot T_k \cdot \tau_2 + a_6 \cdot P_g \cdot \tau_2 + a_7 \cdot T_k \cdot P_g \cdot \tau_2 + a_8 \cdot T_k^2 + a_9 \cdot P_g^2 + a_{10} \cdot \tau_2^2 + a_{11} \cdot T_k^2 \cdot P_g + a_{12} \cdot T_k^2 \cdot \tau_2 + a_{13} \cdot T_k^2 \cdot P_g \cdot \tau_2 + a_{14} \cdot T_k \cdot P_g^2 + a_{15} \cdot P_g^2 \cdot \tau_2 + a_{16} \cdot T_k \cdot P_g^2 \cdot \tau_2 + a_{17} \cdot T_k \cdot \tau_2^2 + a_{18} \cdot P_g \cdot \tau_2^2 + a_{19} \cdot T_k \cdot P_g \cdot \tau_2^2 + a_{20} \cdot T_k^2 \cdot P_g^2 + a_{21} \cdot T_k^2 \cdot P_g^2 \cdot \tau_2 + a_{22} \cdot T_k^2 \cdot \tau_2^2 + a_{23} \cdot T_k^2 \cdot P_g \cdot \tau_2^2 + a_{24} \cdot P_g^2 \cdot \tau_2^2 + a_{25} \cdot T_k \cdot P_g^2 \cdot \tau_2^2 + a_{26} \cdot T_k^2 \cdot P_g^2 \cdot \tau_2^2$$

Коэффициент	a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13
Значение коэффициента	-49,3	0,18	-0,078	-0,033	0,00029	0,00012	-5,1·10 ⁻⁵	1,9·10 ⁻⁷	-6,4·10 ⁻⁵	0,00055	0,00029	-1·10 ⁻⁷	-4,2·10 ⁻⁸	-6,7·10 ⁻¹¹
Коэффициент	a14	a15	a16	a17	a18	a19	a20	a21	a22	a23	a24	a25	a26	
Значение коэффициента	-2·10 ⁻⁶	3,6·10 ⁻⁷	-1,3·10 ⁻⁹	-1,1·10 ⁻⁶	4,6·10 ⁻⁷	-1,7·10 ⁻⁹	7,1·10 ⁻¹⁰	4,7·10 ⁻¹³	3,8·10 ⁻¹⁰	6·10 ⁻¹³	-3,2·10 ⁻⁹	1,2·10 ⁻¹¹	-4,2·10 ⁻¹⁵	

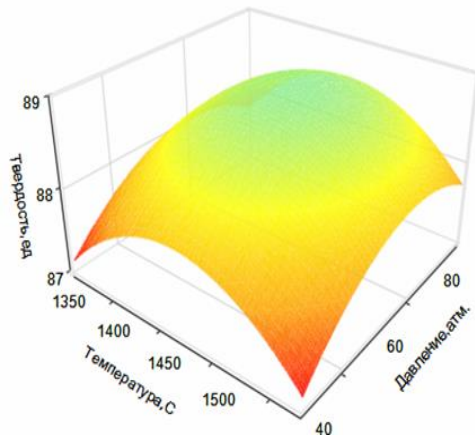
Проверка адекватности модели



Материал WC-Co
СКО = 6%



Материал WC-Ni
СКО = 6%

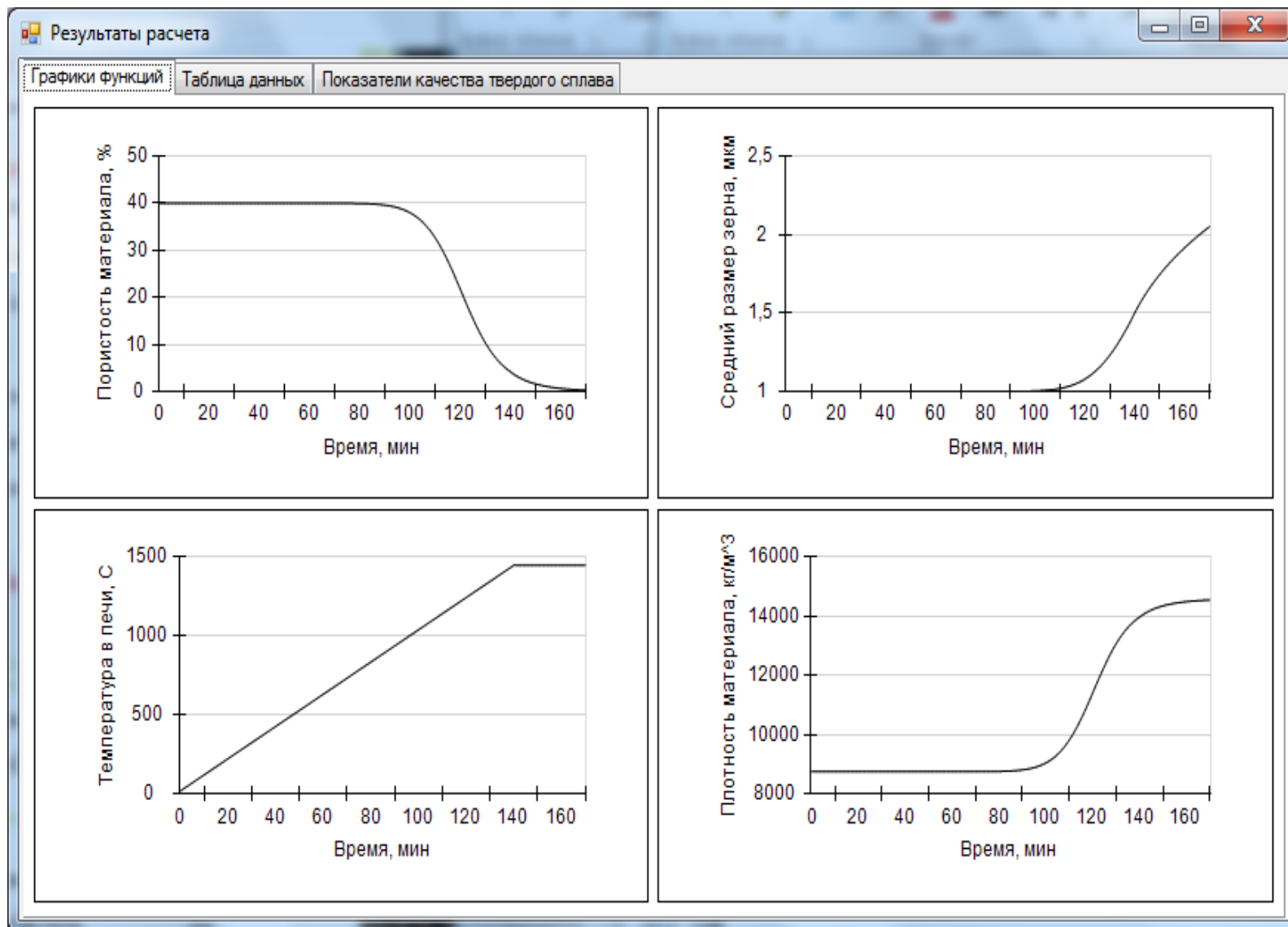


Материал WC-Co
Показатель качества -
Твёрдость

$$F_{расч} = 5,96$$

$$F_{расч} > F_{табл} = 1,55 (\beta = 95\%)$$

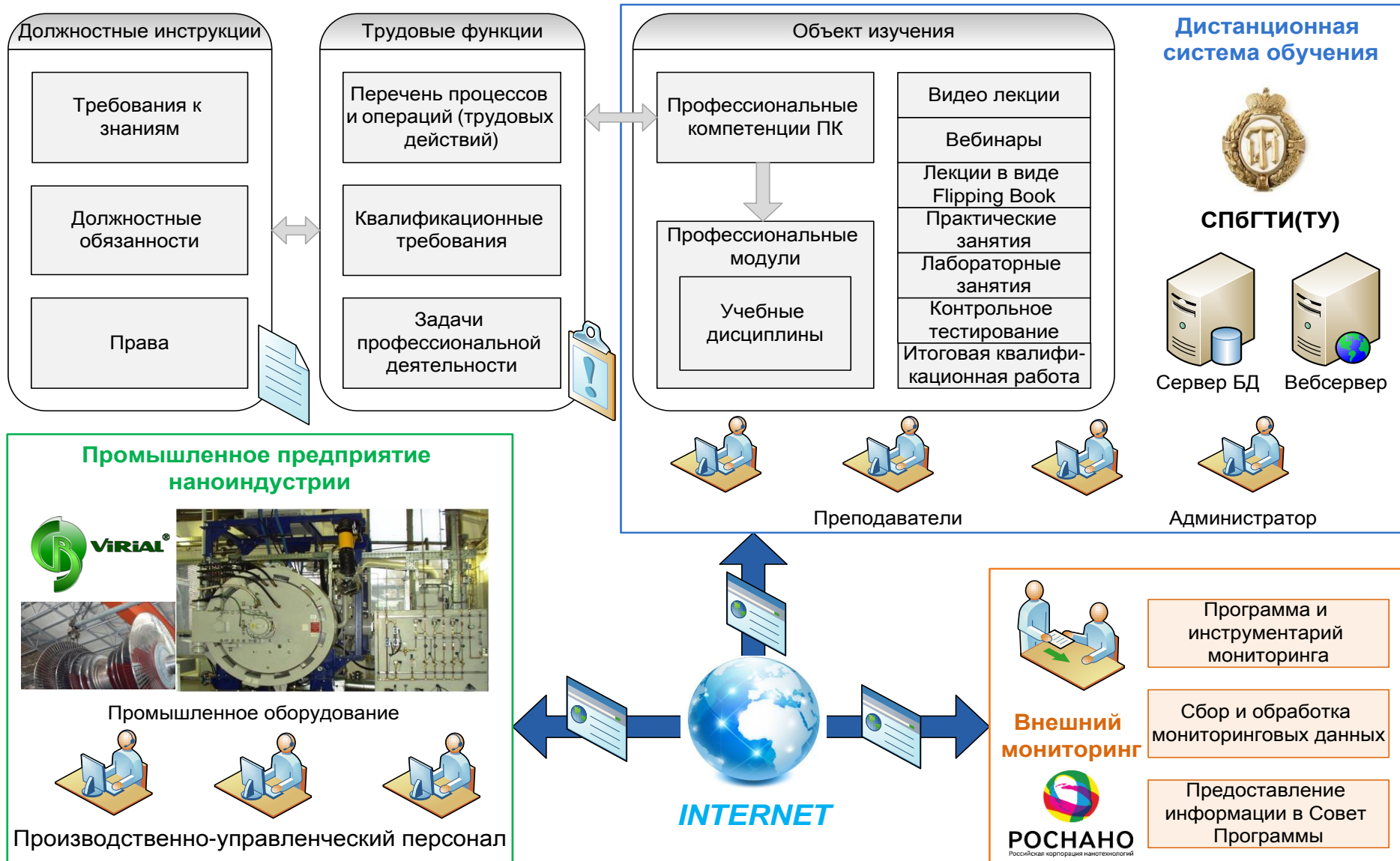
Исследование процесса синтеза керамики



Управление качеством продукции

Материал	Значение плотности по ГОСТ-3882	Режим проведения процесса рассчитанный в системе компьютерного моделирования	Значение показателя качества
ВК8	14400 – 14800 кг/м ³	Нагрев от $T_0 = 20^\circ\text{C}$ до $T_1 = 700^\circ\text{C}$ в течение $\tau_1 = 12$ мин, от $T_1 = 700^\circ\text{C}$ до $T_2 = 1400^\circ\text{C}$ за $\tau_2 = 48$ мин. Выдержка под давлением $P_g = 6$ МПа при температуре $T_e = 1400^\circ\text{C}$ в течение $\tau_e = 20$ мин	14600 кг/м ³
ВК10	14200 – 14600 кг/м ³	Нагрев от $T_0 = 20^\circ\text{C}$ до $T_1 = 750^\circ\text{C}$ в течение $\tau_1 = 15$ мин, от $T_1 = 750^\circ\text{C}$ до $T_2 = 1500^\circ\text{C}$ за $\tau_2 = 52$ мин. Выдержка под давлением $P_g = 6$ МПа при температуре $T_e = 1500^\circ\text{C}$ в течение $\tau_e = 23$ мин	14300 кг/м ³

Структура системы обучения



Внедрение работы

1. Компьютерная система для управления качеством керамических материалов внедрена в опытно-промышленную эксплуатацию на ООО «Вириал», что позволило повысить качество продукции за счёт повышения квалификации персонала и уменьшению затрат на проведение натуральных экспериментов.

2. Компьютерная система для управления качеством керамических материалов внедрена в учебный процесс СПбГТИ(ТУ), что позволило использовать современные компьютерные технологии при подготовке студентов по направлению «Материаловедение и технологии материалов»



Заключение

1. На основании анализа характеристик процесса производства высокотемпературной керамики, математических моделей, используемых для моделирования процесса, и существующих систем управления качеством изделий сформулированы требования к разрабатываемой компьютерной системе для управления качеством керамических материалов.

2. Разработана функциональная структура системы, включающая подсистему моделирования, информационную подсистему и интерфейсы исследователя, управленческого персонала и администратора.

3. Создана математическая модель синтеза высокотемпературной керамики.

Заключение

4. Сформирована библиотека эмпирических зависимостей показателей качества высокотемпературных керамических материалов от основных режимных параметров процесса, таких как температура, время спекания, давление в печи и др.

5. Разработана система компьютерного моделирования для исследования и управления качеством высокотемпературных керамических материалов, включающая подсистему моделирования, информационную подсистему и интерфейсы исследователя, управленческого персонала и администратора.

Заключение

6. Выполнено тестирование системы и внедрение на предприятие керамической промышленности ООО «Вириал», что позволило уменьшить количество брака, достичь экономии дорогостоящего сырья вследствие повышения квалификации персонала; уменьшить затраты на проведение натуральных экспериментов с новыми типами материалов вследствие возможности компьютерного исследования зависимости показателей качества от свойств материала и режимных параметров процесса синтеза по математическим моделям.

7. Выполнено внедрение системы в учебный процесс кафедры химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов СПбГТИ(ТУ).

Условные обозначения

X_i, F_i, U_i, Y_i – векторы входных параметров, возмущений, управляющих воздействий и выходных параметров i -й стадии процесса ($i = 1, 2$);

T_0 – начальная температура, °С;

P_0 – начальная пористость, %;

L_0 – начальный средний диаметр зерна, м;

δ – толщина поверхностного слоя зерна, м;

ρ_0 – плотность компактного материала, кг/м³;

σ – удельная поверхностная энергия, Дж/м²;

R_{p0} – начальный средний радиус поры, м;

$T_j, j = 1...n$ – температура в конце j -го этапа твердофазного спекания, °С;

τ_j – длительность j -го этапа твердофазного спекания, с;

n – количество этапов с различной скоростью изменения температуры на стадии твердофазного спекания;

T_e – температура изотермической выдержки на стадии жидкофазного спекания, °С;

τ_e – длительность изотермической выдержки на стадии жидкофазного спекания, с;

P_g – давление инертного газа вокруг материала, Па;

I – примеси в прессовке, %;

G – градиент температуры материала при нагреве, °С/м;

T_d – перепады напряжения в электрической сети, В;

P_d – примеси в инертном газе, %;

P_i – остаточная пористость на i -й стадии процесса синтеза, %;

L_i – средний диаметр зерна на i -й стадии процесса, м;

ρ_i – плотность материала на i -й стадии процесса, кг/м³;

V_i – степень объёмной усадки на i -й стадии процесса, %;

Условные обозначения

W_i – скорость объёмной усадки на i -й стадии процесса, %/с;

$P_p, L_p, \rho_p, V_p, W_p$ – остаточная пористость (%), средний диаметр зерна (м), плотность спеченного материала (кг/м³), объёмная усадка (%) и скорость объёмной усадки синтезируемого материала (%/с);

$P_p^{\max}, L_p^{\max}, \rho_p^{\min}$ – предельная остаточная пористость, средний диаметр зерна и плотность сплава;

V_p^{\min}, V_p^{\max} – пороговые значения объёмной усадки;

W_p^{\min}, W_p^{\max} – пороговые значения скорости усадки синтезируемого материала;

U_i^{\min}, U_i^{\max} – регламентные пороговые значения управляющих воздействий на стадиях процесса синтеза ВТКМ, зависящие от типа оборудования и типа материала;

A – характеристики оборудования,

Θ – знания о нештатных ситуациях, связанных с браком продукции, возможных причинах их возникновения и способах устранения,

M – эмпирические зависимости показателей качества от режимных параметров процесса синтеза керамики,

K – коэффициенты математической модели (ММ) синтеза высокотемпературных керамических материалов;

D_b – коэффициент зернограничной диффузии, м²/с;

k – постоянная Больцмана, Дж/К;

T_1 – температура материала на стадии твердофазного спекания, °С;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

D_s – коэффициент поверхностной самодиффузии, м²/с;

E_s – энергия активации процесса поверхностной самодиффузии, Дж/моль;

w_{Tj} – скорость нагрева материала на j -м этапе твердофазного спекания, °С/с;

Условные обозначения

D_{b0}, D_{s0} – предэкспоненциальные множители для коэффициентов диффузии, м²/с;

E_b – энергия активации процесса зернограничной диффузии, Дж/моль;

P_c – капиллярное давление, Па;

χ – объемная вязкость материала, Па·с;

η – сдвиговая вязкости материала, Па·с;

V_0 – объём прессовки, м³;

m – масса прессовки, кг.



Корниенко Иван Григорьевич,

*старший преподаватель кафедры систем автоматизированного
проектирования и управления,
кандидат технических наук*

e-mail: nov@technolog.edu.ru

+7(812)494-93-54