

УДК 533.72

DOI: 10.18384-2310-7251-2018-2-82-93

## К ВОПРОСУ О ВЫМЫВАНИИ ЛЕТУЧИХ УМЕРЕННО КРУПНЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ИСПАРЯЮЩИМИСЯ КАПЛЯМИ ПРИ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА И ПЕКЛЕ МНОГО МЕНЬШИХ ЕДИНИЦЫ

**Чаусова О.В.**

*Технологический университет*

*141070 Московская область, г. Королев, ул. Гагарина, д. 42, Российская Федерация*

**Аннотация.** Настоящая работа посвящена изучению вопросов вымывания умеренно крупных летучих аэрозольных капель из атмосферы. Вычислено время полной очистки заданного объёма от аэрозольных частиц. Построен график зависимости времени очистки от радиусов капель. Показано, что существует такой радиус капель, при котором время очистки минимально. Исследована зависимость времени очистки от коэффициента испарения капель.

**Ключевые слова:** умеренно-крупные аэрозольные частицы; вымывание; время очистки заданного объёма от аэрозольных частиц.

## TO THE PROBLEM OF WASHING FLYING MODERATELY LARGE AEROSOL PARTICLES BY EVAPORATING DROPS WITH REYNOLDS AND PECLET NUMBERS MUCH LESS THAN UNITY

**O. Chausova**

*University of Technology*

*42 Gagarina str, 141070 Korolev, Moscow region, Russian Federation*

**Annotation.** The paper studies the washing of moderately large evaporative aerosol drops from the atmosphere. The time for complete purification of a given volume from aerosol particles is calculated. A graph of the dependence of the cleaning time on the droplet radius is plotted. It is shown that there exists a radius of drops at which the cleaning time is minimal. The dependence of the time of complete purification on the evaporation coefficient of droplets is found.

**Key words:** moderately large aerosol particles; washing away; cleaning time of a given volume of aerosol particles.

Данная работа посвящена математическому описанию механизма очистки атмосферы от аэрозольных загрязнений путём вымывания умеренно крупными каплями. Хорошо известно, что мелкодисперсный аэрозоль (пыли, дымы, туманы) вреден для здоровья, прежде всего тем, что он не задерживается в верхних дыхательных путях, а проникает глубоко в лёгкие, раздражает слизистые оболочки, способствует развитию аллергических реакций, заболеваний дыхатель-

ных путей, отравлений. Основными источниками аэрозольных выбросов являются ТЭС, металлургические, цементные, сажевые, магнезитовые предприятия. Кроме регулярных отходов производства, на заводах возможны техногенные катастрофы с выбросом аэрозоля [1–2]. Поэтому в настоящее время особое внимание уделяется экологической безопасности промышленных объектов, установке очистительных сооружений различной конструкции.

Одним из эффективных способов локализации загрязнения является механизм вымывания взвешенного аэрозоля более крупными по размерам каплями [3–5]. Целью настоящей работы является вычисление времени полной очистки заданного объёма от аэрозоля, а также анализ получившихся зависимостей от радиусов и коэффициента испарения частиц. Задачи работы: разработать методику математического описания процессов, происходящих в облачной атмосфере, исследовать движение умеренно крупных летучих частиц в полях температуры и концентрации.

В исследовании не рассматривается коагуляция крупных капель, считается, расстояние между вымывающими каплями много больше их радиусов, каждая капля вымывает аэрозоль независимо от других капель. В связи с этим будем рассматривать процессы, происходящие в окрестности одной капли.

Рассмотрим сферически симметричную летучую каплю радиуса  $R_d$ , которая помещается в бинарную газовую смесь. При испарении капли её размер остаётся конечным. Первым компонентом (летучим) газовой смеси будем считать молекулы вещества капли, а для второго (несущего) компонента поверхность частицы непроницаема. Из-за происходящего испарения капли вокруг неё образуются сферически симметричные распределения температуры и концентрации с градиентами  $\nabla T^{(e)}$ ,  $\nabla C_1^{(e)}$ ,  $\nabla C_2^{(e)}$ , где  $T^{(e)}$  – температура вне частицы,  $C_1^{(e)} = \frac{n_1^{(e)}}{n_0^{(e)}}$ ,

$C_2^{(e)} = \frac{n_2^{(e)}}{n_0^{(e)}}$  – относительные, а  $n_1^{(e)}$ ,  $n_2^{(e)}$  – численные концентрации молекул летучего и несущего компонентов соответственно;  $n_0^{(e)} = n_1^{(e)} + n_2^{(e)}$ . Концентрация летучего компонента мала, температурные перепады в окрестности капли невелики. Это допущение позволяет пренебрегать зависимостью коэффициентов теплопроводности  $\kappa^{(e)}$ ,  $\kappa^{(i)}$ , вязкости  $\eta^{(e)}$ ,  $\eta^{(i)}$ , диффузии  $D_{12}$  от температуры.

Вымываемый «вредный» аэрозоль представлен более мелкими летучими аэрозольными частицами, которые вследствие термодиффузионнофоретического движения будут двигаться к вымывающей капле, либо от неё.

Числа Рейнольдса и Пекле малы:

$$\text{Re} = \frac{\rho UR}{\eta} \ll 1; \text{Pe} = \frac{UR}{\chi},$$

где  $\chi$  – коэффициент температуропроводности.

Произведём расчёт времени очистки объёма  $V$  от аэрозольных частиц.

Задача обладает сферической симметрией, поэтому рационально проводить решение в сферической системе координат с началом в центре капли.

Температурные и концентрационные поля описываются стационарными уравнениями теплопроводности и диффузии:

$$\Delta_r T^{(e)} = 0, \Delta_r C_1^{(e)} = 0, \quad (1)$$

где  $\Delta_r = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right)$  – радиальная составляющая оператора Лапласа,  $r$  – расстояние от начала координат до точки наблюдения ( $r > R_d$ ).

На поверхности капли выполняются условия непрерывности температуры и концентрации:

$$\begin{aligned} T^{(e)} &= T_0^{(e)}, \\ C_1^{(e)} &= C_{s1}^{(e)}, \end{aligned}$$

где  $C_{s1}^{(e)}$  – концентрация насыщенных паров первого компонента. А на достаточно большом расстоянии от капли выполняются условия однородности (при  $r \rightarrow R_v$ ,  $R_v$  – радиус окружающей каплю области):

$$\begin{aligned} C_1^{(e)} \Big|_{r=R_v} &= C_{1\infty}^{(e)}; \\ T^{(e)} \Big|_{r=R_v} &= T_{\infty}^{(e)}. \end{aligned}$$

Решая уравнения (1) с начальными и условиями на бесконечности получаем:

$$C_1^{(e)} = C_{1\infty}^{(e)} - \left( C_{1\infty}^{(e)} - C_{1s}^{(e)} \right) \frac{R_d}{r}, \quad (2)$$

$$T^{(e)} = T_{\infty}^{(e)} - \left( T_{\infty}^{(e)} - T_0^{(e)} \right) \frac{R_d}{r}. \quad (3)$$

Скорость движения умеренно крупных частиц представляет собой сумму скорости движения среды, термо- и диффузиофоретической скоростей:

$$U_r = U_r^{(g)} + U_r^{(T)} + U_r^{(D)}. \quad (4)$$

Скорость движения центра инерции газа рассчитывается по формуле, приведённой в [6]:

$$\vec{U}^{(g)} = -D_{12} \frac{n_0^{(e)2} m_1}{n_2^{(e)} \rho_0^{(e)}} \nabla C_1^{(e)}. \quad (5)$$

Здесь  $m_1$  – масса молекулы первого компонента газовой смеси,  $\rho_0^{(e)}$  – плотность газовой смеси.

Выражения для скоростей термо- и диффузиофореза найдены в [7]:

$$\begin{aligned}
\bar{U}^{(T)} = & \left( \frac{\eta_0^{(e)}}{\eta_0^{(i)}} + \frac{3C^*}{R} + \frac{3}{2} \right)^{-1} \left\{ \frac{1}{T_0^{(e)}} \left( 1 + \frac{\beta_T}{R} \right) \left[ \left( 6n_2^{(e)} T_0^{(e)} K_n^{(T)} \kappa_0^{(e)} \frac{\partial C_{s1}^{(e)}}{\partial T^{(i)}} - \right. \right. \right. \\
& - 6D_{12} n_0^{(e)2} L m_1 K_T^{(T)} \frac{\partial C_{s1}^{(e)}}{\partial T^{(i)}} - 3n_2^{(e)} R \left( \kappa_0^{(e)} + \kappa_0^{(i)} \frac{K_T^{(T)}}{R} \right) \left. \right] \alpha \nu - 6D_{12} n_0^{(e)} \times \\
& \times \left( \kappa_0^{(e)} + \kappa_0^{(i)} \frac{K_T^{(T)}}{R} \right) \left. \right] K_{TSI} - 3D_{12} \left( 1 + \frac{\beta_D}{R} \right) \alpha \nu \kappa_0^{(e)} n_2^{(e)} R \frac{\partial C_{s1}^{(e)}}{\partial T^{(i)}} K_{DSI} + \\
& + \frac{\kappa_0^{(e)} R}{\eta_0^{(i)}} \left( \alpha \nu \left( 2n_2^{(e)} T_0^{(e)} K_n^{(T)} \frac{\partial C_{s1}^{(e)}}{\partial T^{(i)}} - n_2^{(e)} R \right) - 2D_{12} n_0^{(e)} \right) \frac{\partial \sigma}{\partial T^{(i)}} - \\
& - \frac{2D_{12} n_0^{(e)2} m_1 \alpha \nu \kappa_0^{(e)} R}{\rho_0^{(e)}} \left( \frac{\eta_0^{(e)}}{\eta_0^{(i)}} + \frac{3C^*}{R} + \frac{1}{2} \right) \frac{\partial C_{s1}^{(e)}}{\partial T^{(i)}} \left. \right\} \frac{\nabla T^{(e)}}{\Phi}, \quad (6)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\bar{U}^{(D)} = & - \left( \frac{3}{2} + \frac{3C^*}{R} + \frac{\eta_0^{(e)}}{\eta_0^{(i)}} \right)^{-1} \left\{ \left[ 3\alpha \nu \left( D_{12} n_0^{(e)2} L m_1 R \left( 1 + \frac{2K_T^{(T)}}{R} \right) - \right. \right. \right. \\
& - 2\kappa_0^{(e)} K_n^{(T)} T_0^{(e)} n_2^{(e)} \left. \right) \frac{\partial C_{s1}^{(e)}}{\partial T^{(i)}} + 3D_{12} n_0^{(e)} \left( 2\kappa_0^{(e)} + \kappa_0^{(i)} \left( 1 + \frac{2K_T^{(T)}}{R} \right) \right) \left. \right] \left( 1 + \frac{\beta_D}{R} \right) D_{12} K_{DSI} + \\
& + 3\alpha \nu \left[ D_{12} n_0^{(e)2} L m_1 R + n_2^{(e)} K_n^{(T)} T_0^{(e)} \kappa_0^{(i)} \right] \left( 1 + \frac{\beta_T}{R} \right) \frac{K_{TSI}}{T_0^{(e)}} + \\
& + \frac{\alpha \nu R}{\eta_0^{(i)}} \left[ n_0^{(e)2} D_{12} L m_1 R \left( 1 + \frac{2K_T^{(T)}}{R} \right) - 2n_2^{(e)} \kappa_0^{(e)} K_n^{(T)} T_0^{(e)} \right] \frac{\partial \sigma}{\partial T^{(i)}} - \\
& - 3\alpha \nu R \left( 2\kappa_0^{(e)} + \kappa_0^{(i)} \left( 1 + \frac{2K_T^{(T)}}{R} \right) \right) \left( \frac{1}{2} + \frac{3C^*}{R} + \frac{\eta_0^{(e)}}{\eta_0^{(i)}} \right) \frac{D_{12} n_0^{(e)2} m_1}{\rho_0^{(e)}} \left. \right\} \frac{\nabla C_1^{(e)}}{Z}. \quad (7)
\end{aligned}$$

Здесь

$$\begin{aligned}
\Phi = & - \left( n_2^{(e)} R \left( 2\kappa_0^{(e)} + \kappa_0^{(i)} \left( 1 + \frac{2K_T^{(T)}}{R} \right) \right) \right) + \\
& + 2 \left( D_{12} n_0^{(e)2} L m_1 R \left( 1 + \frac{2K_T^{(T)}}{R} \right) - 2n_2^{(e)} K_n^{(T)} T_0^{(e)} \kappa_0^{(e)} \right) \frac{\partial C_{s1}^{(e)}}{\partial T^{(i)}} \alpha \nu - \\
& - 2D_{12} n_0^{(e)} \left( 2\kappa_0^{(e)} + \kappa_0^{(i)} \left( 1 + \frac{2K_T^{(T)}}{R} \right) \right), \quad (8)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z = & \left( n_2^{(e)} R \left( 2\kappa_0^{(e)} + \kappa_0^{(i)} \left( 1 + \frac{2K_T^{(T)}}{R} \right) \right) \right) + \\
& + 2 \left( D_{12} n_0^{(e)2} L m_1 R \left( 1 + \frac{2K_T^{(T)}}{R} \right) - 2n_2^{(e)} K_n^{(T)} T_0^{(e)} \kappa_0^{(e)} \right) \frac{\partial C_{s1}^{(e)}}{\partial T^{(i)}} \alpha \nu + \\
& + 2D_{12} n_0^{(e)} \left( 2\kappa_0^{(e)} + \kappa_0^{(i)} \left( 1 + \frac{2K_T^{(T)}}{R} \right) \right). \quad (9)
\end{aligned}$$

В формулах (6)–(9) использованы следующие обозначения:  $C^*$ ,  $K_{TSI}$ ,  $K_{DSI}$  – коэффициенты теплового и диффузионного скольжения;  $\beta_T$ ,  $\beta_D$  – величины, учитывающие кривизну поверхности;  $K_T^T$ ,  $K_n^{(T)}$  – коэффициенты скачков температуры, обусловленные неоднородностью по температуре и концентрации, соответственно;  $C_{s1}^{(e)}$  – относительная концентрация насыщенных паров газа вблизи поверхности капли;  $L$  – удельная теплота парообразования;  $\alpha$  – коэффициент испарения;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения.

Подставляя найденные выражения (5)–(9) для скоростей в (4) найдём  $U_R$ . Выражения для радиальных компонент градиентов получаются из (2) и (3):

$$(\nabla_r C_1^{(e)})_\infty = (C_{1\infty}^{(e)} - C_{1s}^{(e)}) \frac{R_d}{R_V^2}, \quad (10)$$

$$(\nabla_r T^{(e)})_\infty = (T_\infty^{(e)} - T_0^{(e)}) \frac{R_d}{R_V^2}. \quad (11)$$

После упрощения запишем:

$$\vec{U}_r = -(\varphi_1 + \varphi_2) \frac{R_d}{R_V^2} \vec{n}, \quad (12)$$

где  $\vec{n} = \frac{\vec{r}}{r}$ , а

$$\begin{aligned}
\varphi_1 = & \left[ \left( \frac{3}{2} + \frac{3C^*}{R} + \frac{\eta_0^{(e)}}{\eta_0^{(i)}} \right)^{-1} \left\{ \left[ 3\alpha \nu \left( D_{12} n_0^{(e)2} L m_1 R \left( 1 + \frac{2K_T^{(T)}}{R} \right) - 2\kappa_0^{(e)} K_n^{(T)} T_0^{(e)} n_2^{(e)} \right) \frac{\partial C_{1s}^{(e)}}{\partial T^{(i)}} + \right. \right. \\
& + 3D_{12} n_0^{(e)} \left( 2\kappa_0^{(e)} + \kappa_0^{(i)} \left( 1 + \frac{2K_T^{(T)}}{R} \right) \right) \right] \left( 1 + \frac{\beta_D}{R} \right) D_{12} K_{DSI} + \\
& + 3\alpha \nu \left[ D_{12} n_0^{(e)2} L m_1 R + n_2^{(e)} K_n^{(T)} T_0^{(e)} \kappa_0^{(i)} \right] \left( 1 + \frac{\beta_T}{R} \right) \frac{K_{TSI}}{T_0^{(e)}} + \\
& + \frac{\alpha \nu R}{\eta_0^{(i)}} \left[ n_0^{(e)2} D_{12} L m_1 R \left( 1 + \frac{2K_T^{(T)}}{R} \right) - 2n_2^{(e)} \kappa_0^{(e)} K_n^{(T)} T_0^{(e)} \right] \frac{\partial \sigma}{\partial T^{(i)}} -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -3\alpha\nu R \left( 2\kappa_0^{(e)} + \kappa_0^{(i)} \left( 1 + \frac{2K_T^{(T)}}{R} \right) \right) \left( \frac{1}{2} + \frac{3C^*}{R} + \frac{\eta_0^{(e)}}{\eta_0^{(i)}} \right) \frac{D_{12}n_0^{(e)2} m_1}{\rho_0^{(e)}} \left\{ \frac{1}{Z} \right. \\
& \quad \left. - D_{12} \frac{n_0^{(e)2} m_1}{n_2^{(e)} \rho_0^{(e)}} \right\} \left( C_{1\infty}^{(e)} - C_{1s}^{(e)} \right), \\
\varphi_2 = & \left( \frac{\eta_0^{(e)}}{\eta_0^{(i)}} + \frac{3C^*}{R} + \frac{3}{2} \right)^{-1} \left\{ \frac{1}{T_0^{(e)}} \left( 1 + \frac{\beta_T}{R} \right) \right\} \left[ \left( 6n_2^{(e)} T_0^{(e)} K_n^{(T)} \kappa_0^{(e)} \frac{\partial C_{1s}^{(e)}}{\partial T^{(i)}} - \right. \right. \\
& - 6D_{12}n_0^{(e)2} Lm_1 K_T^{(T)} \frac{\partial C_{1s}^{(e)}}{\partial T^{(i)}} - 3n_2^{(e)} R \left( \kappa_0^{(e)} + \kappa_0^{(i)} \frac{K_T^{(T)}}{R} \right) \left. \right] \alpha\nu - 6D_{12}n_0^{(e)} \times \\
& \times \left( \kappa_0^{(e)} + \kappa_0^{(i)} \frac{K_T^{(T)}}{R} \right) \left[ K_{TSl} - 3D_{12} \left( 1 + \frac{\beta_D}{R} \right) \alpha\nu \kappa_0^{(e)} n_2^{(e)} R \frac{\partial C_{1s}^{(e)}}{\partial T^{(i)}} K_{Dsl} + \right. \\
& \left. + \frac{\kappa_0^{(e)} R}{\eta_0^{(i)}} \left( \alpha\nu \left( 2n_2^{(e)} T_0^{(e)} K_n^{(T)} \frac{\partial C_{1s}^{(e)}}{\partial T^{(i)}} - n_2^{(e)} R \right) - 2D_{12}n_0^{(e)} \right) \frac{\partial \sigma}{\partial T^{(i)}} - \right. \\
& \left. - \frac{2D_{12}n_0^{(e)2} m_1 \alpha\nu \kappa_0^{(e)} R}{\rho_0^{(e)}} \left( \frac{\eta_0^{(e)}}{\eta_0^{(i)}} + \frac{3C^*}{R} + \frac{1}{2} \right) \frac{\partial C_{1s}^{(e)}}{\partial T^{(i)}} \right] \frac{1}{\Phi} \left( T_{\infty}^{(e)} - T_0^{(e)} \right).
\end{aligned}$$

Из уравнения теплового баланса определим температуру поверхности крупной капли:

$$\left( -\kappa_0^{(e)} \frac{\partial T^{(e)}}{\partial r} + \kappa_0^{(i)} \frac{\partial T^{(i)}}{\partial r} \right) \Big|_{r=R_d} = Lm_1 \frac{n_0^{(e)2} m_2}{\rho_0^{(e)}} D_{12} \frac{\partial C_1^{(e)}}{\partial r} \Big|_{r=R_d}. \quad (13)$$

Распределение температуры внутри капли описывается уравнением Лапласа:

$$\Delta T^{(i)} = 0.$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$T^{(i)} = -\frac{B_{1i}}{r} + B_{2i}.$$

Так как температура в центре капли конечна, полагаем

$$B_{1i} = 0.$$

Тогда

$$T^{(i)} = B_{2i} = \text{const}.$$

Следовательно,

$$\frac{\partial T^{(i)}}{\partial r} = 0. \quad (14)$$

Из решения уравнений (10), (11), (13) и (14) найдём связь между скачками температуры и концентрации:

$$T_{\infty}^{(e)} - T_0^{(e)} = \frac{Lm_1m_2n_0^{(e)2}}{\kappa_0^{(e)}\rho_0^{(e)}} D_{12} (C_{1s}^{(e)} - C_{1\infty}^{(e)}). \quad (15)$$

Рассматривая совместно (8) и (9) можно заметить, что

$$Z = -\Phi. \quad (16)$$

Выражение  $\Phi_1 + \Phi_2$ , входящее в (12), можно записать с учётом (14) и (15):

$$\begin{aligned} \Phi_1 + \Phi_2 = & \left[ \left( \frac{3}{2} + \frac{3C^*}{R} + \frac{\eta_0^{(e)}}{\eta_0^{(i)}} \right)^{-1} \left\{ 3\alpha v \left( D_{12}n_0^{(e)2} Lm_1R \left( 1 + \frac{2K_T^{(T)}}{R} \right) - 2\kappa_0^{(e)} K_n^{(T)} T_0^{(e)} n_2^{(e)} \right) \times \right. \\ & \times \frac{\partial C_{1s}^{(e)}}{\partial T^{(i)}} + 3D_{12}n_0^{(e)} \left( 2\kappa_0^{(e)} + \kappa_0^{(i)} \left( 1 + \frac{2K_T^{(T)}}{R} \right) \right) \left. \right] \left( 1 + \frac{\beta_D}{R} \right) D_{12}K_{DSI} + \\ & + 3\alpha v \left[ D_{12}n_0^{(e)2} Lm_1R + n_2^{(e)} K_n^{(T)} T_0^{(e)} \kappa_0^{(i)} \right] \left( 1 + \frac{\beta_T}{R} \right) \frac{K_{TSI}}{T_0^{(e)}} + \\ & + \frac{\alpha v R}{\eta_0^{(i)}} \left[ n_0^{(e)2} D_{12} Lm_1R \left( 1 + \frac{2K_T^{(T)}}{R} \right) - 2n_2^{(e)} \kappa_0^{(e)} K_n^{(T)} T_0^{(e)} \right] \frac{\partial \sigma}{\partial T^{(i)}} - \\ & - 3\alpha v R \left( 2\kappa_0^{(e)} + \kappa_0^{(i)} \left( 1 + \frac{2K_T^{(T)}}{R} \right) \right) \left( \frac{1}{2} + \frac{3C^*}{R} + \frac{\eta_0^{(e)}}{\eta_0^{(i)}} \right) \frac{D_{12}n_0^{(e)2} m_1}{\rho_0^{(e)}} \left. \right\} - \\ & - \left( \frac{3}{2} + \frac{3C^*}{R} + \frac{\eta_0^{(e)}}{\eta_0^{(i)}} \right) Z D_{12} \frac{n_0^{(e)2} m_1}{n_2^{(e)} \rho_0^{(e)}} - \left\{ \frac{1}{T_0^{(e)}} \left( 1 + \frac{\beta_T}{R} \right) \left[ \left( 6n_2^{(e)} T_0^{(e)} K_n^{(T)} \kappa_0^{(e)} \frac{\partial C_{1s}^{(e)}}{\partial T^{(i)}} - \right. \right. \right. \\ & - 6D_{12}n_0^{(e)2} Lm_1K_T^{(T)} \frac{\partial C_{1s}^{(e)}}{\partial T^{(i)}} - 3n_2^{(e)} R \left( \kappa_0^{(e)} + \kappa_0^{(i)} \frac{K_T^{(T)}}{R} \right) \right] \alpha v - 6D_{12}n_0^{(e)} \times \\ & \times \left. \left( \kappa_0^{(e)} + \kappa_0^{(i)} \frac{K_T^{(T)}}{R} \right) \right] K_{TSI} - 3D_{12} \left( 1 + \frac{\beta_D}{R} \right) \alpha v \kappa_0^{(e)} n_2^{(e)} R \frac{\partial C_{1s}^{(e)}}{\partial T^{(i)}} - K_{DSI} + \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\kappa_0^{(e)} R}{\eta_0^{(i)}} \left( \alpha v \left( 2n_2^{(e)} T_0^{(e)} K_n^{(T)} \frac{\partial C_{1s}^{(e)}}{\partial T^{(i)}} - n_2^{(e)} R \right) - 2D_{12} n_0^{(e)} \right) \frac{\partial \sigma}{\partial T^{(i)}} - \\
& - \frac{2D_{12} n_0^{(e)2} m_1 \alpha v \kappa_0^{(e)} R \left( \frac{\eta_0^{(e)}}{\eta_0^{(i)}} + \frac{3C^*}{R} + \frac{1}{2} \right) \frac{\partial C_{1s}^{(e)}}{\partial T^{(i)}} \left\{ \frac{L m_1 m_2 n_0^{(e)2} D_{12}}{\kappa_0^{(e)} \rho_0^{(e)}} \right\} \frac{C_{1\infty}^{(e)} - C_{1s}^{(e)}}{Z}.
\end{aligned}$$

Формула (12) показывает направления движения аэрозольных частиц, и соответственно, определяет, какой процесс происходит – захват или вымывание, что зависит от знака суммы  $(\varphi_1 + \varphi_2)$ . Если сумма отрицательна – происходит вымывание, если положительна – то захват.

Используя соотношение:

$$t = \int_{R_d}^{R_V} \frac{dr}{U_r} = \frac{R_V^2 (R_V - R_d)}{(\varphi_1 + \varphi_2) R_d},$$

найдем выражение для времени полной очистки объема  $V$  от аэрозольных частиц. Пренебрегая значением  $R_d$  по сравнению с  $R_V$ , перепишем это выражение в виде:

$$t \approx \frac{R_V^3}{(\varphi_1 + \varphi_2) R_d}. \quad (18)$$

Для примера рассмотрим паровоздушную смесь «N<sub>2</sub> – H<sub>2</sub>O». Подставляем известные числовые данные [8–10] в (17):

$$T_0^{(e)} = 300 \text{ К}; \quad \eta_0^{(e)} = 1,79 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}; \quad \eta_0^{(i)} = 8,2 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}; \quad \kappa_0^{(e)} = 2,4 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}};$$

$$\kappa_0^{(i)} = 5,9 \cdot 10^{-1} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; \quad n_0^{(e)} = 1,86 \cdot 10^{25} \frac{1}{\text{м}^3}; \quad n_2^{(e)} = 4,84 \cdot 10^{24} \frac{1}{\text{м}^3}; \quad d_m = 3,8 \cdot 10^{-8} \text{ м};$$

$$\rho_0^{(e)} = 1,25 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad m_1 = 2,006 \cdot 10^{-27} \text{ кг}; \quad L = 2,48 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}; \quad v = \sqrt{\frac{kT_0^{(e)}}{2\pi m_1}};$$

$$D_{12} = 2,3 \cdot 10^{-5}; \quad \lambda = \frac{1}{2\pi d_m^2 n_0^{(e)}}; \quad C^* = 1,126\lambda; \quad K_T^{(T)} = 1,85\lambda; \quad K_n^{(T)} = 5,91\lambda; \quad \beta_1 = 3,731\lambda;$$

$$\beta_2 = 1,5723\lambda; \quad \frac{\partial C_{s1}^{(e)}}{\partial T^{(i)}} = 6,5 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{К}}; \quad K_{TSl} = 1,16; \quad K_{DSL} = 0,3; \quad \frac{\partial \sigma}{\partial T^{(i)}} = -0,168 \frac{\text{Н}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Рассчитаем по формуле (18) время полной очистки заданного объема при различных значениях коэффициента испарения и радиуса (см. табл. 1). В [11] указано, что радиус дождевых капель облачных систем меняется от 1 до 50 мкм.

Таблица 1.

Время очистки заданного объёма при различных значениях коэффициента испарения и радиуса капель

$R_d = 10^{-5} \text{ м}$					
$R, \text{ мкм}$	$t, \text{ мин}$				
	$\alpha = 0$	$\alpha = 0,25$	$\alpha = 0,5$	$\alpha = 0,75$	$\alpha = 1$
0,2	777,8	766,3	758,7	753,3	749,8
0,4	590,3	577,3	571,7	568,2	566,2
0,6	512,3	499,7	495,3	492,5	491,2
0,8	463,7	451,3	447,5	445,7	444,7
1	428,2	416,2	413	411,7	410,8
2	322,5	313,5	312	311,5	311,2
4	226,5	220,3	219,8	219,5	219,5
6	178,7	174,2	173,8	173,7	173,8
8	149,8	146,2	146,1	146	146
10	130,9	127,8	127,7	127,6	127,7
$R_d = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$					
$R, \text{ мкм}$	$t, \text{ мин}$				
	$\alpha = 0$	$\alpha = 0,25$	$\alpha = 0,5$	$\alpha = 0,75$	$\alpha = 1$
0,2	311,2	306,5	303,5	302	300
0,4	236,2	230,8	228,7	227	226,5
0,6	205	199,8	198,2	198	196,5
0,8	185,5	180,5	179	178	177,8
1	171,2	166,5	165,2	164	164
2	129	125,4	124,8	125	124,5
4	90,6	88,2	88	88,4	87,9
6	71,5	69,7	69,6	69	69,5
8	60	58,5	58,5	58,7	58,4
10	52,3	51,1	51,1	51	51,1
$R_d = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$					
$R, \text{ мкм}$	$t, \text{ мин}$				
	$\alpha = 0$	$\alpha = 0,25$	$\alpha = 0,5$	$\alpha = 0,75$	$\alpha = 1$
0,2	155,6	153,3	151,7	150,7	150
0,4	118,1	115,5	114,4	113,6	113,2
0,6	102,4	100	99	98,5	98,2
0,8	92,8	90,3	89,5	89,2	89
1	85,6	83,2	82,6	82,3	82,2
2	64,5	62,7	62,4	62,3	62,3
4	45,3	44,1	44	43,9	43,9
6	35,7	34,8	34,8	34,8	34,8
8	30	29,3	29,2	29,2	29,2
10	26,2	25,6	25,5	25,5	25,5

Построим зависимость времени очистки от радиуса аэрозоля (см. рис. 1). Очистим область радиуса  $R_V = 1$  см, радиус вымывающей капли  $R_d = 100$  мкм, коэффициент испарения  $\alpha = 0,5$ , радиус частиц вымываемого аэрозоля  $R \in (10^{-7} \text{ м}, 5 \cdot 10^{-5} \text{ м})$ .

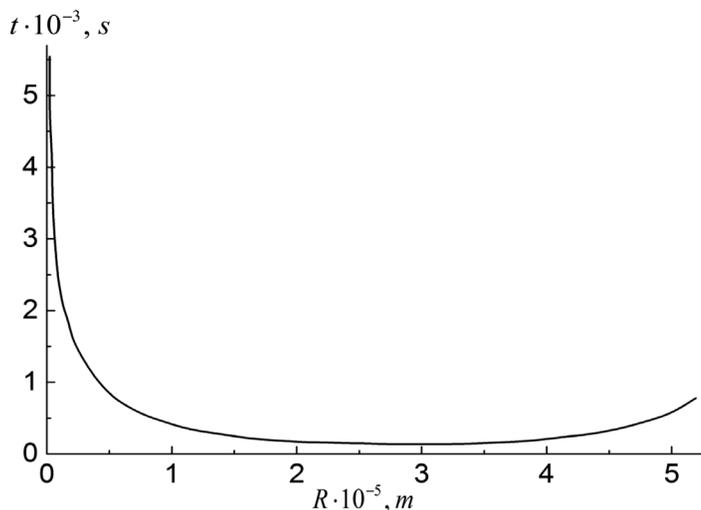


Рис. 1. График зависимости времени полной очистки заданного объема от радиуса аэрозоля

График показывает, что при определённом радиусе аэрозольных частиц время полной очистки рассматриваемого объёма минимально.

*Статья поступила в редакцию 14.05.2018 г.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Sow M., Lemaitre P., The effect of electrostatic charges on the removal of radioactive aerosols in the atmosphere by raindrops // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 646. P. 012011.
2. Jerabek–Willemsen M., Timon A., et al. MicroScale Thermophoresis: Interaction analysis and beyond // Journal of Molecular Structure. 2014, Vol. 1077. pp. 101–113.
3. Ruo-Yu Dong, Yi Zhou, Chun Yang, Bing-Yang Cao. Experimental study on thermophoresis of colloids in aqueous surfactant solutions // Journal of Physics: Condensed Matter. 2015. Vol. 27. No. 49. P. 495102.
4. Mirnah Binti Suardi, Mohd Azahari bin Razali, et al. Development for Thermophoresis Experimental Under Microgravity Condition // IOP Conference Series: Material Science and Engineering. 2016. Vol. 160. P. 012034.
5. Lin Li, Yongyue Jiang, Aixin Chen. Numerical simulation of nanofluids based on power-law fluids with flow and heat transfer // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 61. P. 012106.
6. Яламов Г.Ю. Теория термодиффузиофореза аэрозольных частиц при прямом влиянии коэффициента испарения: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2005.

7. Ставцева О.В. Термодиффузиофоретическое вымывание умеренно крупных летучих аэрозольных частиц каплями // Всероссийский институт научной и технической информации РАН. 16.07.2007. № 733. В2007. С. 12
8. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1971. 720 с.
9. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
10. Галоян В.С., Яламов Ю.И. Динамика капель в неоднородных вязких средах. Ереван: Луйс, 1985. 208 с.
11. Облака и облачная атмосфера. Справочник / под ред. И.П. Мазина, А.Х. Хргиана. Ленинград. Гидрометеиздат. 1989. 647 с.

### REFERENCES

1. Sow M., Lemaitre P. The effect of electrostatic charges on the removal of radioactive aerosols in the atmosphere by raindrops. In: *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, vol. 646, P. 012011.
2. Jerabek-Willemsen M., Timon A., et al. MicroScale Thermophoresis: Interaction analysis and beyond. In: *Journal of Molecular Structure*. 2014, vol. 1077, pp. 101-113.
3. Ruo-Yu Dong, Yi Zhou, Chun Yang, Bing-Yang Cao. Experimental study on thermophoresis of colloids in aqueous surfactant solutions. In: *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2015, vol. 27, no. 49, P. 495102.
4. Mirnah Binti Suardi, Mohd Azahari bin Razali, et al. Development for Thermophoresis Experimental Under Microgravity Condition. In: *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, 2016, vol. 160, P. 012034.
5. Lin Li, Yongyue Jiang, Aixin Chen. Numerical simulation of nanofluids based on power-law fluids with flow and heat transfer. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 61, P. 012106.
6. Yalamov G.Yu. *Teoriya termodiffuzioforeza aerazol'nykh chastits pri pryamom vliyanii koef-fitsienta ispareniya: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk* [Theory thermofusive aerosol particles in the direct influence of the evaporation coefficient: PhD thesis in Physical and Mathematical Sciences]. Moscow, 2005.
7. Stavtseva O.V. Termodiffuzioforeticheskoe vymyvaniye umerenno krupnykh letuchikh aerazol'nykh chastits kaplyami [Thermofusion-phoretic washing of moderately large volatile aerosol particles with droplets]. In: *Vserossiiskii institut nauchnoi i tekhnicheskoi informatsii RAN* [All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences], 16.07.2007, no. 733. В2007, pp. 12.
8. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam gazov i zhidkosti* [Handbook on thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 720 p.
9. Grigor'ev I.S., Meilikhov E.Z., ed. *Fizicheskie velichiny: Spravochnik*. [Handbook of physical quantities]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 1232 p.
10. Galoyan V.S., Yalamov Yu.I. *Dinamika kapel' v neodnorodnykh vyazkikh sredakh* [Dynamics of droplets in an inhomogeneous viscous media]. Yerevan, Luis Publ., 1985. 208 p.
11. Mazin I.P., Khrgian A.H. *Oblaka i oblachnaya atmosfera. Spravochnik* [Clouds and cloud atmosphere. Reference book]. Leningrad. Gidrometeoizdat, 1989. 647 p.

---

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Чаусова Ольга Владимировна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики и естественнонаучных дисциплин Технологического университета;  
e-mail: Chausova.ov@ut-mo.ru

### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

*Olga V. Chausova* – PhD in Physical and Mathematical Sciences, associate professor at the Department of Mathematics and Natural Science Disciplines, University of Technology;  
e-mail: Chausova.ov@ut-mo.ru

---

### ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Чаусова О.В. К вопросу о вымывании летучих умеренно крупных аэрозольных частиц испаряющимися каплями при числах Рейнольдса и Пекле много меньших единицы // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2018. № 2. С. 82–93.

DOI: 10.18384/2310-7251-2018-2-82-93.

### FOR CITATION

Chausova O.V. To the problem of washing flying moderately large aerosol particles by evaporating drops with Reynolds and Peclet numbers much less than unity. In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*. 2018. no. 2. pp. 82–93.

DOI: 10.18384/2310-7251-2018-2-82-93.