

ВЫМЫВАНИЕ АЭРОЗОЛЬНОЙ ФРАКЦИИ ИЗ ТРОПОСФЕРЫ АТМОСФЕРНЫМИ ОСАДКАМИ

М.М.Троянов

Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск



Рассмотрен вопрос об удалении аэрозоля из атмосферы облаками. Выделены два различных механизма вымывания аэрозоля – за счет внутриоблачного обводнения аэрозоля и подоблачного взаимодействия с атмосферными осадками. Даны количественные оценки соотношения этих факторов в реальной атмосфере.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема загрязнения атмосферы аэрозолями промышленного и естественного происхождения носит во всем развитом мире чрезвычайно актуальный характер. Продукты промышленных выбросов поддаются в принципе контролю, а в некоторых случаях и регулированию. Тем не менее, важно рассмотреть роль естественных механизмов в очищении атмосферы от аэрозоля. Такими механизмами, в первую очередь, являются седиментация и вымывание аэрозоля атмосферными осадками. В то время как седиментация в тропосфере достаточно хорошо описывается стоксовским оседанием аэрозольных частиц и вполне хорошо изучена, взаимодействие аэрозоля с атмосферной влагой протекает значительно сложнее. С другой стороны, следует напомнить, что возникновение пятен радионуклидных загрязнений после чернобыльской аварии на территории Брянской и Калужской областей связано с вымыванием прошедшими в то время дождями радиоактивных продуктов выброса. Таким образом, актуальность данного вопроса не вызывает сомнений.

МЕХАНИЗМЫ ВЫМЫВАНИЯ АЭРОЗОЛЯ ИЗ ТРОПОСФЕРЫ

По характеру взаимодействия частиц аэрозоля в тропосфере с атмосферной влагой аэрозоль может быть условно разделен на две фракции [1]. Аэрозольные частицы радиусом $r_a < 0,1 \mu\text{м}$ вымываются осадками из всей толщи подоблачной тропосферы, в основном, механизмами коагуляции. Теория такого процесса разработана в [1]. Для частиц с размерами $r_a > 0,1 \mu\text{м}$ более характерен другой процесс: водяной пар осаждается на этих частицах как на ядрах конденсации, причем конденсация происходит достаточно интенсивно. Часть таких обводненных частиц затем выпадает из атмосферы с осадками. Как показано в [2], именно на эти частицы приходится основная масса (около 90%) содержащегося в тропосфере аэрозоля, поэтому при рассмотрении процессов вымывания аэрозоля из тропосферы основное значение имеет последний механизм.

При описании процесса вымывания аэрозоля примем в качестве модельного предположения, что обводнение аэрозоля идет в два этапа. Сначала на каждой частице

с $r_a > 0,1 \text{ мкм}$ конденсируется одна облачная капля, затем эти капли могут коагулировать или укрупняться за счет конденсационного роста.

Для описания спектра размеров капель в развитых облаках воспользуемся аппроксимационной формулой [3]:

$$\varphi(r) = ar^{-6} \exp(-b/r), \quad (1)$$

где r – радиус облачной капли.

При нормировании спектра капель на единицу (т.е. $\int_0^{\infty} \varphi(r) dr = 1$) $a = b^5/\Gamma(5)$, где

Γ – гамма-функция, $\Gamma(5) = 24$; $b = 6r_m$, где r_m – модальный радиус, находящийся в пределах 3 – 10 мкм [3]. Следует заметить, что в асимптотике (1) переходит в распределение $\varphi(r) \sim r^{-6}$ для крупных капель, которое согласуется со статистической моделью [4].

При выяснении крупномасштабных (синоптических и климатических) эффектов вымывания аэрозоля из тропосферы необходимо описать связь процессов малого пространственно-временного масштаба (вымывание осадками из отдельного облака) со средней по широтному кругу климатической интенсивностью осадков, которая может быть получена с сезонным разрешением при помощи климатической модели [5,6]. В качестве первого приближения для оценки эффектов вымывания предположим пропорциональную зависимость осадков от совокупности отдельных облаков с климатической интенсивностью осадков I на данной широте и в данный сезон.

Учитывая, что облачная атмосфера достаточно сильно перемешивается, можно принять, что после удаления с осадками обводненных частиц нормированный на массу спектр аэрозольных частиц в интервале размеров 0,1 – 1 мкм не изменяется, а падает лишь концентрация частиц аэрозоля. Иначе говоря, в объеме облачной атмосферы, очистившейся от аэрозольных частиц после выпадения осадков, вследствие турбулентного перемешивания поступают аэрозольные частицы из окружающего воздуха с тем же спектром. В этом случае изменение концентрации аэрозоля вследствие выпадения ядер конденсации с осадками будет описываться следующим уравнением:

$$\frac{dN}{dt} = - \frac{kIh}{4/3\pi \rho \int_0^{\infty} r^3 \varphi(r) dr}, \quad (2)$$

где N – количество крупных аэрозольных частиц с $r_a > 0,1 \text{ мкм}$ в вертикальном столбе облачной атмосферы с единичным основанием; h – высота этого столба; ρ – плотность воды; k – постоянная величина, которая устанавливается эмпирически.

С учетом (1), формула (2) преобразуется к следующему виду:

$$\frac{dN}{dt} = - \frac{kI\Gamma(5)h}{4/3\pi \rho b^3} \approx \frac{kIh}{37.7\rho_m^3}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что скорость вымывания крупных аэрозольных частиц из тропосферы пропорциональна интенсивности осадков и не связана непосредственно с концентрацией примесей. Это не противоречит данным [2], что скорость удаления примеси из атмосферы пропорциональна концентрации примеси, вследствие того, что в [2] исследуется процесс чисто динамического вымывания аэрозоля из подоблачного слоя атмосферы, в то время как здесь рассматривается дополнительный механизм удаления аэрозоля из тропосферы осадками, сформированными из облачных капель с включенными в них аэрозольными частицами.

Чтобы оценить эффект вымывания подоблачного аэрозоля каплями осадков, примем во внимание, что функция распределения капель осадков по размерам подчиняется за-

кону Маршалла – Пальмера, т.е.

$$F(R) = N_0 e^{-\lambda R}, \quad (4)$$

где R – радиус капель осадков; $N_0 = 0,08 \text{ см}^{-4}$; $\lambda = 82 \cdot I^{-0,21} \text{ см}^{-1}$ (здесь I измеряется в мм/ч).

Скорость удаления подоблачного слоя из-за соударений определяется выражением [7]:

$$\frac{df(r_a)}{dt} = -f(r_a) \int_0^{\infty} \pi R^2 V_s(R) E(R, r_a) F(R) dR, \quad (5)$$

где $f(r_a)$ – функция распределения по радиусам подоблачного аэрозоля, нормированная на концентрацию частиц аэрозоля, V_s – скорость падения капель радиуса R , E – коэффициент захвата [1].

Как показано в [8], зависимость скорости падения капель от радиуса может быть вполне удовлетворительно описана простым аналитическим выражением

$$V_s(R) = V_{\infty} [1 - \exp(-aR)], \quad (6)$$

где $V_{\infty} = 995 \text{ см/с}$; $a = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^{-1}$.

Вопрос о зависимости коэффициента захвата от радиусов водяных капель и вымываемого аэрозоля чрезвычайно сложен и в настоящее время не решен. В качестве приближения для достаточно грубой оценки скорости вымывания аэрозоля из подоблачного слоя можно положить коэффициент захвата E в (5) постоянной величиной \bar{E} . Воспользовавшись результатами [9], где установлены значения коэффициентов захвата дождевыми каплями аэрозольных частиц для широкого диапазона размеров, находим $\bar{E} \sim 10^{-3}$.

С учетом (6), решение уравнения (5) можно представить в виде:

$$f = f_0 \exp \left\{ -2\pi \bar{E} V_{\infty} N_0 \left[\frac{1}{\lambda^3} - \frac{1}{(\lambda + a)^3} \right] \right\} t \equiv f_0 e^{\sigma t}, \quad (7)$$

где коэффициент σ зависит от коэффициента захвата и через величину λ в (4) от интенсивности осадков I .

Подставив в (7) характерные значения этих величин, можно оценить величину коэффициента вымывания σ ($\sigma \sim 10^{-5} - 10^{-4} \text{ с}^{-1}$), причем его значение увеличивается с возрастанием интенсивности осадков I . Такая оценка σ находится в хорошем согласии с экспериментальными данными, представленными в [2].

При помощи соотношений (3) и (7) представляется возможным сопоставить скорости уменьшения концентрации аэрозоля за счет вымывания в облаках и подоблачного вымывания осадками. Соотношения (3) и (7) позволяют формально представить скорость уменьшения концентрации аэрозоля вследствие двух различных механизмов в одинаковой форме: $dN/dt = -\sigma N$ для подоблачного вымывания и $dN/dt = -\sigma_1 N$, где

$$\sigma_1 \equiv \frac{kIh}{37,7 \rho r_m^3 N}, \text{ для внутриоблачного удаления аэрозоля.}$$

ВЫВОДЫ

Оценки характерных значений σ и σ_1 для различных величин интенсивности осадков, а также в достаточно широком диапазоне изменений коэффициента захвата \bar{E} приводят к весьма нетривиальному и даже неожиданному результату. Оказалось, что при

реальных значениях концентраций атмосферного аэрозоля скорость уменьшения концентрации аэрозоля путем внутриоблачного очищения на несколько порядков превышает скорость подоблачного вымывания аэрозоля осадками, что позволяет в рамках данного подхода пренебречь последним эффектом. Разумеется, сделанные оценки основаны в данной работе на пространственно-временных осреднениях довольно крупного масштаба, и поэтому не вполне корректны для случаев очищения атмосферы от аэрозоля в локальном районе непосредственно после ливневого грозового дождя. В целом же полученные результаты могут быть полезны при решении различных исследовательских и прикладных задач в области физической экологии, метеорологии и климатологии.

Список литературы

1. Волощук В.М., Седунов Ю.С. Процессы коагуляции в аэродисперсных системах. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975.
2. Петренчук О.П. Экспериментальные исследования атмосферного аэрозоля. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979.
3. Смирнов В.И. Микроструктура облаков и осадков // Итоги науки и техники. Сер. Метеорология и климатология. – 1987. – Т. 15.
4. Боровиков А.М., Мазин И.П. Микроструктура капельных облаков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1970.
5. Кабанов А.С., Троянов М.М. Климатическая модель влияния изменений термического режима на интенсивность осадков. // Метеорология и гидрология. – 1987. – №5.
6. Кабанов А.С., Троянов М.М. О роли облачности в формировании широтно- сезонного хода дисперсии приземной температуры / Труды ИЭМ. – 1987. – Вып. 43(128).
7. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1982.
8. Матвеев Л.Т. Динамика облаков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981.
9. Slinn W.G.H. Some approximation for the wet and dry removal of particles and gases from the atmosphere // Water, Air and Soil Pollution. – 1977. – V.7. – №4.

Поступила в редакцию 9.06.99.

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.311.25:621.039.004(55)

Scenarios of Development of Nuclear Power Engineering on BB3P-1000 and BREST-type Fast Reactors in Iran \N. Mataji Kajuri; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 8 pages, 2 tables, 8 illustrations. - References, 5 titles.

The different scenarios of development of Iranian nuclear power engineering are considered. A possibility of BREST-type lead-cooled fast reactors introduction in the Iranian nuclear industry is analyzed.

УДК 621.311.25:621.039

Management of Technical and Industrial Hazards on Objects of Nuclear Power Engineering Using the Automated System of Recording and Documenting of Signals \V.V. Titov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 8 pages, 2 illustrations.

The opportunities of application of the multifunctional automated systems of recording of signals on high-hazard industrial objects, including nuclear power engineering are uncovered in the paper.

УДК 523.683:523.64

Chaotic Dynamics in a Problem of N-bodies \N.V. Kulikova, A.V. Mishev, P.I. Ignatenko; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 9 pages, 9 illustrations. - References, 11 titles.

The technique of realization of computer modeling and research method of the evolution of objects in the N-bodies problem (formalization of the model, construction of the solution, processing and analysis of results) is considered. Using examples of the decision of spatial gravitational problems for 4 and 6 bodies it was shown that the developed approaches and methods are unique for the research of the evolution of N-bodies dynamic system interaction is caused by fields of a various nature.

УДК 504.3.054:681.7.069.24

The Possibilities of Sondage of Contaminants in the Real Atmosphere Using Industrial Lasers \M.M. Troyanov, Yu.D. Il'ichev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 9 pages, 2 tables, 3 illustrations. - References, 9 titles.

The possibilities of instrumental determination of adsorbing admixtures in a real atmosphere by the method of differential absorption using isotope CO₂-lasers are investigated.

УДК 51-73:504.054

Prediction of Contaminations of Surface Stratum of Territory in Region NPP \K.M. Efimov, E.A. Yas'ko; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 4 pages, 1 illustration. - References, 4 titles.

Development of mathematical models of pollution spreading due to natural processes in the soil is hampered by the complexity of representing the soil as a medium of migration owing to heterogeneity of its physicochemical properties and insufficient knowledge of transfer mechanisms. This study offers rather a simple mathematical model of both the formation of rainfall run-off at a catchment area, and the process of transfer of polluting substances by the generated flow. The constructed model is convenient for practical application. Numerical calculations for the Covashy river basin (vicinity of the Leningrad Nuclear Power Plant) have been carried out.

УДК 551.510.42

Removing of Aerosol Fraction from the Troposphere by Atmospheric Precipitation \M.M. Troyanov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 4 pages. - References, 9 titles.

The problem of removal of an aerosol from the atmosphere by clouds is considered. Two different mechanisms of an aerosol removing - at the expense of aerosol moisturing inside clouds and due to

interaction with atmospheric precipitation are chosen. Quantitative estimations of a ratio of these factors in the real atmosphere are given.

УДК 541.64:541.183

Study of Influence of Alkaline Hydrolysis Products in Production of Track Membranes on the Basis of Polyethyleneterephthalate Films \T.E. Laricheva, A.A. Machula, V.K. Milinchuk; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 5 pages, 3 illustrations. - References, 10 titles.

The influence of ethyleneglycol (EG) and terephthalate ions (TPI), generated during an alkaline hydrolysis of polyethyleneterephthalate films, on the process of formation of track membranes is investigated. It is shown that TPI do not influence on the velocity of chemical etching polymer and of the latent tracks (LT). At the same time the kinetics of chemical etching polymer and of the LT essentially depends on the concentration of EG in etching solution. As a result accumulation of EG in the etching solution the selectivity of the process becomes worse along with the change of characteristics of track membranes.

УДК 539.172.8

Study of Phase Distribution of Initial and Final States of Multiparticle Systems in the Monte-Carlo Method of Classical Trajectories \A.E. Yanovsky; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 9 pages, 14 illustrations. - References, 5 titles.

The results of calculation of phase distribution of reaction fragments simulated by three and four-particle models within the method of classical trajectories are represented in the paper.

УДК 621.039.525; 621.039.534.6

Universal Algorithm of the Monte-Carlo Method for Calculation of Blankets of Accelerator-Driven Systems \V.V. Korobeinikov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 7 pages, 2 illustrations. - References, 5 titles.

The universal algorithm for physical calculation of subcritical systems with an external source of neutrons by the Monte-Carlo method is developed. This algorithm is effective in calculation of accelerator-driven systems within a wide range of subcriticality. Description, theoretical evidence, method of realization, and results of testing of the algorithm for the test subcritical systems with an external neutron source are given in the paper.

УДК 621.039

On the Method of Determination of Physical Characteristics of a Nuclear Reactor under Slow Reactivity Perturbation \N.A. Vinogorov, D.N. Jukovsky; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 5 pages, 3 illustrations. - References, 5 titles.

The method of determination of nuclear reactor characteristics under slow reactivity perturbation by means of measurement of the parameter providing the feedback is presented.

The application of the method is demonstrated by examples of estimation of the poisoning effect of xenon-135 and barometric reactivity coefficient for VVR.

УДК 621.039.553.34

Study of Dependence of Wall Temperature in the Technological Channel of the RBMK-Reactor on the Gas Clearance between the channels and Graphite Blocks \A.I. Trofimov, S.A. Vinogradov, I.A. Tchusov, V.I. Belozerov, M.A. Trofimov, I.A. Shvetsov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 11 pages, 1 table, 15 illustrations. - References, 5 titles.

Theoretical and experimental proof of the usage of data on the temperature field distribution over the inner surface of a technological channel (TC) for evaluating the size of the gas clearance in RBMK-reactors are considered in the paper. The calculations performed using k- ϵ turbulence model, showed that the size of the gas clearance considerably affects the temperature distribution over the length of the TC.