

В. Н. Пискунов

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В АЭРОДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ**

Монография

ФГУП
“РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ
ЦЕНТР – ВНИИЭФ”

В. Н. Пискунов

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В АЭРОДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ**

Монография

Саров, 2004

В. Н. Пискунов

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В АЭРОДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ**

Монография

ББК 22.253.312+24.632

ПЗ4

УДК 532.529+541.182.2/3

Пискунов В. Н.

Моделирование динамических процессов в аэродисперсных системах.
Монография. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2004. – 162 с.: ил.

ISBN 5-9515-0039-7

Монография посвящена теоретическим методам моделирования динамических процессов в аэродисперсных системах. Рассмотрены общие свойства дисперсных систем, сформулированы кинетические уравнения для процессов конденсации и коагуляции. Приведены основные характеристики программы AERFORM, разработанной во ВНИИЭФ для численного моделирования кинетики формирования аэрозолей. Описана модель кинетики конденсации и коагуляции в системах с двухфазной дисперсной средой. Приведены результаты численного моделирования кинетики формирования осадков в облаках для двух полномасштабных экспериментов.

Приведены методические подходы к прогнозу последствий аварий и некоторые итоги работ ВНИИЭФ по экспериментальному моделированию аварийных ситуаций. Описана прикладная программа ПРОГНОЗ, разработанная во ВНИИЭФ для расчета процессов атмосферного переноса и прогноза последствий аварий. Приведены результаты моделирования процессов формирования частиц в различных аварийных выбросах.

Материал может использоваться при разработке численных моделей и методов, а также для анализа и решения конкретных проблем в области экологии и безопасности.

Для студентов и аспирантов вузов, а также для специалистов, работающих в области безопасности и экологии, механики двухфазных сред, физики атмосферы.

Рецензент, доктор физ.-мат. наук А. И. Голубев

ISBN 5-9515-0039-7

© ФГУП “Российский федеральный
ядерный центр – ВНИИЭФ”, 2004

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. МЕХАНИКА АЭРОЗОЛЕЙ	11
1.1. Атмосферные аэрозоли	11
1.2. Основные характеристики частиц дисперсной фазы	16
1.3. Движение частиц в среде-носителе	21
1.4. Броуновская диффузия аэрозолей	27
1.5. Диффузия и перенос аэрозолей в атмосфере	32
2. КИНЕТИКА ПРОЦЕССОВ КОНДЕНСАЦИИ И КОАГУЛЯЦИИ	37
2.1. Конденсация и испарение капель	37
2.2. Коагуляция аэрозолей	46
2.3. Кинетические уравнения конденсации и коагуляции	51
2.4. Задачи к разделам 1, 2	55
3. ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ КИНЕТИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ЧАСТИЦ	58
3.1. Скорость процессов коагуляции	58
3.2. Коагуляция композитных частиц	63
3.3. Моделирование кинетики формирования аэрозолей с помощью программы AERFORM	67
3.4. Формирование частиц в системах с двухфазной дисперсной средой	70
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ОСАДКОВ В ОБЛАКАХ	76
4.1. Выбор облачных экспериментов для моделирования	77
4.2. Сыктывкарский эксперимент и результаты моделирования	81
4.3. Эксперимент “Монтана” и результаты расчетов	91
5. ЭКОЛОГИЯ, БЕЗОПАСНОСТЬ И ПРОБЛЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ	101
5.1. Сочетание экспериментального и теоретического подходов в проблеме прогнозирования	101
5.2. Диффузионные эксперименты ВНИИЭФ	107
5.3. Общая картина аварийного взрыва	113

6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ВЫБРОСОВ И ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА АЭРОЗОЛЕЙ В АТМОСФЕРЕ	120
6.1. Модели источников выбросов	121
6.2. Моделирование процессов переноса примесей в атмосфере с помощью программы ПРОГНОЗ	122
6.3. Результаты численного моделирования некоторых аварийных процессов	129
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	152

Cotton T. L. (1972). Numerical simulation of precipitation development in supercooled cumuli. Part II // *Mon. Wea. Rev.* Vol. 100. P. 764–784.

Dovgalyuk Yu. A., Zatevakhin M. A., Stankova E. N. (1994). Numerical simulation of a buoyant thermal using the k - ε turbulence model // *J. Applied Meteorology*. 1994. Vol. 33, No 9. P. 1118–1126.

Dye J. E., et al. (1986). Early electrification and precipitation development in a small, isolated Montana Cumulonimbus // *J. Geophys. Res.* 1986. Vol. 91, No D1. P. 1231–1237.

Gardiner B., Lamb D., Pitter R. L., and Hallet J. (1985). Measurements of initial potential gradient and particle Charges in a Montana summer thunderstorm // *Ibid.* 1985. Vol. 90, No D4. P. 6079–6086.

Gifford F. A. (1982). Horizontal diffusion in the atmosphere: A Lagrangian-dynamical theory // *Atmos. Environment*. 1982. Vol. 16, No 3. P. 505.

Golubev A. I., Piskunov V. N., Ismailova N. A. (1999). “AERFORM” code for numerical simulation of aerosol formation kinetics // *J. Aerosol Sci.* 1999. Vol. 30. S231–S232.

Hanna S. R., Paine R. J. (1989). Hybrid plume dispersion model (HPDM) development and evaluation // *J. Applied Meteorology*. 1989. Vol. 28. P. 206–224.

Hidy J. M., and Brock J. R. (1970). The dynamics of aero-colloidal systems. Oxford: Pergamon-Press, 1970.

Kharchenko A. I. (1997). Parametrization of dry deposition velocity in the atmospheric surface layer // *J. Aerosol Sci.* 1997. Vol. 28. Suppl. 1. P. 589.

Loyalka L. S. (1983). Mechanics of aerosol in nuclear reactor safety: a review // *Progress in Nuclear Energy*. 1983. Vol. 12, No 1. P. 1.

Luna R. E., Church H. W., Shreve J. D. (1971). Variability of air sampler data // *Atmospheric Environment*. 1971. Vol. 5. P. 579.

Mikhailov A. L., and Khizhnyakov V. V. (1998). Review of experimental data on formation of aerosol pollution source at explosions. Report on Agreement AV-7964 between RFNC-VNIIEF and SNL, 1998.

Mason B. J. (1957). The physics of clouds. Oxford: Clarendon Press, 1957.

Mészáros E. (1978). Present status of our knowledge on the atmospheric condensation nuclei: Вопросы физики облаков. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. С. 157–168.

Olesen H. R. (1995). The model validation exercise at MOL: Overview of results // Int. J. Environment and Pollution. 1995. Vol. 5, No 4–6. P. 761.

Olesen H. R., and Mikkelsen T. (eds) (1992). Proceedings of the workshop on objectives for next generation of practical short-range atmospheric models. Riso, DCAR, Roskilde, Denmark, 1992.

Palmer T. Y., Northcutt L. I. (1975). Convective columns above large experimental fires // Fire Technol. 1975. Vol. 11, No 2. P. 111–118.

Pasquill F. (1975). Atmospheric diffusion. N-Y. John Wiley and Sons, 1975.

Penner J. E., Haselman L. C., Edwards L. L. (1985). Buoyant plume calculations. Paper No 84-0459 for AIAA 23rd Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada, January 14–17, 1985.

Piskunov V. N., Aloyan A. E., Gerasimov V. M., et al. (1995a). Numerical simulation of industrial and accidental release formation and transport. Report LANL LA-SUB-94-175. Order No DE95011618, 1995.

Piskunov V. N., Statsenko V. P., Kharchenko A. I., et al. (1995b). Mathematical simulation of atmospheric pollutants mesoscale transport and transformation. The report of RFNC-VNIIEF on Phase 1 of ISTC Project No 47, 1995.

Piskunov V. N. (1997). Coagulation kinetics of composite particles // J. Aerosol Sci. 1997. Vol. 28. Suppl. 1. S647–S648.

Piskunov V. N., Golubev A. I., Goncharov E. A., and Ismailova N. A. (1997a). Kinetic modeling of composite particles coagulation // I bid. No 7. P. 1215–1231.

Piskunov V. N., Aloyan A. E., Marchuk G. I., et al. (1997b). Mathematical simulation of atmospheric pollutants mesoscale transport and transformation. Final Project Technical Report of ISTC 047-95 (RFNC-VNIIEF, INM RAS), 1997.

Piskunov V. N., and Aloyan A. E. (2002). Mathematical simulation of atmospheric pollutants mesoscale transport and transformation: kinetics of aerosol formation in clouds. Final Project Technical Report of ISTC 1078-99 (RFNC-VNIIEF, INM RAS), 2002.

Piskunov, V. N., and Petrov A. M. (2002). Condensation/ coagulation kinetic for mixture of liquid and solid particles: analytical solutions // J. Aerosol Sci. 2002. Vol. 33. P. 647–657.

Piskunov V. N., and Zatevakhin M. A. (2002). Numerical simulation of aerosol particle formation kinetics in large fires // Abstracts of Sixth international aerosol conference. September 9–13, 2002. Taipei, Taiwan. Vol. 1. P. 487 – 488.

Piskunov V. N., Petrov A. M., Golubev A. I. (2003). Modeling particle formation kinetics in mixed-phase clouds // J. Aerosol Sci. 2003. Vol. 34. P. 1555–1580.

Pruppacher H. R., and Klett J. D. (1997). Microphysics of cloud and precipitation. Dordrecht: Kluwer Academic Press. 1997.

Rogers R. R. (1978). A short course in cloud physics Oxford: Pergamon Press, 1978.

Sehmel G. A. (1970). Particle deposition from turbulent air flow // J. Geoph. Res. 1970. Vol. 75, No. 9. P. 1766.

Shiino J. (1978). A numerical study of precipitation development in cumulus clouds // Papers in Meteorology and Geophysics. 1978. Vol. 29, No. 4. P. 157–194.

Silk J., and White S.D. (1978). The development of structure in the expanding universe // Astroph. Journ. 1978. Vol. 223. P. L59.

Simons S. (1981). The coagulation and deposition of radio-active aerosols // Annals of Nuclear Energy. 1981. Vol. 8. P. 287–294.

Smoluchowsky M. (1916). Drei Vortrage uber Diffusion, Brownische Bewegung und Koagulation von Kolloidteilchen // Phys. Zeits. 1916. Bd. 17. S. 577.

Snegirev A. Yu., Makhviladze G. M., Roberts J. P. (2001). The effect of particle coagulation and fractal structure on the optical properties and detection of smoke // Fire Safety Journal. 2001. Vol. 36. P. 73–95.

Stewart K. (1956). The condensation of a vapour to an assembly of droplets or particles // Trans. Far. Soc. 1956. Vol. 52. Part 2. P. 161–172.

Waldman G. D., Reinecke W. G., Glenn D. C. (1972). Raindrop breakup in the shock layer of a high-speed vehicle // AIAA Journal. 1972. Vol. 10. No 9. P. 1200.

Warner J. (1973). The Microstructure of cumulus cloud: Part IV. The effect on the droplet spectrum of mixing between cloud and environment // J. of Atm. Sci. 1973. Vol. 30. P. 256–261.

Willis P. T., and Hallett J. (1991). Microphysical measurements from an aircraft ascending with a growing isolated maritime cumulus tower // J. of Atm. Sci. 1991. Vol. 48, No 2. P. 283–300.

Yamada T., Williams M., Stone G. (1989). Chemical downwind hazard modeling study // LA-UR-89-1061.

Пискунов Владимир Николаевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В АЭРОДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ**

Монография

Редактор *Л. В. Мазан*

Корректор *Н. Ю. Костюничева*

Компьютерная подготовка оригинала-макета *В. М. Князькова*

Подписано в печать 24.05.2004. Формат 60×90/16

Печать офсетная. Усл. печ. л. ~10. Уч. изд. л. ~9

Тираж 150 экз. Зак. тип. 945-2004

Отпечатано в Издательско-полиграфическом комплексе

ФГУП “РФЯЦ-ВНИИЭФ”

607190, г. Саров Нижегородской обл.