

### Выводы

Проведен анализ устойчивости макропараметров технологического процесса действующего производственного предприятия. Определены «узкие» места в технологической цепочке производственного процесса, представленные в виде невыполнения условий устойчивости макропараметров технологического процесса. Сформулирована методика исследования макропараметров технологического процесса производственно-технической системы. При заданном критерии качества предложена оптимальная функция управления отклонениями макропараметров производственного процесса, обеспечивающая асимптотическую устойчивость планового состояния производственно-технической системы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шкурба В.В. Планирование дискретного производства в условиях АСУ, – К.: Техника, 1975. - 296 с.
2. Петров Б.Н. Теория моделей в процессах управления, – М.: Наука, 1978. - 223 с.
3. Пигнастый О.М. Статистическая теория производственных систем.–Харьков, ХНУ им. Каразина, 2007. - 388 с.
4. Занг З.В.-Б. Синергетическая экономика, –М.: Мир, 1999., 335 с.
5. Прыткин Б.В., Технично-экономический анализ производства, –М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2000г., 399стр.
6. Демущкий В.П., Пигнастый О.М., Ходусов В.Д., Азаренкова М.Н. Использование методов статистической физики для исследования экономико-производственных систем с массовым выпуском продукции.// Вестник ХНУ. – Харьков, 2005. – N710– С. 128-134
7. Pignasty O.M. Distinctive numbers of production systems' functioning description // Вопросы атомной науки и техники. – Харьков, 2007. –N3– С.322-325
8. Флуд Н.А. Как измерить «устойчивость развития»? / Н.А. Флуд // Вопросы статистики. – 2006. – № 10. – С. 19-29.

пост. 18.10.10

## Методика расчета процесса уплотнения пористой структуры углерод-углеродных композитов в плоском реакторе

*СКАЧКОВ В.А., ВОДЕННИКОВ С.А., ИВАНОВ В.И., НЕСТЕРЕНКО Т.Н., КОСЕНКО В.Н.*

Запорожская государственная инженерная академия

Предложена методика расчета процесса уплотнения пористой структуры углерод-углеродных композитов в рабочем объеме плоского реактора, учитывающая распределение концентрации реакционного газа (пропана) по длине реактора, его доставку к нагретым поверхностям и последующую диффузию в пористую структуру уплотняемых композитов.

Запропоновано методику розрахунку процесу ущільнення пористої структури вуглець-вуглецевих композитів у робочому обсязі плоского реактора, що враховує розподіл концентрації реакційного газу (пропану) по довжині реактора, його доставку до нагрітих поверхонь і подальшу дифузію в пористу структуру ущільнюваних композитів.

The method for calculation of compression of carbon-carbon composites porous structure process is offered in the swept volume of flat reactor, taking into account distributing of concentration for reactionary gas (propane) on length of reactor, his delivery to the heated surfaces and subsequent diffusion in the porous structure of a compact composites.

Расширение области применения углерод-углеродных композитов в значительной степени определяется снижением их себестоимости, и в первую очередь, энергозатрат на их производство. Так, снижение уровня температуры уплотнения пористой структуры данных композитов до 600...700 °С при использовании сжиженных газов позволяет найти подход к проблеме энергосбережения [1].

В работах [2-4] рассмотрены вопросы уплотнения пористой структуры углерод-углеродных композитов, однако не учтена реальная структура пор данных

композитов и не выполнена оценка ее влияния на процесс уплотнения.

Задачей настоящих исследований является разработка методики расчета процесса уплотнения пористых углерод-углеродных композитов пропаном с учетом его диффузии в реальную пористую структуру для условий изотермического нагрева.

Известно, что реальная пористая структура данных композитов представляется порогаммой с распределением эффективного радиуса пор в пределах от нескольких нанометров до нескольких сотен микрометров. Для более

точного расчета процессов уплотнения реальных конструкций из углерод-углеродных композитов в расчетные модели необходимо вводить реальную структуру пористого объема указанных материалов.

Дифференциальное уравнение диффузии реакционного газа в модельной поре с эффективным радиусом  $r$  при его разложении на поверхности поры имеет вид [3]:

$$\frac{d^2 C}{d\ell^2} = \frac{2k}{r \cdot D} \cdot C, \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация реакционного газа;  $\ell$  – координата по длине поры;  $k$  – константа скорости разложения реакционного газа на нагретой поверхности;  $D$  – коэффициент диффузии в поре.

Уравнение (1) дополняется граничными условиями

$$C|_{\ell=0} = C_0^I; \quad \left. \frac{dC}{d\ell} \right|_{\ell=h} = 0, \quad (2)$$

где  $C_0^I$  – концентрация реакционного газа у входа в пору;  $h$  – половина толщины ( $2h$ ) стенки углерод-углеродного композита.

Решение уравнения (1) с учетом условий (2) можно записать как

$$C(\ell) = C_0^I \cdot \left[ \frac{\exp(z \cdot \ell)}{1 + \exp(2z \cdot h)} + \frac{\exp(-z \cdot \ell)}{1 + \exp(-2z \cdot h)} \right], \quad (3)$$

где  $z$  – корень характеристического уравнения,  $z = 2k / (r \cdot D)^{0.5}$ .

В объеме реактора реализуются два диффузионных потока реакционного газа: один поток направлен от центра реактора на беспористую поверхность его стенки, второй – на пористую поверхность углерод-углеродного композита.

Поток на беспористую поверхность стенки реактора можно определить методом равнодоступных поверхностей Франк-Каменецкого [5]. В этом случае концентрацию реакционного газа на поверхности реактора  $C_0^P$  рассчитывают с использованием выражения

$$\frac{d(C \cdot U)}{dx} = -k \cdot \beta \cdot C \cdot \left[ \frac{b_p}{\beta + k} + \frac{b_n}{\beta + k \cdot (1 - \omega_n) + \omega_n \cdot \pi \cdot \sum_{i=1}^N \Omega_i} \right] \quad (6)$$

где  $U$  – скорость тока пропана по длине реактора;  $x$  – координата, направленная по длине реактора от входа пропана в реактор.

Из уравнения (5) следует:

$$\begin{aligned} C_{C_3H_8} &= C_{ex}^{C_3H_8} \cdot (1 - \alpha); \\ C_{H_2} &= C_{ex}^{C_3H_8} \cdot 4\alpha; \\ U &= U_{ex} \cdot (1 + 3\alpha), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $C_{ex}^{C_3H_8}$  – концентрация пропана на входе в реактор;  $U_{ex}$  – скорость подачи реакционного газа в реактор;  $\alpha$  – удельная степень разложения пропана по длине реактора.

С учетом соотношений (7) уравнение (6) имеет вид:

$$\frac{2(1 - 3\alpha)}{1 - \alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dx} + \gamma = 0, \quad (8)$$

$C_0^P = \frac{\beta \cdot C}{\beta + k}$ , где  $C$  – концентрация реакционного газа в

ядре реактора;  $\beta$  – константа скорости диффузии.

На поверхности углерод-углеродного композита реакционный газ разлагается на пористых участках и диффундирует в поры с осаждением пироуглерода на их поверхности.

С учетом изложенного концентрацию реакционного газа на пористой поверхности углерод-углеродного композита  $C_0^I$  определяют по формуле

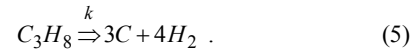
$$C_0^I = \frac{\beta \cdot \tilde{N}}{\left[ \beta + k \cdot (1 - \omega_n) + \omega_n \cdot \pi \cdot \sum_{i=1}^N \Omega_i \right]}, \quad (4)$$

где  $\omega_n$  – пористость поверхности углерод-углеродного композита.

$$\Omega_i = r_i^2 \cdot D_i \cdot z_i \cdot p_i \cdot \left[ \frac{\exp(-2z_i \cdot h) - \exp(2z_i \cdot h)}{2 + \exp(2z_i \cdot h) + \exp(-2z_i \cdot h)} \right];$$

$r_i, p_i$  – средний эффективный радиус и относительная доля  $i$ -той характерной группы пористой структуры композита соответственно;  $N$  – число характерных групп пор ( $N = 4$ ).

Рассматривают плоский реактор шириной  $b_p$  и длиной  $L$ . В центре, между боковыми стенками реактора, располагают плоскую пластину углерод-углеродного композита шириной  $b_n$  и толщиной  $2h$ . Реакционный газ (пропан) равномерно обтекает данную пластину с обеих сторон и диффундирует на поверхности стенок реактора и пластины. Стенки реактора и пластина нагреты до постоянной температуры, при которой пропан разлагается на нагретых поверхностях с отложением твердого осадка (пироуглерода) в соответствии с уравнением



Константа скорости гетерогенного разложения пропана  $k$  на нагретых поверхностях определена в работе [1].

Дифференциальное уравнение переноса пропана по длине плоского реактора с учетом его разложения можно записать

$$\text{где } \gamma = \frac{k \cdot \beta}{U_{\text{ax}}} \cdot \left[ \frac{b_p}{\beta + k} + \frac{b_n}{\beta + k \cdot (1 - \omega_n) + \omega_n \cdot \pi \cdot \sum_{i=1}^N \Omega_i} \right].$$

Уравнение (8) задает степень разложения пропана по длине реактора, которая учитывает процессы осаждения пироуглерода на стенках реактора и в пористой структуре пластины композита.

Разделяя переменные в уравнении (8) и интегрируя его левую часть от 0 до  $\alpha$ , а правую часть – от 0 до  $x$  с учетом малой величины удельной степени разложения пропана, будем иметь

$$\alpha(x) = 0,25 \left[ (1 + 8\gamma \cdot x)^{0,5} - 1 \right]. \quad (9)$$

Для нахождения константы скорости диффузии  $\beta$  опытным путем определяют скорость выхода реакционных