

**Неизотермическое вытеснение паров из реактора для парофазного осаждения**  
**Ю.А. Станкевич, С. П. Фисенко**

*Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси.  
 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15.*

Для многих задач нано- и микротехнологии представляет существенный интерес величина времени необходимого для вытеснения паров ламинарным потоком инертного газа из цилиндрического реактора для CVD [1]. Для изотермического случая решение этой задачи получено в [2]. Линии уровня примеси в процессе вытеснения показаны на рис.1 .

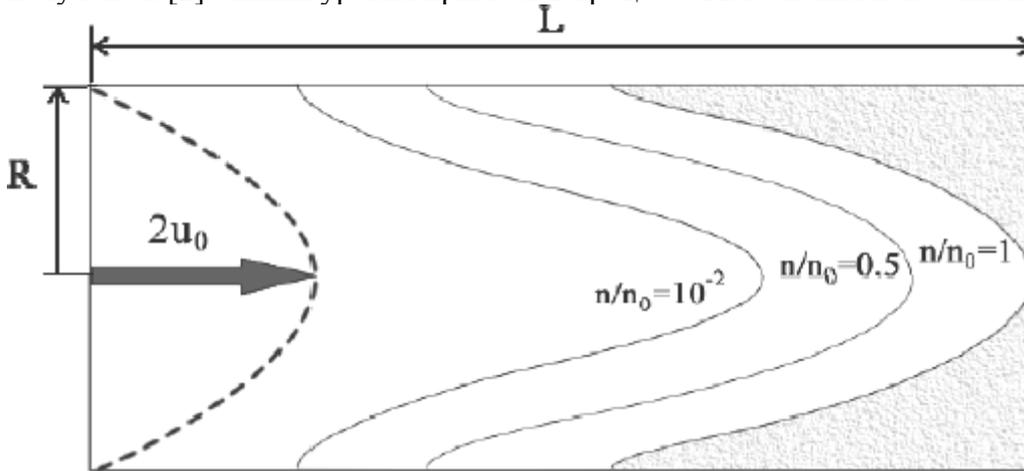


Рис. 1 – Проточный реактор

Изменения числовой плотности пара в максимально удаленной точке реактора показано на рис.2., где характерное газодинамическое время  $t_{gd}$  равно

$$t_{gd} = L / 2u_0$$

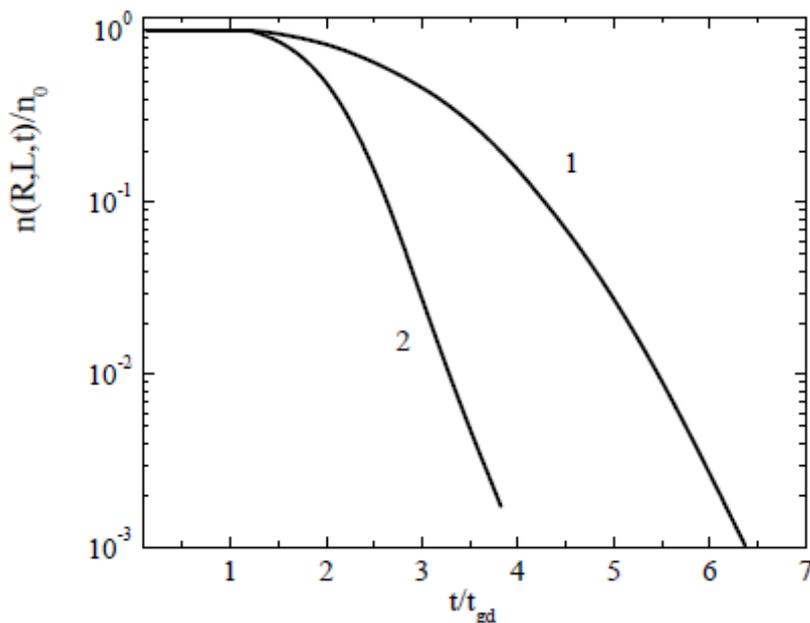


Рис. 2 Изменение плотности паров во времени при вытеснении—  
 1-  $D= 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; 2 -  $D= 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ .

а характерное время диффузионных процессов  $t_d$  (в радиальном направлении)

$$t_d = \frac{R^2}{\pi^2 D} \quad (1)$$

Если пренебречь осевой диффузией, то время вытеснения  $t_c$  паров из реактора в максимально удаленной от входа точке с координатами  $(L, R)$  зависит от вклада двух процессов, а именно газодинамического и диффузионного:

$$t_c = t_{gd} + ct_d \quad (2)$$

Интересно, что для обеспечения роста высококачественных углеродных нанотрубок на кремниевой подложке, расположенной вблизи стенки реактора [3], степень вытеснения углеводородных молекул должна быть достаточно высокой. Константа  $c$  в выражении (2) должна быть порядка 10 – 12 [3].

В неизотермическом случае задача о вытеснении была промоделирована с помощью пакета FLUENT. Расчеты показали, что при тех же массовых расходах газа носителя и при перепаде температур между температурой стенки и температурой входящего газа до 700К, время вытеснения практически не изменяется. Действительно, входящий в реактор холодный газ испытывает перестройку профиля скорости и нагревается. Характерная длина нагрева  $l_t$  имеет вид

$$l_t = \frac{1.6u_0 R^2}{a(T_w)b^2} \sim \frac{Q}{a(T_w)} \quad (3)$$

Где  $Q$  – массовый расход газа-носителя,  $a(T_w)$  – коэффициент температуропроводности газа-носителя при температуре стенки  $T_w$ ,  $b \approx 2.48$  – наименьший положительный корень уравнения  $J_0(b) = 0$ , где  $J_0$  – функция Бесселя нулевого порядка. Если  $L \gg l_t$ , то неизотермический характер процесса сказывается только на начальном тепловом участке.

**Заключение.** Показано, что время вытеснения зависит от двух процессов: газодинамического и диффузионного. При высоких степенях очистки, характерных для выращивания нановолокон на подложке, основной вклад во время очистки дает диффузионный процесс молекул примеси от стенки реактора, в окрестности которой практически отсутствует течение газа. Формулы (2) позволяют получить полезные инженерные оценки времени вытеснения. Если  $L \gg l_t$  то как показали расчеты вдув газа-носителя с температурой отличной от температуры стенки не влияет на процесс вытеснения, что позволяет упростить и удешевить конструкцию реактора.

---

#### Обозначения

$D$  – коэффициент диффузии, соответственно,  $m^2/c$ ;  $k$  – постоянная Больцмана, Дж/К;  $R$  – радиус реактора, м;  $L$  – длина реактора, м;  $T$  – температура, К;  $t$  – время, с;  
Индексы:  $gd$  – газодинамическое,  $d$  – диффузионное,  $0$  – начальное.

---

#### Литература

1. **Y Xu, X.T. Yan.** Chemical Vapour Deposition. An Integrated Engineering Design for Advanced Materials. Springer-Verlag, London, 2010. 352 p.
2. **Ю.А. Станкевич, С.П. Фисенко.** Влияние диффузии на очистку атмосферы CVD реактора // ИФЖ, 2012. т.85. №4.
3. **V. Labunov, B. Shulitski, A. Prudnikava, and A. Basaev.** Multi-level composite nanostructures based on the arrays of vertically aligned carbon nanotubes and planar graphite layers // Phys. Status Solidi A, 2011. 208, No. 2, 453–458.