

ОСОБЕННОСТИ КОАГУЛЯЦИИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ С РАДИОАКТИВНОЙ ПРИМЕСЬЮ*

В.А. Загайнов, В.В. Максименко,
А.Б. Леонтьев, Н.В. Трубицина, Д.В. Водяник

В статье рассмотрено решение актуальной проблемы физикохимической дисперсной среды – о перераспределении радиоактивных примесей среди аэрозольных частиц. Это перераспределение происходит из-за кинетических процессов, которые протекают в аэрозольной системе и приводят к изменению дисперсного состава и концентрации. Рассмотрены различные режимы столкновения частиц, в том числе и протекающие в реальных условиях. Для проверки корректности численного моделирования полученные решения сопоставлены с решениями, рассчитанными для наиболее простых режимов столкновения, для которых могут быть получены аналитические решения. Показано, что численные решения соответствуют для этих случаев аналитическим решениям, кроме этого, выполняется закон сохранения массы системы. Результаты моделирования могут быть применены для моделирования аварийных ситуаций на АЭС и других промышленных объектах, где используются радиоактивные источники.

Ключевые слова: коагуляция, дисперсные системы, радиоактивные примеси, численное моделирование, аэрозольные частицы.

SPECIALTIES OF AEROSOL PARTICLES COAGULATION WITH RADIOACTIVE ADMIXTURES

V.A. Zagaynov, V.V. Maksimenko,

The paper presents the results of coagulation processes modelling in the mixed system of aerosol particles (both neutral and radioactive). The collisions between neutral and radioactive particles lead to inverse neutral particles into radioactive state. The examples of modelling are presented in the linear and logarithmic scales of particle sizes. Linear scale provides better accuracy of calculation results, while logarithmic scale gives the opportunity to advance along the size axis by several orders of magnitude by relatively small number of equations. The scenarios of real processes – free molecular collision mode (when particle size is much less than free path length) and brownian mode (when particle size is comparable with free path length) – are presented.

Keywords: coagulation processes, modelling, aerosol particles, radioactive particles, collisions.

Введение

Развитие промышленности связано, прежде всего, с решением проблем энергетики и ее воздействия на окружающую среду. В особенности это касается атомной энергетики, поскольку у населения имеется небезосновательная радиофобия, вызванная авариями на американских АЭС, в Чернобыле и, наконец, в Фукусиме.

В таких условиях на первый план выходят проблемы, связанные с прогнозами возможных ситуаций на АЭС и других предприятиях энергетического комплекса, где используются радиоактивные вещества. В связи с этим необходим непрерывный мониторинг радиационной обстановки и ясное понимание сценариев развития любых нештатных ситуаций. Это, в свою

* Авторы выражают благодарность РФФИ за поддержку проекта № 14-03-00507, в рамках которого выполнялась настоящая работа

очередь, ставит задачи моделирования постакарийных ситуаций различного масштаба для своевременного принятия адекватных мер. Результаты такого моделирования должны быть внесены в соответствующие регламенты. В таких аварийных ситуациях ключевая роль отводится аэрозольным частицам, которые несут на себе радиоактивные примеси.

Как известно, аэрозольные частицы представляют собой транспортное средство для переноса различного рода примесей в газовой среде [1–4], это касается и радиоактивных частиц [5]. Одна из особенностей коагулирующей системы сводится к тому, что она не может находиться в состоянии равновесия, и если в ней отсутствуют источники новых частиц, то через некоторое время она исчезает. В атмосфере, поскольку в ней присутствует множество источников и стоков, постоянно имеются частицы различных размеров и химического состава, что определяется их прошлой историей. Поэтому для контроля дисперсного и химического состава частиц в атмосфере необходимо знать расположение и мощность источников частиц, понимать, как частицы образуются и изменяются вследствие различных кинетических процессов [2, 4, 5]. Особое внимание привлекают радиоактивные частицы, оказывающие существенное влияние на здоровье людей [6]. Это заставляет не только производить измерения активности частиц, но и производить расчеты, позволяющие предсказывать изменения в дисперсной системе. В работе [7] представлены результаты расчетов изменения фазового состава частиц в смешанном переохлажденном облаке, в котором превращение из жидкого состояния в твердое происходит за счет коагуляции частиц. Аналитически задача была решена для модельных ядер коагуляции с учетом химических реакций и золь-гель перехода [8, 9], однако это не дает возможности решать практически значимые задачи. Аналогичные кинетические процессы происходят и в системе с примесью радиоактивных частиц, в которой радиоактивные частицы перераспределяются по частицам разных размеров. Предсказывать эти процессы необходимо для принятия корректных решений по их улавливанию и осаждению, поскольку кинетика частиц существенно зависит от их размера.

Цель настоящей работы заключается в разработке математической модели процессов

коагуляции в смешанной системе аэрозольных частиц, позволяющей прогнозировать сценарии эволюции аэрозольной системы, содержащей радиоактивные примеси, перераспределяющиеся по частицам различных размеров.

Постановка задачи

Рассмотрим систему мономеров в газовой фазе, которые могут сталкиваться друг с другом, образуя при этом более сложные частицы, состоящие из нескольких мономеров. Будем считать, что число частиц в системе $N \rightarrow \infty$, в то же время $\frac{N}{V}$ – конечная величина, где V – объем системы, это так называемый термодинамический предел. Таким образом, через некоторое время в системе возникнут частицы самых разных размеров – от 1 до как угодно больших (размером частиц будем называть количество мономеров, входящих в частицу). Для описания этих процессов используется система кинетических уравнений Смолуховского [1–4, 10]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_g}{\partial t} = & I(g) + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{g-1} K(g-n, n) c_{g-n} c_n - \\ & - c_g \sum_{m=1}^{\infty} K(g, m) c_m, \quad g=1, \dots, \infty. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь c_g – концентрация частиц с размером g мономеров (в частности количеством молекул в частице); $I(g)$ – источник частиц размером g ; $K(g, n)$ – частота столкновений частиц с размером g и n мономеров. Считается, что после столкновения частицы объединяются в одну частицу.

Если размер частиц ничем не ограничивается, то эта система бесконечного числа уравнений. Учитывая, что масса системы остается ограниченной, можно предположить, что, начиная с некоторого большого числа частиц в мономере G , концентрация частиц в этих классах частиц становится пренебрежимо малой. Для нахождения решений следует систему уравнений (1) дополнить начальными условиями.

Такая дискретная система дифференциальных уравнений совершенно понятна с физической точки зрения. С помощью системы уравнений (1) можно утверждать, что скорость изменения концентрации частиц размером g определяется: (i) скоростью поставки этих частиц источником $I(g)$; (ii) скоростью объеди-

нения частиц размером ($g-n$) и n ; (iii) скоростью ухода частиц из размера g за счет столкновения со всеми другими частицами.

В принципе эта система уравнений готова для интегрирования и получения соответствующего решения. Однако для того, чтобы получить решения для измеряемых размеров, приходится решать систему из 10^{10} – 10^{12} дифференциальных уравнений. Это неразумно большое число уравнений, поэтому приходится вводить приближения, которые позволяют сократить их. Один из подходов сводится к изменению линейного масштаба по оси размеров логарифмическим масштабом, что позволяет сократить 10^{12} уравнений до 30 дифференциальных уравнений, что вполне приемлемо для современных математических программ с учетом современных компьютеров [11, 12]. С этой целью ось размеров g представим в логарифмическом масштабе и, как увидим в дальнейшем, получается наиболее простая система уравнений, если выбрать способ удвоения размеров. При получении уравнений удобнее использовать интегральное представление уравнений (1) системы коагулирующих частиц в виде одного интегрального уравнения, где суммирование заменено интегрированием [10]:

$$\frac{\partial c(g)}{\partial t} = I(g) + \frac{1}{2} \int_0^g K(g-n, n) c(g-n) c(n) dn - \\ - c(g) \int_0^\infty K(g, n) c(n) dn. \quad (2)$$

Здесь с целью математического удобства пренебрегают тем, что размер частиц начинается с 1 (одного мономера или молекулы), и отсчет начинается с 0 – это чисто формальная процедура, не влияющая на точность решения. Следует также учесть, что максимальный размер частицы в реальной системе ограничен, например, размером G . Это уравнение также следует дополнить начальными условиями.

Для систем уравнений (1) и (2) существует набор аналитических точных решений, однако эти решения не относятся к реально существующим зависимостям $K(g, n)$, которые отражают частоты столкновений, соответствующие диапазону размеров от $g \approx 1$ до $g \approx 10^{12}$. Количество уравнений следует ограничить до разумных значений, для чего разобьем ось размеров на фракции в логарифмическом масштабе на ограниченное количество фракций. Выде-

лим интервал размеров между g_i и g_{i+1} . Введем новую величину N_i с помощью уравнения:

$$N_i = \int_{g_i}^{g_{i+1}} c(g) dg. \quad (3)$$

Теперь ось размеров частиц будет разбита на интервалы, каждый из которых определяется индексом i .

С учетом этого обозначения подействуем оператором $\int_{g_i}^{g_{i+1}} dg$ на обе части уравнения (2), в результате получим систему дифференциальных уравнений для этих интервалов:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_i}{\partial t} = & \int_{g_i}^{g_{i+1}} dg I(g_i) + \\ & + \frac{1}{2} \int_{g_i}^{g_{i+1}} dg \int_0^g dn K(g-n, n) c(g-n) c(n) - \\ & - \int_{g_i}^{g_{i+1}} dg c(g) \int_0^\infty dn K(g, n) c(n) dn. \end{aligned} \quad (4)$$

Теперь оба интеграла правой части (4) следует выразить через концентрации фракций $N_i N_j$ в соответствии с определением (3). Последний интеграл правой части (4) легко преобразуется в сумму, если учесть теорему Коши о среднем значении и вынести среднее значение из-под знака интеграла, а также учесть соотношение (3):

$$\int_{g_i}^{g_{i+1}} c(g) dg \int_0^\infty dn K(g, n) c(n) dn = \sum_{j=1}^J K_{ij}^0 N_i N_j; \quad (5)$$

$$K_{ij}^0 = \frac{1}{g_{i+1} - g_i} \frac{1}{g_{j+1} - g_j} \int_{g_i}^{g_{i+1}} dg \int_{g_j}^{g_{j+1}} K(g, n) dn.$$

Для расчета второго слагаемого в правой части соотношения (4) и удобному решению этого уравнения, его следует привести к виду

$$\begin{aligned} \int_{g_i}^{g_{i+1}} dg \int_0^g dn K(g-n, n) c(g-n) c(n) = \\ = \int_{x+y \geq g_i}^{x+y \leq g_{i+1}} K(x, y) c(x) c(y) dx dy. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь произведена замена переменных ($g \rightarrow x$, $g-n \rightarrow y$), чтобы удобнее было производить интегрирование по площади.

Далее, пользуясь теоремой Коши о среднем значении и соотношением (3), среднее значение концентрации, как и в случае (5), вынесем

за знак интеграла, при этом выражение (4) приобретает вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_i}{\partial t} = & I(g_i) + \frac{1}{2} K_{i-1,i-1}^0 N_{i-1}^2 + \\ & + \sum_{j=1}^{i-2} K_{i-1,j}^1 N_{i-1} N_j - \sum_{j=1}^{i-1} K_{i,j}^1 N_i N_j - \\ & - \sum_{j=i}^J K_{i,j}^0 N_i N_j. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь использованы такие обозначения:

$$\begin{aligned} I(g_i) = & \int_{g_i}^{g_{i+1}} I(g) dg; \\ K_{i,j}^1 = & \frac{1}{g_{i+1} - g_i} \frac{1}{g_{j+1} - g_j} \times \\ & \times \int_{g_i}^{x+y < g_{i+1}} \int_{g_j} K(x, y) c(x) c(y) dx dy. \end{aligned} \quad (8)$$

В таком виде система готова к интегрированию, и, применяя соответствующий алгоритм, например, метод Рунге-Кутта, учитывая начальные условия

$$N_i(t=0) = N_i(0), \quad (9)$$

можно получить эволюцию во времени концентрации коагулирующих частиц. Корректность этого подхода к решению уравнения коагуляции была проверена на режимах коагуляции, допускающих аналитическое решение [2, 10], для: (i) $K(x, y) = 1$; (ii) $K(x, y) = x + y$; (iii) $K(x, y) = xy$.

Оказалось, что эта схема хорошо работает, и ее можно применять для режимов коагуляции, которые не допускают аналитического решения [7, 11]. При этом предполагается, что частицы отличаются друг от друга только размерами. Если часть частиц несет на себе радиоактивность, то при коагуляции эта радиоактивность будет распределяться по всей системе. В этом случае частицы отличаются друг от друга не только размерами, но и радиоактивностью, которую переносят на себе некоторые частицы. С этой целью введем обозначение: $c^1(g)$ – концентрация радиоактивных частиц размером g мономеров.

Предполагается, что кинетика частиц определяется только их размером и не зависит от радиоактивности. В этом случае для того, чтобы учесть их коагуляцию и столкновения с другими частицами, в том числе и нейтральными, необходимо дополнить уравнение (1) или

(2) уравнениями, учитывающими столкновения между радиоактивными и нейтральными частицами:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c(g)}{\partial t} = & I(g) + \frac{1}{2} \int_0^g K(g-n, n) c(g-n) c(n) dn - \\ & - c(g) \int_0^\infty K(g, n) c(n) dn - c(g) \int_0^\infty K(g, n) c^1(n) dn; \\ \frac{\partial c^1(g)}{\partial t} = & I^1(g) + \frac{1}{2} \int_0^g K(g-n, n) c^1(g-n) c^1(n) dn - \\ & - c^1(g) \int_0^\infty K(g, n) c^1(n) dn + \\ & + \int_0^g K(g-n, n) c^1(g-n) c(n) dn - \\ & - c^1(g) \int_0^\infty K(g, n) c(n) dn. \end{aligned} \quad (10)$$

Эта система уравнений учитывает коагуляцию частиц как нейтральных, так и радиоактивных, а также коагуляцию между этими двумя модами. При этом учитывается, что при столкновении нейтральной частицы с радиоактивной образуется радиоактивная частица. Для того чтобы преобразовать эту систему к виду, удобному для интегрирования численными методами, необходимо проделать процедуру, которая была продемонстрирована выражениями (4)–(8). Опуская мелкие детали, применим эту процедуру к системе уравнений (10) и получим для скорости изменения фракции N_i

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_i}{\partial t} = & I(g_i) + \frac{1}{2} K_{i-1,i-1}^0 N_{i-1}^2 + \sum_{j=1}^{i-2} K_{i-1,j}^1 N_{i-1} N_j - \\ & - \sum_{j=1}^{i-1} K_{i,j}^1 N_i N_j - \sum_{j=i}^J K_{i,j}^0 N_i N_j - \sum_{j=1}^J K_{i,j}^0 N_i N_j^1; \\ \frac{\partial N_i^1}{\partial t} = & I^1(g_i) + K_{i-1,i-1}^0 (N_{i-1}^1)^2 + \\ & + \sum_{j=1}^{i-2} K_{i-1,j}^1 N_{i-1}^1 N_j^1 - \sum_{j=1}^{i-1} K_{i,j}^1 N_i^1 N_j^1 - \\ & - \sum_{j=i}^J K_{i,j}^0 N_i^1 N_j^1 - \sum_{j=1}^J K_{i,j}^0 N_i^1 N_j + \\ & + K_{i-1,i-1}^0 N_{i-1}^1 N_{i-1} + \sum_{j=1}^{i-2} K_{i-1,j}^1 (N_{i-1}^1 N_j + N_{i-1} N_j^1). \end{aligned} \quad (11)$$

Эти уравнения следует дополнить начальными условиями:

$$N_i(t=0) = N_i(0), \quad N_i^1(t=0) = N_i^1(0). \quad (12)$$

Полученная система дифференциальных уравнений (11) с начальными условиями (12) может быть использована для расчета зависимости концентрации от времени с учетом перераспределения радиоактивной примеси среди нейтральных частиц. Следующий шаг – это выбор способа разбиения оси размеров частиц таким образом, чтобы число уравнений было разумным, и в то же время была обеспечена достаточная точность получаемых решений. Как показали результаты, наиболее рациональной с точки зрения количества уравнений и точности полученного решения является схема удвоения [12]. Дальнейшее развитие этого подхода можно найти в работах [13,14]. Это позволяет сравнительно небольшим количеством уравнений (~30) обеспечить решение уравнения коагуляции в диапазоне размеров от 1 нм до 10 мкм – здесь удобнее перейти от размеров частиц, выраженных в количестве мономеров на частицу к диаметру частиц.

Результаты расчётов

На рисунках 1–2 показаны результаты расчетов процессов коагуляции в отсутствие радиоактивных частиц и на рис. 3–5 – с учетом примеси радиоактивных частиц. По осям координат: c – концентрация частиц (на рис. 3–5 по оси ординат использована логарифмическая шкала); t – время в безразмерных единицах. Они приведены для того, чтобы убедиться в адекватности представленной модели (уравнения (2) и (10)).

На рисунке 1 продемонстрирована корректность применяемого алгоритма расчетов. Пока процесс коагуляции не достиг самых больших частиц в системе, точнее, пока их концентрация не стала заметной, полная масса частиц остается неизменной. При этом из-за коагуляции монотонно уменьшается как полная концентрация частиц c , так и концентрации всех фракций.

На рисунке 2 представлены расчеты коагуляции дисперсной системы, в которой коагуляция происходит по закону $K(g, n) = gn$. Это ядро коагуляции обладает показателем однородности $\lambda = 2$, что приводит к определенным особенностям в поведении спектров размеров и концентраций [2, 13]. При этом концентрации и размеры частиц системы изменяются достаточно быстро по сравнению с предыдущим случаем, поэтому за одну единицу времени в безразмерных переменных концентрация самых больших частиц в системе становится заметной, они выводятся из системы, и полная

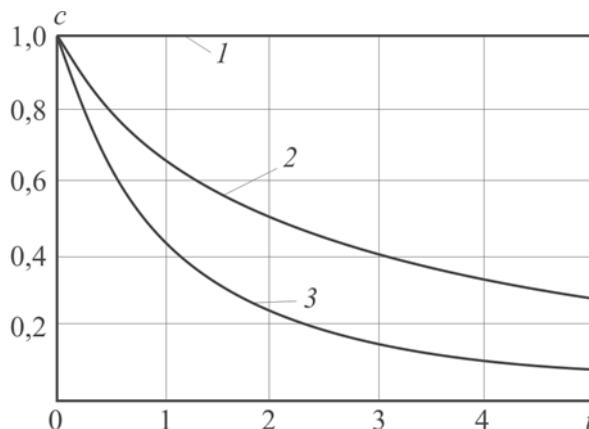


Рис. 1. Модельный расчет коагуляции

для частоты столкновений частиц $K = 1$:

1 – полная масса системы; 2 – полная концентрация частиц в системе; 3 – концентрация первой фракции частиц в системе

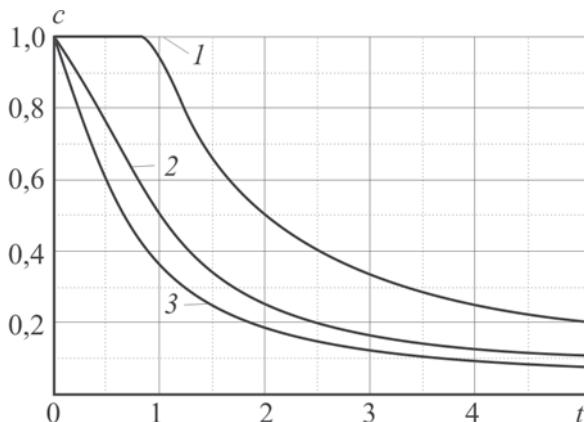


Рис. 2. Модельный расчет коагуляции

для частоты столкновений частиц

пропорциональной их объемам ($K = gn$):

1 – полная масса частиц в системе;
2 – полная концентрация частиц в системе;
3 – концентрация первой фракции

масса системы начинает убывать. Полученные результаты позволяют убедиться в корректности выбранного алгоритма расчетов.

График на рис. 3 демонстрирует поведение системы, содержащей наряду с нейтральными частицами и радиоактивные частицы, концентрация которых много меньше концентрации нейтральных. В начальный момент времени в системе существуют только нейтральные частицы самого малого размера ($g = 1$), концентрация которых в безразмерных единицах $c_1 = 1$, и радиоактивные частицы с размером $g = 10$ и концентрацией $c_{10}^1 = 0,01$ в безразмерных единицах. Как и в случае нейтральных частиц (рис. 2), через одну единицу времени в системе

появляются самые большие частицы, они выводятся из системы, и масса системы начинает убывать. Однако при этом за счет коагуляции между нейтральными и радиоактивными частицами в системе появляются радиоактивные частицы самых различных фракций, что приводит вначале к быстрому возрастанию концентрации радиоактивных частиц в промежуточных фракциях. Например, в начальный момент времени радиоактивных частиц с размером $g = 12$ не было, а спустя 0,1 единицы времени они появляются, однако, благодаря коагуляции, их концентрация через определенный промежуток времени начинает быстро убывать. При этом концентрация самых малых радиоактивных частиц также убывает со временем, как это видно на рисунке.

Перечисленные модельные расчеты приведены из тех соображений, что для них имеются точные аналитические решения [10], сопоставление которых с численными решениями может подтвердить их корректность, что и было сделано.

На рисунке 4 приведены решения системы уравнений для свободномолекулярного режима столкновений, который соответствует реальным ситуациям коагуляции самых

малых частиц – 1–60 нм. На рисунке видно, что полная масса системы сохраняется, пока самые большие частицы ее не покинут. Как и в предыдущем случае, предполагается, что в начальный момент времени в системе были радиоактивные частицы с размером $g = 10$, и их концентрация составляет $c_{10} = 0,01$. Результаты расчетов показывают, как эти частицы распределяются на примере концентрации частиц с $g = 12$.

На рисунке 5 показана аналогичная ситуация, где представлены расчеты коагуляции системы с радиоактивными частицами с режимом столкновения, соответствующей броуновской коагуляции. Режим столкновения относится к более крупным частицам – от 30 до 200 нм. На графике, представленном на рисунке, видно, что изменение со временем полной массы системы частиц происходит очень медленно.

Выводы

На основании результатов расчетов, представленных на рис. 1–5, можно сделать следующие выводы.

- Предлагаемая модель расчета коагулирующей смешанной системы с присутствием как нейтральных, так и радиоактивных частиц

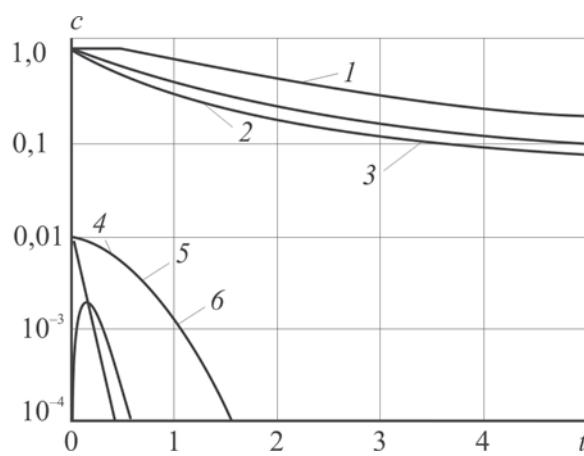


Рис. 3. Модельный расчет коагуляции для частоты столкновений частиц пропорциональной их объемам ($K = gn$) с учетом примеси радиоактивных частиц: 1 – полная масса системы; 2 – полная концентрация нейтральных частиц в системе; 3 – концентрация первой фракции нейтральных частиц; 4 – полная концентрация радиоактивных частиц; 5 – концентрация радиоактивных частиц самой легкой фракции; 6 – концентрация радиоактивных частиц промежуточной фракции

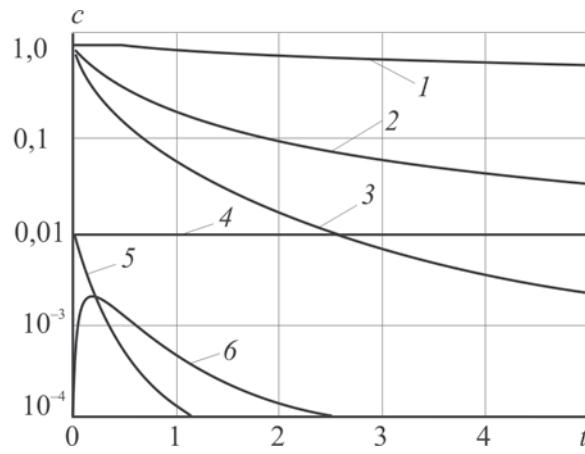


Рис. 4. Модельный расчет коагуляции для $K = (g^{1/3} + n^{1/3})^2(1/g + 1/n)^{1/2}$ – свободномолекулярный режим столкновения с учетом примеси радиоактивных частиц: 1 – полная масса системы; 2 – концентрация полной массы нейтральных частиц; 3 – концентрация нейтральных частиц первой фракции; 4 – концентрация радиоактивных частиц; 5 – концентрация радиоактивных частиц самой легкой фракции; 6 – концентрация радиоактивных частиц промежуточной фракции

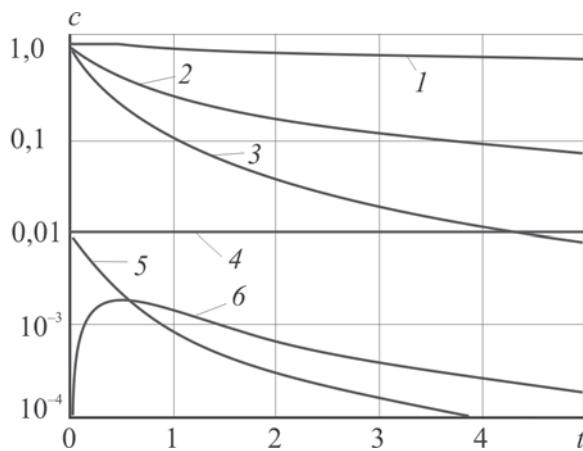


Рис. 5. Модельный расчет коагуляции для $K = (g^{1/3} + n^{1/3})(g^{-1/3} + n^{-1/3})$, – броуновский режим столкновения с учетом примеси радиоактивных частиц: 1 – полная масса всей системы; 2 – полная концентрация нейтральных частиц; 3 – концентрация нейтральных частиц первой фракции; 4 – полная масса радиоактивных частиц в системе; 5 – концентрация частиц первой фракции радиоактивных частиц; 6 – концентрация радиоактивных частиц промежуточной фракции

дает возможность предсказать изменения в такой системе.

2. В результате коагуляционных процессов при столкновении нейтральных и радиоактивных частиц происходит как изменение их распределения по размерам, так и перераспределение радиоактивности по нейтральным частицам, что приводит в первоначальный момент времени к увеличению концентрации радиоактивных частиц в промежуточных фракциях. Наряду с распространением радиоактивности по всей системе, незатронутыми остаются частицы, размеры которых меньше самых малых радиоактивных частиц.

3. Концентрация частиц, несущих на себе радиоактивность, если их начальная концентрация была много меньше концентрации нейтральных частиц, экспоненциально убывает со временем.

4. Полная масса системы во всех случаях изменяется со временем очень медленно, сохраняясь до тех пор, пока концентрация самых больших частиц в системе не становится сопоставимой с массой всей системы. Постепенно самые большие частицы начинают выводиться из системы, что сопровождается убыванием ее массы.

4. Предлагаемый алгоритм моделирования процессов коагуляции позволил провести рас-

четы для реально реализуемых процессов: при свободномолекулярном режиме столкновений, когда размер частиц намного меньше показателя однородности, и для броуновского режима, когда размер частиц сопоставим с показателем однородности.

Пользуясь этими результатами, можно предсказать распространение радиоактивности между нейтральными частицами, в частности, при моделировании аварийных ситуаций и при переносе этих частиц в атмосфере.

Заключение

Предложенные алгоритмы расчета процессов коагуляции в смешанной системе аэрозольных частиц позволяют спрогнозировать сценарий эволюции аэрозольной системы, содержащей радиоактивные примеси, при их перераспределении по частицам различных размеров.

Данные алгоритмы показали свою корректность на основании сопоставления с известными аналитическими решениями и могут быть использованы, в частности, для моделирования аварийных ситуаций на объектах энергетики и для прогнозирования их развития.

Представленные результаты универсальны, так как выполнены в безразмерных концентрациях и безразмерных временных периодах, что удобно для пользователя, поскольку позволяет привязать результаты расчетов в безразмерных величинах к любым размерным параметрам.

Список литературы

1. Fuchs N.A. The mechanics of aerosols. N.Y.: Pergamon Press. 1964. – 422 p.
2. Пискунов В.Н. Динамика аэрозолей. М.: Физматлит, 2010. – 296 с.
3. Friedlander S.K. Smoke, Dust and Haze, Fundamentals of Aerosol Dynamics. Oxford University Press, 2000. – 432 p.
4. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric Chemistry and Physics. N.Y.: Wiley, 2006. – 1203 p.
5. Аграновский И.Е., Алоян А.Е., Бирюков Ю.Г., Калашников Н.П., Лушников А.А., Максименко В.В. Мониторинг атмосферных аэрозольных радиоактивных загрязнений: аппаратное обеспечение и модельное сопровождение // Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. 2013. Т. 2. № 1. С. 5–12.
6. Загайнов В.А., Чуркин С.Л., Огородников Б.И. Исследование дисперсного состава и

- концентрации инертных атмосферных аэрозолей в 30-километровой зоне на ЧАЭС // Охрана окружающей среды, вопросы экологии и контроль качества продукции: науч.-техн. реферат. сборник. - М.: НИИТЭХИМ. 1992. Вып. 1. С. 25–31.
7. Загайнов В.А., Лушников А.А., Осидзе И.Г., Смидович К.П. Численное моделирование кинетики коагуляции в смешанном облаке // Известия АН СССР, серия ФАО. 1988. Т. 24. № 6. С. 622–629.
8. Lushnikov A.A. Evolution of Coagulating Systems. Coagulating Mixtures // Journal of Colloid and Interface Science. Vol. 54. No. 1. P. 94–101.
9. Lushnikov A.A. Composition distribution of particles in a gelling mixture // Phys. Rev. E. 2014. Vol. 89. 032121 (8pp).
10. Волощук В.М. Кинетическая теория коагуляции. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 284 с.
11. Жуланов Ю.В., Загайнов В.А., Лушников А.А., Любовцева Ю.С., Невский И.А., Стулов Л.Д. Высокодисперсный и субмикронный аэрозоль аридной зоны // Известия АН СССР, серия ФАО. 1986. Т. 22. № 5. С. 488–495.
12. Zagaynov V.A., Lushnikov A.A. Modelling of coagulating processes in the atmosphere. Lecture Notes Physics. 1988. P. 93–96.
13. Piskunov V.N., Golubev A.I., Goncharov E.A., Ismailova N.A. Kinetic modeling of composite particles coagulation // J. Aerosol Sci. 1997. Vol. 28. P. 1215–1231.
14. Piskunov V.N., Petrov A.M. Condensation /coagulation for mixture of liquid and solid particles: analytical solutions // J. Aerosol Sci. 2002. Vol. 33. P. 647–657.

Материал поступил в редакцию 23.03.15

**ЗАГАЙНОВ
Валерий Анатольевич**

E-mail: vzagaynov@yandex.ru
Тел.: (495) 237-15-53

Доктор физико-математических наук, профессор НИЯУ МИФИ. Сфера научных интересов – моделирование коагуляции и распространения аэродисперсных систем. Автор более 100 научных статей.

**МАКСИМЕНКО
Владимир Викторович**

E-mail: wmaksim@mail.ru
Тел.: (499) 194-50-24

Кандидат физико-математических наук, доцент НИЯУ МИФИ. Сфера научных интересов – взаимодействие электромагнитного излучения с нанодисперсными системами. Автор более 100 научных статей.

**ЛЕОНТЬЕВ
Алексей Борисович**

E-mail: lab2@mail.msiu.ru
Тел.: (495) 313-99-13

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики МГИУ. Сфера научных интересов – оптика дисперсных систем. Автор более 40 научных трудов.

**ТРУБИЦИНА
Надежда Вадимовна**

E-mail: carduelis@inbox.ru
Тел.: (495) 423-23-20

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики МГИУ. Сфера научных интересов – аэрозоли, оптические характеристики, влияние на климат. Автор более 30 научных трудов.

**ВОДЯНИК
Данила Владимирович**

E-mail: vzagaynov@yandex.ru
Тел.: (495) 917-89-04

Аспирант НИФХИ им. Л. Я. Карпова. Сфера научных интересов – моделирование процессов в дисперсных системах. Автор двух научных статей.