

2. Космическое оружие: дилемма безопасности. Под ред. Е.П. Велихова. М.: Мир, 1986.
3. Жемерев А.В., Степанов Б.М. Поле гамма-излучения от источника нейтронов в воздухе. М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. Karzas W., Latter R. Detection of the electromagnetic radiation from nuclear explosions in space. — Phys. Rev., 1965, v. 137, № 5B, p. 1369. Имеется перевод в кн.: Ядерный взрыв в космосе, на земле и под землей. (Электромагнитный импульс ядерного взрыва). Сб. статей. Пер. с англ. М.: Воениздат, 1974, с. 61.
5. Соловьев А.А., Терехин В.А. О радиальных электрических полях, возбуждаемых в воздухе точечным источником у-квантов. — ПМТФ, 1978, № 6, с. 3—9.
6. Мелведев Ю.А., Степанов Б.М., Федорович Г.В. Физика радиационного возбуждения электромагнитных полей. М.: Энергоатомиздат, 1980.

Поступила в Редакцию 10.11.94

УДК 621.386.8—784.7

ПРОХОЖДЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СКВОЗЬ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫЕ СИСТЕМЫ

Артемьев В.А., Чукляев С.В. (НИИ технологии материалов),
Крикун Ю.А. (Днепропетровский государственный университет, Украина),
Ткаченко В.И., Юпенков В.А. (НИИ технологии машиностроения, Украина),
Чулков В.В. (РФЯЦ ВНИИЭФ)

Исследование свойств ультрадисперсных систем [1] — нового класса материалов, содержащих макроскопическую композицию частиц размером менее 0,1 мкм, позволяет решить задачи, недоступные с традиционной точки зрения. В отличие от известного эффекта Борманна на кристаллических образцах, когда при условии выполнения соотношения Вульфа—Брэгга, связывающего длину волны и межплоскостное расстояние, возрастает пропускание рентгеновского излучения, при облучении ультрадисперсных систем наблюдается как аномальное увеличение, так и уменьшение пропускания фотонов в интервале энергии рентгеновского излучения [2].

В настоящей работе приведены некоторые экспериментальные результаты, показывающие аномальное взаимодействие рентгеновского излучения с ультрадисперсными системами, и обсуждены перспективы практического применения таких материалов.

Метод и результаты измерений. Установка для исследования пропускания рентгеновского излучения (рис. 1) состоит из нуклидного источника моноэнергетических фотонов, размещенного в защитном контейнере с коллиматором, ось которого направлена по вертикали и совпадает с осью отверстия в металлической подставке, и сцинтилляционного детектора с кристаллом NaI, установленного напротив отверстия с противоположной стороны подставки. Отношение потоков испускаемых источником и прошедших сквозь образцы фотонов $\Phi_\gamma/\Phi_{\gamma 0}$ определили по отношению площадей под пиком полного поглощения в единичный интервал времени. Вклад упругорассеянных фотонов атомами материала образца $\Phi_{\gamma c}/\Phi_\gamma$ учли при выборе геометрии облучения. Если предположить, что размеры источника намного меньше расстояния R между источником и детектором, то можно записать

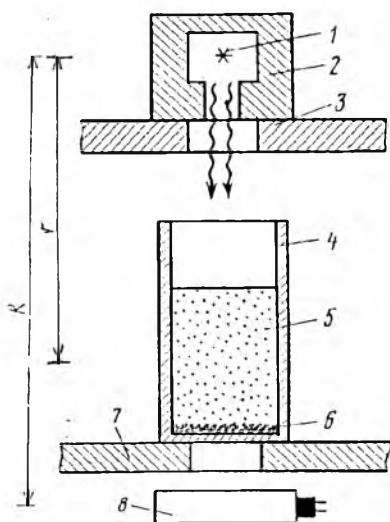


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — нуклидный источник; 2 — защитный контейнер с коллиматором; 3 — держатель; 4 — кювета; 5 — гидрозолю; 6 — фракция мелкодисперсных частиц; 7 — металлическая подставка с отверстием; 8 — детектор

$$\Phi_{\gamma c}/\Phi_{\gamma} = \frac{a^4 S \mu_0 \rho h}{4\pi R^2 (a-1)^2},$$

где $a = R/r$; r — расстояние между источником и геометрическим центром образца; μ_c — массовый коэффициент когерентного рассеяния фотонов в материале образца; ρ , h — плотность и толщина образца соответственно; S — площадь отверстия металлической подставки. При $R \sim 10$ — 20 см, $S \sim 1$ — 2 см², $a \sim 2$ и толщине образца до 1 см значение $\Phi_{\gamma c}/\Phi_{\gamma}$ не превышает 1%.

В кювету, изготовленную в форме прямоугольного цилиндрического стакана из алюминиевого сплава Д-16 внутренним диаметром 32 мм и установленную в коллимированном пучке фотонов, налили 5 мл бидистиллированной воды, содержащей 3,9 г мелкодисперсного порошка вольфрама со средним размером частиц крупной фракции около 1 мкм и содержанием химических примесей не более 0,04%. После тщательного перемешивания наиболее крупные частицы вольфрама осели на дне кюветы, а фракция ультрадисперсных частиц размером 0,01—0,1 мкм распределилась по объему воды в виде взвеси и образовала коллоидный раствор (гидрозо́ль). При этом на поверхности раствора появился монослой ультрадисперсных частиц. Расстояние между ультрадисперсными частицами в растворе приблизительно равно 0,1—1 мкм. Полная масса ультрадисперсных частиц около 1,5% массы порошка. Затем многократно в течение 3—4 ч измеряли поток фотонов Φ_{γ} , прошедших сквозь гидрозо́ль, осадок на дне, дно кюветы толщиной 1,5 мм и отверстие в металлической подставке толщиной 3 см, достаточной для полного поглощения фотонов энергией 59,54 кэВ источника ^{241}Am .

Аналогичные измерения повторили после добавления и тщательного перемешивания порций бидистиллированной воды по 5 мл. Зависимость $\Phi_{\gamma}/\Phi_{\gamma 0}$ от объема воды V , измеренная для различных партий порошка вольфрама, в том числе и при сканировании по перпендикулярной оси площади сечения кюветы, показана на рис. 2. Систематическая погрешность измерительной аппаратуры в обоих измерениях не превышала 1,5%. Погрешность определения $\Phi_{\gamma}/\Phi_{\gamma 0}$ не превышает 4% и носит, в основном, статистический характер. Здесь же приведена зависимость, рассчитанная в предположении прохождения излучения сквозь гетерогенную преграду по методике и программе ПРИЗ-И2. Видно anomalous увеличение и уменьшение пропускания рентгеновского излучения в зависимости от концентрации порошка в смеси. Наиболее значительное пропускание наблюдается при концентрации в интервале 0,2—0,26 г/мл. Когда аналогичные измерения провели с бидистиллированной водой и смесью фракции мелкодисперсных частиц, из которой предварительно удалили гидрозо́ль, то получили в первом эксперименте удовлетворительно согласующуюся с расчетом экспоненциальную, а во втором — близкую к экспоненциальной зависимость потока рентгеновского излучения от объема воды. С помощью кюветы с вогнутым конусообразным дном удалось удалить мелкодисперсную фракцию в

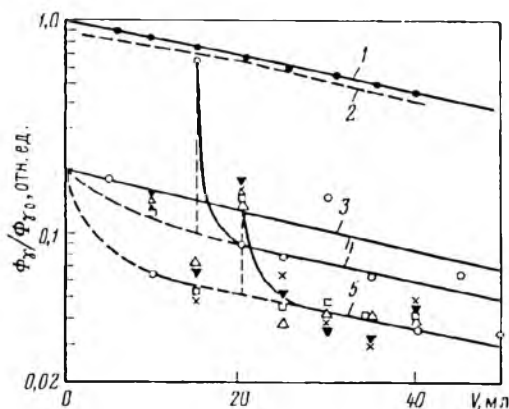
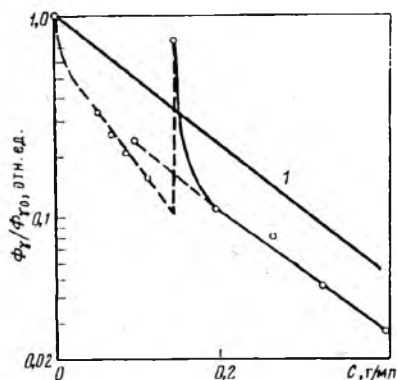


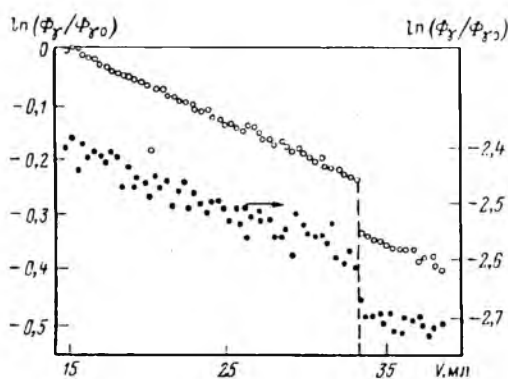
Рис. 2. Зависимость $\Phi_{\gamma}/\Phi_{\gamma 0}$ источника ^{241}Am от объема воды в отсутствие (●) и при наличии ультрадисперсного порошка вольфрама (4, 5) в кювете: 2 — то же для гидрозо́ля вольфрама; 1, 3 — результаты расчета; ○ и Δ, ▼, ×, □ — результаты измерения для одной (○) и образца из одной навески другой партии порошка (Δ, ▼, ×, □) при прохождении излучения в четырех различных местах кюветы



Р и с. 3. Зависимость $\Phi_\gamma/\Phi_{\gamma 0}$ от концентрации порошка вольфрама при $V = 20$ мл (○) и расчетная кривая ослабления излучения источника ^{241}Am в вольфраме (1) ($\mu = 3 \text{ см}^2/\text{г}$)

ких, как глицерин, и твердых матрицах, например, гипсе, резине, синтетических смолах. При этом для каждой концентрации мелкодисперсного порошка проводили идентичные измерения не менее чем на 25 образцах.

Интересный результат получен, когда смесь 3,9 г мелкодисперсного порошка вольфрама с бидистиллированной водой поместили в кювету и выпаривали воду со скоростью 0,48 мл/ч путем нагрева образца тремя осветительными лампами. При этом одновременно по схеме рис. 1 измеряли поток фотонов, прошедших сквозь кювету. В этом измерении использовали источник ^{109}Cd энергий фотонов 88 кэВ и полупроводниковые спектрометрические детекторы на основе Si(Li) и особоочистого германия с площадью входного окна 2 см^2 . Электронная аппаратура, изготовленная в стандартах САМАС и NIM, обеспечила разрешение 3—5% для фотонов энергий 5,9 кэВ при максимальной загрузке счетного канала 10 кГц. Измерение и предварительную обработку спектров осуществили многоканальным анализатором CANBERRA-85. Окончательную обработку завершили на ЭВМ по специальным программам. Поток фотонов энергий 88 кэВ определили с погрешностью 1%, поток фотонов флуоресцентного излучения вольфрама (K-линия) — с погрешностью 4%. На рис. 4 показаны зависимости $\Phi_\gamma/\Phi_{\gamma 0}$ от объема воды, полученные в процессе испарения. Резкое изменение пропускания приблизительно на 9% при $C = 0,12 \text{ г/мл}$ в этом эксперименте показыва-



Р и с. 4. Зависимость $\ln(\Phi_\gamma/\Phi_{\gamma 0})$ от объема воды при выпаривании: ○ — энергия фотонов 88 кэВ; ● — K-линия вольфрама

казы на дне и измерить поток фотонов, прошедших сквозь гидрозолю. Зависимость потока рентгеновского излучения от объема воды в этом эксперименте отклоняется от закона Бугера.

Для детального исследования аномального прохождения рентгеновского излучения в кювету, содержащую 20 мл бидистиллированной воды, порциями добавляли мелкодисперсный порошок вольфрама. Тщательно перемешивая каждую добавку, измеряли поток прошедших фотонов по предыдущей схеме. При этом наблюдали подобную зависимость $\Phi_\gamma/\Phi_{\gamma 0}$ от концентрации порошка вольфрама C (рис. 3). Значительное увеличение пропускания получили при $C = 0,144 \text{ г/мл}$.

Аналогичные результаты получены при использовании оксида кадмия, смесей оксида цинка или никеля с вольфрамом и других мелкодисперсных порошков материалов, диспергированных в жидких, таких, как глицерин, и твердых матрицах, например, гипсе, резине, синтетических смолах. При этом для каждой концентрации мелкодисперсного порошка проводили идентичные измерения не менее чем на 25 образцах. Интересный результат получен, когда смесь 3,9 г мелкодисперсного порошка вольфрама с бидистиллированной водой поместили в кювету и выпаривали воду со скоростью 0,48 мл/ч путем нагрева образца тремя осветительными лампами. При этом одновременно по схеме рис. 1 измеряли поток фотонов, прошедших сквозь кювету. В этом измерении использовали источник ^{109}Cd энергий фотонов 88 кэВ и полупроводниковые спектрометрические детекторы на основе Si(Li) и особоочистого германия с площадью входного окна 2 см^2 . Электронная аппаратура, изготовленная в стандартах САМАС и NIM, обеспечила разрешение 3—5% для фотонов энергий 5,9 кэВ при максимальной загрузке счетного канала 10 кГц. Измерение и предварительную обработку спектров осуществили многоканальным анализатором CANBERRA-85. Окончательную обработку завершили на ЭВМ по специальным программам. Поток фотонов энергий 88 кэВ определили с погрешностью 1%, поток фотонов флуоресцентного излучения вольфрама (K-линия) — с погрешностью 4%. На рис. 4 показаны зависимости $\Phi_\gamma/\Phi_{\gamma 0}$ от объема воды, полученные в процессе испарения. Резкое изменение пропускания приблизительно на 9% при $C = 0,12 \text{ г/мл}$ в этом эксперименте показыва-

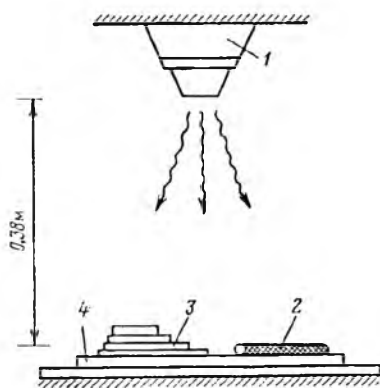
ет, что аномальное увеличение пропускания излучения связано с поведением фракции мелкодисперсных частиц на дне кюветы в присутствии гидрозоля и самоорганизацией системы при определенной концентрации в матрице.

Уменьшение пропускания рентгеновского излучения наблюдали, когда поверхность синтетической нити диаметром 0,6 мм покрыли слоем ультрадисперсных частиц вольфрама средней толщиной $18,6 \text{ мг/см}^2$. Разброс толщины покрытия составил 60%. Нить совместно со свинцовым и вольфрамовым тестом облучили в медицинском рентгеновском аппарате (напря-

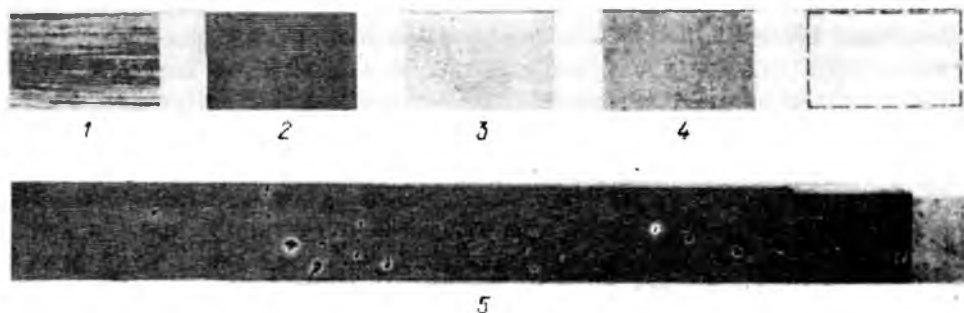
жение на трубке 40 кВ, ток 80 мА, время экспозиции 0,4 с) (рис. 5) фотонами энергией в интервале 25—29 кэВ, изображение фиксировали на рентгеновской фотопленке. Приведенная толщина слоя частиц вольфрама в направлении распространения фотонов составляет $58,4 \text{ мг/см}^2$ и эквивалентна вольфрамовой пластине толщиной 30 мкм. Исследование рентгеновских фотоотпечатков (рис. 6) с помощью денситометра показывает, что оптическая плотность наиболее ярких участков изображения нити соответствует оптической плотности изображения свинцовой пластины толщиной около 0,3 мм или в пересчете на вольфрам — пластине толщиной около 0,24 мм. Оптическая плотность отпечатков остальных участков изображения нити эквивалентна изображению вольфрамовой пластины толщиной около 0,1 мм. Погрешность денситометрии не превышала 20%.

Обсуждение результатов. Анализ совокупности экспериментальных результатов позволяет условно объяснить эффект двумя взаимосвязанными механизмами. Первый механизм, описывающий поведение и процесс самоорганизации ультрадисперсных систем, условно назовем квантово-статистическим. Второй механизм, описывающий взаимодействие рентгеновского излучения с этой системой, — квантово-механическим.

Поскольку уровень Ферми каждой отдельной частицы порошка зависит от ее размера [3, 4], наличия примеси, состояния поверхности, внутренних напряжений и др., то для частиц мелкодисперсной и ультрадисперсной фракций его значения могут значительно различаться. Условия сохранения равновесия требуют выравнивания электрохимического потенциала в системе путем взаимной перезарядки частиц в ансамбле и/или выхода электронов в матрицу, окружающую мелкодисперсные частицы. Однако, пользуясь каноническим распределением Гиббса с переменным числом частиц, рассчитать условие возникновения заряда подобно тому, как его вычисляют для многозарядных дефектов в полупроводниках [5, 6], не представляется возможным, так как нет всех необходимых данных для ультрадисперсных систем. Возникающие при этом кулоновские силы являются дальнедействующими и могут повлечь за собой процесс самоорганизации в системе, сопровождающийся переориентацией и перемещением частиц. Сила взаимодействия каждой пары частиц зависит не только от их размера и взаимного расположения, но и от геометрических параметров и расположения других частиц [3], от наличия в окружающем материале свободных и связанных зарядов [6].



Р и с. 5. Схема расположения источника рентгеновского излучения (1), свинцового и вольфрамового тестов (2), покрытой ультрадисперсными частицами вольфрама синтетической нити (3) и кассеты с рентгеновской фотопленкой (4)



Р и с. 6. Фотоотпечаток с рентгеновской фотопленки: 1 — покрытая ультрадисперсными частицами вольфрама синтетическая нить; 2, 3, 4 — вольфрамовая и свинцовые пластины толщиной 0,15 мм, 35 и 50 мкм соответственно; 5 — ступенчатый набор свинцовых пластин толщиной по 50 мкм, — — — место размещения вольфрамовой пластины толщиной 8 мкм

В результате взаимодействия система стремится принять такую конфигурацию, в которой ее свободная энергия минимальна. При этом может происходить коагуляция частиц. Возникновение образований разной плотности и с различными физическими свойствами приводит к увеличению пропускания излучения [7]. Если предположить, что на дне кюветы осаждается коагулят диаметром частиц d , то поток фотонов $\Phi_{\gamma 1}$, прошедших сквозь каждую гранулу коагулята, описывается по формуле

$$\Phi_{\gamma 1} = 2\Phi_{\gamma 0}[1 - (1 + \mu d) \exp(-\mu d)/(\mu d)^2],$$

где $\Phi_{\gamma 0}$ — падающий поток фотонов; μ — массовый коэффициент поглощения фотонов в материале частицы коагулята. Поток фотонов $\Phi_{\gamma 2}$, прошедших сквозь один слой этих частиц, $\Phi_{\gamma 2} = p\Phi_{\gamma 1} + (1 - p)\Phi_{\gamma м}$, где $\Phi_{\gamma м}$ — поток фотонов, прошедших сквозь материал окружающей коагулят матрицы толщиной d ; p — вероятность попадания фотона в коагулят. Ослабление потока излучения Φ_{γ} , прошедшего сквозь n слоев, можно оценить по формуле $\Phi_{\gamma}/\Phi_{\gamma 0} = (\Phi_{\gamma 2}/\Phi_{\gamma 0})^n$. Оценка показывает, что для количественного объяснения результатов измерения достаточно образования частиц эффективным диаметром 0,1 мм, а при аномальном прохождении рентгеновского излучения сквозь систему на дне кюветы наблюдаются частицы гидрофобного коагулята размером до 0,5—1 мм. Процесс перезарядки и коагуляции зависит от концентрации, температуры смеси и наличия примеси, что обуславливает значительный разброс результатов измерения различных образцов. Носители заряда, возникающие в системе под воздействием ионизирующего излучения, при определенных условиях тоже могут влиять на коагуляцию.

Кристаллическая структура большинства ультрадисперсных частиц, размер которых сравним с длиной волны рентгеновского излучения, отличается от кристаллической структуры макроскопической частицы материала, а ультрадисперсная система характеризуется чрезвычайно развитой внутренней поверхностью [1, 4]. Различие в работе выхода электронов с различных плоскостей кристалла вольфрама достигает 1 эВ, что может повлечь за собой упорядочивание ориентации кристаллографических осей в системе взаимодействующих частиц. Степень упорядоченной ориентации зависит от размера, взаимного расположения частиц и свойств окружающего их материала. Если предположить, что многократное рассеяние рентгеновского излучения на внутренних поверхностях ультрадисперсных систем, когерентное рассеяние на самих частицах и дифракционные эффекты на скоплениях частиц приводят к увеличению оптической длины пути, то вероятность фотопоглощения излучения в ультрадисперсной системе возрастает. Этим механизмом можно качественно объяснить низкое пропускание рентгеновского излучения ультрадисперсной системой и сравнительно высокую контрастность рентгеновского фотоотпечатка синтетической нити, покрытой слоем ультрадисперсных частиц.

Заключение. В расчетах прохождения рентгеновского излучения сквозь гомо- и гетерогенные преграды либо используют табулированные значения коэффициента ослабления для данного материала, либо учитывают элементарные акты взаимодействия фотонов с электронными оболочками атомов независимо от агрегатного состояния материала и физических свойств композиции или системы в целом [8]. Расчет взаимодействия рентгеновского излучения с ультрадисперсной системой, как свидетельствуют результаты измерений, требует отдельного рассмотрения.

Полученные результаты позволили провести инженерно-техническую разработку новых защитных и рентгеноконтрастных материалов на основе искусственных и натуральных волокон, создать изделия для экранирования источников рентгеновского излучения и защиты персонала. Имеются варианты спецодежды, ослабление рентгеновского излучения которой эквивалентно слою свинца толщиной 0,2—0,5 мм. Созданы новые методы дефектоскопии участков изделий, недоступных для прямого про-

хождения рентгеновского излучения. Контрастность отпечатков на рентгеновской фотопленке изготовленной хирургической нити в 2—3 раза выше по сравнению с хирургической нитью Мисгорас-600 и почти не меняется в течение полугода наблюдения в биологическом объекте. На основе ультрадисперсных частиц разработаны новые материалы и покрытия для защиты аппаратуры и изделий от воздействия рентгеновского излучения в космическом пространстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морохов И.Д., Трусов Л.И., Лановок В.Н. Физические явления в ультрадисперсных средах. М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Ткаченко В.И., Юпенков В.А., Крикун Ю.А. Явления аномального ослабления рентгеновского излучения ультрадисперсными средами. — Бюллетень ВАК РФ, 1994, № 5—6, с. 44.
3. Григорьева Л.К., Лидоренко Н.С., Нагаев Э.Л., Чижик С.П. Размерная зависимость фермиевской энергии и силы взаимодействия между высокодисперсными частицами. — Журн. эксп. и теор. физ., 1986, т. 91, вып. 3(9), с. 1050—1062.
4. Морохов И.Д., Трусов Л.И., Чижик С.П. Ультрадисперсные металлические среды. М.: Атомиздат, 1979.
5. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1990.
6. Артемьев В.А., Михнович В.В., Титаренко С.Г. Модель кинетики формирования областей разупорядочивания в полупроводниках с учетом деформаций. — Физика и техника полупроводников, 1988, т. 22, вып. 4, с. 750—753.
7. Воробьев В.А., Голованов В.Е., Голованова С.И. Методы радиационной гранулометрии и статистического моделирования. М.: Энергоатомиздат, 1984.
8. Киммель Л.Р., Машкович В.П. Защита от ионизирующего излучения. Справочник. М.: Атомиздат, 1972.

Поступила в Редакцию 28.09.94

УДК 621.039.58

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ПРИМЕСЕЙ ВБЛИЗИ РАДИАЦИОННО ОПАСНОГО ОБЪЕКТА

Романов В.И. (Институт глобального климата и экологии РАН)

Для своевременного принятия решений о защите населения, проживающего в зоне возможного влияния радиационно опасных объектов, необходимо иметь объективную и исчерпывающую информацию как о самом объекте, так и о выбросах загрязняющих веществ при его нормальной работе и аварии.

Известно [1], что радиационное влияние предприятий ядерной энергетики на окружающую среду проявляется в основном в результате газоаэрозольных выбросов, выход которых из объекта происходит, как правило, в виде струйного течения. Особенностью распространения радиоактивных примесей вблизи таких сооружений является их зависимость от локальных термических и ветровых режимов в месте расположения источника загрязнений. Механический перенос результатов лабораторных исследований распространения и диффузии потоков на натурные объекты без учета особенностей ветровой и тепловой интерференции с подстилающей поверхностью и другими зданиями может привести к ошибочным выводам.

Основной причиной возможных ошибок в расчетах является использование для получения количественной информации идеализированной модели образования первичного очага загрязнений в виде изолированного точечного источника. При таком подходе для прогнозирования радиоактивного загрязнения среды достаточно знания ограниченного числа физических и геометрических характеристик выброса и метеоусловий. Концентрация радионуклидов, выбрасываемых на высоте $z = H$ из точечного источника, записывается в следующем виде [2]: