УДК 539.612

ВЛИЯНИЕ РОСТА НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ НА УМЕНЬШЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАСЫЩЕННОГО ПАРА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

Скапцов А.С., Бодак В.А.
Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий
г.Могилев, Беларусь

В настоящей работе рассматривается задача об образовании наночастиц при ламинарном течении нагретой двухкомпонентной парогазовой смеси вдоль цилиндрического канала с охлаждаемыми стенками. Процесс конденсации пара на аэрозольных частицах приводит к уменьшению насыщения пара за счет уменьшения его концентрации и увеличения температуры смеси в результате выделения скрытой теплоты испарения. Вызванное этими причинами изменение пересыщения можно приблизительно оценить выражением $-M(1+S_{max}Le/Cn)/[\rho c_в(T_p)]$, где Cn - это число конденсации, определяемое как отношение коэффициента теплопроводности к удельной теплоте парообразования. Изменение пересыщения, необходимое для уменьшения скорости зародышеобразования в e раз по сравнению с ее значением на пике, приблизительно равно $-S_{max}[lnS_{max}]^3/2f(T_p)$. Предлагаемый в работе подход будет справедлив, если изменение пересыщения, обусловленное конденсацией пара массой M, окажется меньше указанной величины. Это ограничение может быть преобразовано в условие, при котором максимальная скорость нуклеации $J_p(r)$ для конденсации пара пренебрежимо мала:

$$J_p(r) \ll \frac{0{,}446}{\pi\Gamma(1/4)}\frac{(lnS_{max})^3}{f(T_p)}\frac{\alpha^{2,5}}{A^{1,5}}\left(\frac{\rho_V}{\rho_1}\right)\left[\frac{(1-r^2)^{2,5}}{1+S_{max}Le/Cn}\right]\frac{1}{r_0^5\sigma_z^{2,5}}. \quad (1)$$

Прежде чем рассматривать общие условия, которые накладываются на решение задачи, следует ограничиться веществами, удовлетворяющими условиям $Le > 1$ и $Cn \gg 1$ (крупные молекулы органических веществ с низкой плотностью насыщенных паров и низкой теплотой парообразования). Для оценки скорости роста частиц можно использовать константу:

$$A = D\rho c_в(T_p)(S_{max}-1)/\rho_1.$$

Кроме того для удобства предположим, что $S_{max} \gg 1$, а $S_{max}Le/Cn \ll 1$. Тогда на оси цилиндрического канала ($r = 0$) выражение (1) принимает форму:

$$J_p(0) \ll \frac{1{,}061\beta_1^5}{\pi\Gamma(1/4)}\left[\frac{Lef(T_p)}{(lnS_{max})^3}\right]^{0,25}\alpha\left(\frac{\rho_1}{S_{max}\rho_{Ve}(T_p)}\right)^{0,5}\frac{1}{r_0^5}. \quad (2)$$

Правая сторона этого неравенства уменьшается с увеличением температуры, но наибольший вклад дает радиус канала r_0 (r_0^{-5}).

Для того чтобы оценить точность предлагаемого подхода решения задачи необходимы точные решения уравнений [1]. Для случая $\dot{m}_V = 0$ аналитическое решение возможно при условии, что можно пренебречь последним членом в правой части уравнения [1]. Вместе с тем, для получения решения необходимо знать большое число членов бесконечного ряда на входе в канал. Поэтому в настоящей работе использовался метод численного решения системы дифференциальных уравнений в частных производных, особенности применения которого к задаче о ламинарном течении парогазовой смеси в цилиндрическом канале обсуждались в работе [2].

Расчеты были выполнены для смеси дибутилфталата (ДБФ) в воздухе ($Le \approx 5$) и для паров воды в воздухе ($Le \approx 0{,}85$).

Результаты численных расчетов для смеси паров ДБФ и воздуха представлены на Рисунке 1 в виде профилей пересыщения пара S от радиальной координаты r для трех различных положений вдоль продольной оси канала z (1 - z=0,5; 2 - z=0,375 и 3 - z=0,125) (пунктирные линии).

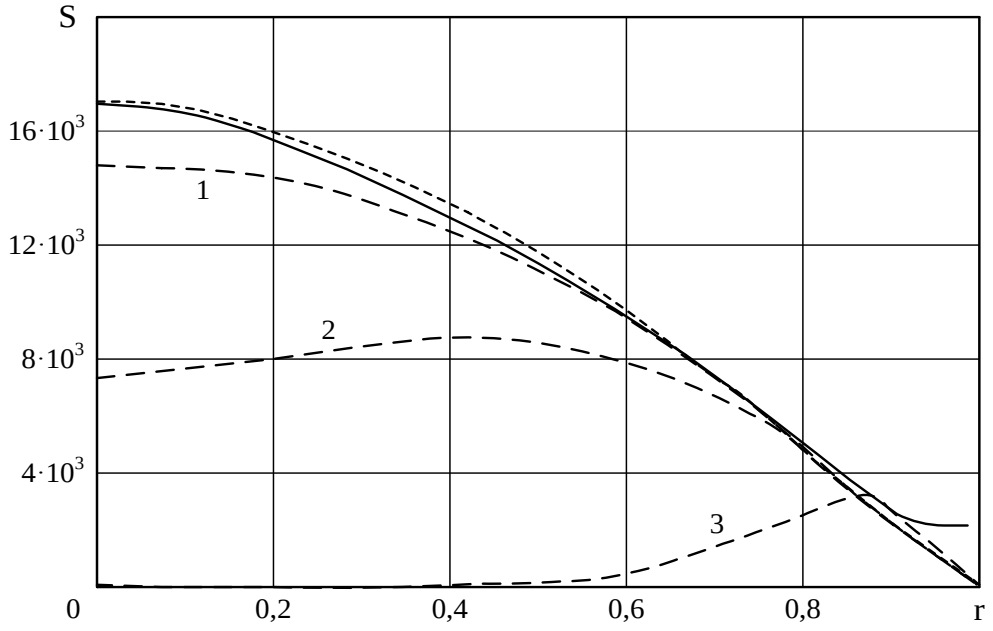

Рисунок 1 – Профили пересыщения паров ДБФ в воздухе от радиальной координаты в разных сечениях канала: 1 – z=0,5; 2 – z=0,375; 3 – z=0,125.

Расчеты выполнены для температуры стенок канала 273 К и температуры парогазовой смеси на входе в канал – 363 К. Сплошной линией показано изменение максимальных пересыщений в зависимости от радиальной координаты. Кривая, обозначенная мелким пунктиром, рассчитана с использованием предложенных в работе приближений с простым подбором функции $\chi_1(r)$. Если $\chi_1(r) \approx 0{,}65r^4 - 1{,}63r^2 + 1$, то погрешность в расчетах по формулам не превышает 3% для $r < 0{,}9$. Как и ожидалось, пересыщение увеличивается по мере приближения к оси канала. Интересно отметить, что вблизи стенки достигнутое максимальное пересыщение не стремится к нулю как следует из используемых уравнений, а выравнивается до значения ($S \approx 1700$) близкого к предсказанному выражением:

$$S_{max} = \left[1 + \frac{\Delta T c_W}{\delta T_1 \Delta c Le^{1/3}}\right] Le^{1/3} \frac{\delta T_1}{\Delta T} exp\left(\frac{B}{T_W + \delta T_1} - \frac{B}{T_W + \Delta T}\right) \quad (3)$$

Установлено, что максимум пересыщения располагается на безразмерном расстоянии от 0,1 до 0,3 после максимума скорости нуклеации (скорость зародышеобразования обычно достигает максимума на расстоянии от 0,3 до 0,5).

Список использованных источников

1 Jeong, J.I. A simple bimodal model for simultaneous particle nucleation, coagulation and coalescence / J.I.Jeong, M.Choi // J.Aerosol Sci. – 2003. – Vol.34, N 8. – P.965-976.

2 Barret, J.C. Timescales for nucleation and growth in supersaturated vapour-gas mixture / J.C.Barret // Journal of Aerosol Science. – 2000. – Vol.31, No.1. – P.51-64.