

**АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ЭНЕРГЕТИКИ**

УДК 539.1.08

Компель Вера Геннадьевна

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНОГО  
ПЕРЕНОСА РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ И ОЦЕНКА  
РАДИАЦИОННЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ НА  
АЭС**

(05.14.03 - ядерные энергетические установки)

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук

36B-1

Минск - 1997

Работа выполнена в Институте радиоэкологических проблем НАН Беларуси и  
в Институте проблем энергетики НАН Беларуси

Научный руководитель -

доктор технических наук Николаев В.И.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук Трифонов А.Г.

доктор технических наук Жемжуров М.Л.

Оппонирующая организация - Институт радиобиологии НАН Беларуси

Защита состоится "21" октября 1997 г. в 12 ч.  
на заседании совета по защите диссертаций Д01.10.01 Института проблем  
энергетики НАН Б по адресу: 220109, г.Минск-Сосны, ИПЭ НАНБ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПЭ НАН Беларуси.

Автореферат разослан "13" августа 1997 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций



Б.Е. Тверковкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Для реконструкции дозовых нагрузок в южных регионах Беларуси, наиболее пострадавших в результате аварии на ЧАЭС, необходимо восстановить радиационную ситуацию в первые дни после аварии. Известно, что в результате выброса из Чернобыльского реактора в приземный слой атмосферы попало большое количество короткоживущих радионуклидов (включая изотопы I, La, Ba и др.), которые давали значительный вклад в мощность экспозиционной дозы внешнего облучения, а также формировали дозу внутреннего ингаляционного облучения. В силу быстрого распада короткоживущих радионуклидов в атмосфере экспериментальных данных по измерению полученных населением доз недостаточно для оценки дозовых нагрузок в первые дни после аварии. Единственным методом в данном случае является метод математического моделирования, который позволяет восстановить радиационную ситуацию в южных регионах Беларуси в первый послеаварийный период (до 1 года). Применение такого подхода дает возможность использовать комплексный анализ при оценке поглощенных доз с учетом многих факторов: динамики процессов выброса из аварийного реактора, метеоусловий, детальных экспериментальных измерений плотностей выпадения долгоживущих изотопов ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ) и короткоживущих изотопов ( $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{140}\text{La}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{131,132}\text{I}$ ,  $^{136}\text{Cs}$ ,  $^{239}\text{Np}$ ) на территории Беларуси. Эффективность и актуальность данной методики обусловлена принципиальной возможностью восстановления поглощенных доз в местах и населенных пунктах, где экспериментальные измерения вообще не были проведены вовремя. В настоящее время, спустя 11 лет после аварии большую значимость приобрела проблема вторичного загрязнения территорий под действием процессов пылеобразования от источников антропогенного происхождения, таких как источники техногенного пыления. Однако, моделей, адекватно отражающих эти процессы, не разработано.

**Связь работы с научными программами.** Исследования, представленные в работе, проводились и финансировались в рамках Государственной программы ликвидации последствий, связанных с Чернобыльской аварией 1986 г., разделы 3.3.2 и 3.17. Модели и программы использовались для обработки экспериментов, проводимых в Беларуси в 1991-1995гг. в рамках программы сотрудничества по Международному проекту, координируемому КЕС.

**Цели и задачи.** Основная цель - оценить атмосферный перенос радионуклидов из Чернобыльского реактора на основе комплексного исследования влияния различных факторов (метеорологических условий, интенсивности и

радионуклидного состава выбросов, количества и местоположения источников, времени и скорости движения облаков, интенсивности осадков, и т.д.). Провести исследования объемного загрязнения воздуха, поверхностного загрязнения за счет выпадений из облака и сделать оценки внешнего и внутреннего ингаляционного облучения в первый поставарийный период в местах, где экспериментальные измерения не были проведены. Рассчитать радиационные загрязнения короткоживущими радионуклидами ряда населенных пунктов Гомельской области: Брагина, Хойников, Наровли, Ельска, Лельчиц. Оценить вклад короткоживущих радионуклидов на величину полученных доз внешнего и внутреннего ингаляционного облучения. Решить обратную задачу - восстановить параметры источника и динамику выброса из Чернобыльского реактора (провести реконструкцию мощности выброса  $^{137}\text{Cs}$  из реактора в период 27-28 апреля 1986г.) по имеющимся экспериментальным данным. Провести оценку вторичного загрязнения территорий под действием процессов пылеобразования от источников техногенного пыления. Рассчитать коллективные дозы облучения и сделать оценки риска возникновения онкологических заболеваний в ряде населенных пунктов на юге Беларуси. Провести оценку радиоактивных выбросов в окружающую среду и аварийных уровней облучения населения при проектных и запроектных авариях на АЭС средней мощности нового поколения с блоками ВВЭР-640.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- разработать математические модели миграции радионуклидов в атмосфере, учитывающие одновременно: современные данные о динамике выброса из поврежденного реактора, метеорологические условия, включая скорости и направление ветра, диффузионные параметры атмосферы и физические свойства переносимых примесей;
- создать математические модели переноса примесей от источника техногенного пыления, учитывающие мощность и высоту источника выброса, скорость и направление ветра, диффузионные параметры атмосферы, скорости сухого и гравитационного осаждения переносимых примесей;
- создать на основе разработанных моделей и алгоритмов пакеты компьютерных программ с применением современных компьютерных технологий (графики и др.) для эффективного комплексного анализа и прогноза различных радиационных ситуаций;
- провести численные эксперименты по разработанным программам и оценить дозовые нагрузки и риск возникновения онкологических заболеваний для жителей

ряда населенных пунктов южных регионов Беларуси (Брагин, Наровля, Хойники, Ельск, Лельчицы) Беларуси в первый, наиболее важный, поставарийный период;

- рассчитать радиоактивные выбросы в окружающую среду и аварийные уровни облучения населения при проектных и запроектных авариях на АЭС средней мощности нового поколения с блоками ВВЭР-640.

**Научная новизна.** Разработанные в диссертации математические модели и программы впервые позволили провести комплексные исследования влияния различных факторов (метеорологических условий, интенсивности и радионуклидного состава выбросов, количества и местоположения источников, времени и скорости движения облаков, интенсивности осадков, и т.д.) на атмосферный перенос радионуклидов из Чернобыльского реактора. Проведены исследования объемного загрязнения воздуха, поверхностного загрязнения за счет выпадений из облака и сделаны оценки внешнего и внутреннего ингаляционного облучения в первый поставарийный период в местах, где экспериментальные измерения не были проведены.

В результате проведенных исследований впервые рассчитаны радиационные загрязнения короткоживущими радионуклидами ряда населенных пунктов Гомельской области: Брагина, Хойников, Наровли, Ельска, Лельчиц. На основе разработанных в диссертации компьютерных программ NIKAT, DOZA, DUST оценен вклад короткоживущих радионуклидов на величину полученных доз внешнего и внутреннего ингаляционного облучения. Сделана попытка решения обратной задачи по восстановлению параметров источника и динамики выброса из Чернобыльского реактора (проведена реконструкция мощности выброса  $^{137}\text{Cs}$  из реактора в период 27-28 апреля 1986г.) по имеющимся экспериментальным данным. Проведено моделирование линейного источника техногенного пыления и восстановлены его параметры по имеющимся экспериментальным измерениям концентрации на базе моделей и программ NIKAT, DUST. Рассчитаны коллективные дозы облучения и сделаны оценки риска возникновения онкологических заболеваний в ряде населенных пунктов на юге Беларуси. Оценены радиоактивные выбросы и аварийные уровни облучения населения при проектных и запроектных авариях на АЭС средней мощности нового поколения с блоками ВВЭР-640.

**Практическая ценность.** Результаты расчетов и исследований, проведенных в диссертации, позволили реконструировать дозовые нагрузки населения с учетом восстановления общей картины радиохимических загрязнений в некоторых наиболее загрязненных регионах в начальный период после Чернобыльской аварии. Созданные модели и программы были использованы для практического применения

при прогнозировании поведения радионуклидов в поставарийный период на территории южных регионов Беларуси в рамках Национальной программы ликвидации последствий, связанных с Чернобыльской аварией. Выполнены целевые работы по темам: "Реконструкция и прогнозирование риска, радиационной безопасности и дозовых ингаляционных нагрузок населения в южных регионах Беларуси", "Провести оценку и дать прогноз ингаляционного поступления радионуклидов в организм при техногенном и естественном пылении" и др.

**Экономическая значимость.** Компьютерные программы, созданные по моделям переноса примеси в атмосфере, позволяют учитывать различные параметры (диффузионные параметры атмосферы, высоту источника выброса, радиационный распад, химические превращения примеси и др.) и поэтому могут быть использованы для решения широкого ряда задач: распространение загрязнений от промышленных объектов, от автомагистралей (линейные протяженные источники). Модели и программы позволяют рассчитывать среднегодовое загрязнение региона при действии одного или нескольких независимых источников. Компьютерные программы расчета доз внешнего и внутреннего облучения позволяют рассчитывать дозы облучения различными радионуклидами с учетом временного распределения в приземном слое и на поверхности почвы.

**Автор защищает:**

- математические модели, алгоритмы и программы NIKAT, DUST для расчета переноса примесей в атмосфере;
- разработанную программу расчета дозовых нагрузок DOZA;
- результаты численных исследований, включая расчеты плотностей выпадения основных дозообразующих радионуклидов на поверхности почвы для различных интервалов времени со времени аварии, расчеты объемной концентрации радионуклидов в воздухе, расчеты внешних и внутренних ингаляционных доз.

**Личный вклад.** В диссертации использованы результаты научных исследований, выполненных автором самостоятельно, а также при его участии в 1994-1997 гг.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы опубликованы в материалах и докладывались автором на:

- Международной конференции "Десять лет после Чернобыльской катастрофы" в АН РБ, Минск, 1996г;
- 24th DOE/NRC Nuclear Air Cleaning and Treatment Conference, 1996;
- Int. Conf. on Environmental Pollution (ICEP.3), Budapest, Hungary, 15-19 April, 1996.

- 28th Anniversary Meeting of Fachverband fur Strahlenschutz e.V.- Hannover, 23-25 Okt., 1996.
- Meeting for the '96 International Symposium on the Nuclear Energy and the Environment ('96NEE).- Beijing, China, 6-9 may, 1996.
- 2nd Int. Symp. and Workshop on Biological Environmental Specimen Banking.- Sweden, Stockholm, 20-23 May, 1996.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано восемь печатных работ .

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав и выводов. В первой главе сделан анализ проблемы и сформулирована задача исследования; во второй - представлены математические модели переноса примесей в атмосфере, изложены методы решения; в третьей - представлены модели расчета доз внешнего и внутреннего ингаляционного облучения; в четвертой - проведено обоснование достоверности математических моделей и полученных результатов, в пятой - представлены основные результаты, описаны пакеты компьютерных программ, в шестой - проведена оценка радиоактивных выбросов и аварийных уровней облучения населения при проектных и запроектных авариях на АЭС средней мощности нового поколения с блоками ВВЭР-640.

Стр. 127, ил.25, табл.9 , библиогр.119.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследования и определена цель работы. Дано содержание диссертации по главам, предложены основные положения защищаемые автором.

**Первая глава** посвящена обзору и анализу работ по проблеме исследования. В общем случае математическое моделирование атмосферной диффузии основано на двух концепциях: первая - на основе статистической теории, конечным результатом которой является гауссова модель распределения, и вторая - на основе численного или аналитического решения дифференциальных уравнений переноса. Для обоих направлений возможно применение эйлеровых и лагранжевых систем координат. Наряду с типичными эйлеровыми и лагранжевыми моделями существуют гибридные. В некоторых случаях, когда граничные и начальные условия не очень сложны, возможно использование достаточно простых аналитических решений дифференциального уравнения турбулентной диффузии, в других случаях методы современной вычислительной математики дают возможность построения значительного числа алгоритмов и эффективных разностных схем для его решения. Как показал анализ, такие модели нашли применение для описания переноса

радиоактивных веществ, выброшенных в результате аварии на ЧАЭС. Однако, эти модели либо слабо учитывают метеорологические параметры атмосферы и динамику выброса радионуклидов из разрушенного реактора, либо моделируют радиоактивный след загрязнения за пределами южных регионов Беларуси.

В этой главе, кроме того, представлены обзор и анализ методов расчета доз облучения. Отмечено, что предметом исследования являются прямые пути облучения, к которым относятся: внешнее облучение от фотонов и  $\beta$ -частиц и внутреннее ингаляционное облучение. Представлены модели оценки доз внешнего облучения для населения загрязненных районов в результате аварии на ЧАЭС. Показано, что для оценки доз внутреннего облучения существуют два основных математических метода: метод коэффициентов концентрирования (КК), представляющий собой простые арифметические отношения установившихся в отдельных звеньях системы концентраций и метод системного анализа (СА), при котором перемещение радионуклидов между камерами, как функция времени, может быть описано дифференциальными уравнениями. Показаны преимущества и недостатки обеих методов. Приведены примеры использования обеих моделей для расчета доз внутреннего облучения населения, проживающего на загрязненных радионуклидами территориях.

В заключение раздела на основании анализа формулируется **постановка задачи**, которая включала:

- разработку математических моделей миграции радионуклидов в атмосфере, учитывающих современные данные о динамике выброса из поврежденного реактора, метеорологические условия, диффузионные параметры атмосферы и физические свойства переносимых примесей;
- создание пакетов компьютерных программ, реализующих разработанные математические модели;
- разработку программ расчета дозовых нагрузок при ингаляционном облучении, учитывающих метаболизм в различных отделах легочной системы;
- проведение численных экспериментов по разработанным программам NIKAT, DOZA, DUST по исследованию атмосферной дисперсии радионуклидов, реконструкции дозовых нагрузок на население южных регионов Беларуси в первый (наиболее важный) поставарийный период;
- оценку на основании обобщения и анализа результатов для некоторых населенных пунктов южных регионов Беларуси (Брагин, Хойники, Наровля, Ельск, Лельчицы) риска возникновения онкологических заболеваний.



Во второй главе представлены математические модели переноса примесей в атмосфере на базе Лагранжевой траекторной модели и основанные на решении уравнения турбулентной диффузии. Для лагранжевой траекторной модели основное уравнение для распределения примеси в пространстве с учетом поглощения на земной поверхности может быть записано следующим образом:

$$\chi(x, y, z, t) = \frac{Q_s \Psi(z, t)}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + R_g \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (1)$$

где дисперсии  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$  определяются из таблиц Пэскуила - Гиффорда, а функция распределения вертикальной концентрации примеси  $\Psi(z, t)$  определяется из дифференциального уравнения. Уравнение (1) позволяет построить модель, имитирующую развитие во времени и пространстве несколько факелов или струй, образованных от нескольких независимых источников с разными параметрами в переменном поле ветра. В модели предусмотрен учет вторичного ветрового подъема осевшей на землю примеси за счет пылеобразования, влажное и сухое осаждение примеси на подстилающую поверхность, химическая и радиационная трансформация примеси. Модель реализована в виде пакета программ NIKAT для ПЭВМ.

В данной главе представлена модель и получено численное решение для линейного источника техногенного пыления. Уравнение атмосферной диффузии решалось в следующем виде:

$$u \frac{\partial q}{\partial x} - w \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial q}{\partial y} \quad (2)$$

Граничные условия:

$$uq = M \delta(y) \delta(z-H) \quad \text{при } x=0, \quad (3)$$

$$q \rightarrow 0 \quad \text{при } |y| \rightarrow \infty, \quad q \rightarrow 0 \quad \text{при } |z| \rightarrow \infty, \quad (4)$$

$$k_z \frac{\partial q}{\partial z} - wq = 0 \quad \text{при } z=0 \quad (5)$$

Соотношение для коэффициента турбулентного обмена  $k_y$ :  $k_y = k_0 u$  позволяет в случае, когда  $u$  и  $k_z$  заданы степенными функциями от  $z$  применить известное

аналитическое решение (Берлянд) для наземной концентрации примеси от линейного источника:

$$q_n = \frac{MH^{\omega(1+n)}u_1^{\omega}}{2(1+n)^{1+2\omega}\Gamma(1+\omega)(k_1x)^{1+\omega}} \exp\left[-\frac{u_1H^{1+n}}{(1+n)^2k_1x}\right] \times \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{y+L/2}{\sqrt{2}\varphi_0x}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-L/2}{\sqrt{2}\varphi_0x}\right) \right] \quad (6)$$

где  $\omega = w/k_1(1+n)$ ,  $w$  - скорость осаждения частиц на почву, которая определялась по формуле Стокса,  $M$  - мощность источника,  $H$  - высота источника,  $\varphi_0$  - дисперсия скорости ветра. Модель реализована в виде пакета компьютерных программ DUST\_1.

Для численного решения уравнения турбулентной диффузии применен метод конечных элементов (МКЭ). В работе представлены методика и программы, реализующие МКЭ, а также опыт автора при работе и исследованиях на основе МКЭ. Для линейного источника техногенного пыления было найдено распределение концентраций примеси в плоскости  $x, z$  путем решения уравнения турбулентной диффузии (2) для линейного источника, которое в этом случае имеет вид

$$u \frac{\partial q}{\partial x} - w \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q}{\partial z} \quad (7)$$

Граничные условия:

$$q \rightarrow 0 \text{ при } z \rightarrow \infty ; \quad (8)$$

$$k_z \frac{\partial q}{\partial z} + (w - v_s)q = 0, \quad \text{при } z=0 \quad (9)$$

где  $v_s$  - скорость сухого осаждения примеси на поверхность;

$$uq = M\delta(z-H), \quad \text{при } x=0 \quad (10)$$

Применение МКЭ в совокупности с методом Галеркина приводит к системе алгебраических уравнений, которую с использованием традиционных обозначений можно записать в следующем виде:

$$[K]\{q\} = \{F\}, \quad (11)$$

где  $[K]$  - глобальная матрица жесткости;  $\{F\}$  - глобальный вектор нагрузки;  $\{q\}$  - вектор искомых решений. Модель реализована в виде пакета прикладных программ DUST\_2.

В третьей главе рассматриваются модели расчета дозовых нагрузок при внешнем и внутреннем облучении. Мощность эквивалентной дозы внешнего облучения от облака и от почвенных радионуклидов определялась через соответствующие дозовые коэффициенты с учетом распада радионуклидов.

Приведены две базовые модели расчета доз внутреннего облучения: однокамерная и многокамерная модели. Наиболее простым способом, и во многих случаях достаточно эффективным, дозу внутреннего облучения можно определить из концепции биологического выведения радионуклидов из организма человека, используя однокамерную модель. Если поступление нуклидов в организм продолжается ограниченное время  $t_1$  (сут), а равновесия между поступлением и выведением не наступало, то эквивалентная доза облучения органа ( $Zв$ ) за время  $t=t_1+t_2$ , где  $t_2$  - время (сут) после прекращения поступления радионуклидов в организм может быть получена из уравнения

$$H_{t_1} + H_{t_2} = \frac{2 \cdot 10^{-8} F \cdot E_{\alpha\phi} T_{\alpha\phi}}{m} \left[ t_1 - (1 - \exp(-\lambda_{\alpha\phi} t_1)) \exp(-\lambda_{\alpha\phi} t_2) / \lambda_{\alpha\phi} \right]. \quad (12)$$

Для более точной оценки, учитывающей большее количество факторов, используется более сложная, многокамерная модель. При вдыхании радиоактивных аэрозолей облучаются отдельные части (отделы) дыхательной системы. Другие органы и ткани организма облучаются как излучением от легких, так и в результате перемещения ингалированных веществ из дыхательной системы в другие ткани организма. Оценки распределения и удержания вещества в дыхательной системе основаны на модели, предложенной в Публикации 30 МКРЗ. Эта модель принимает в расчет размер частиц и определяет три класса удержания, которые частично отражают химическую форму аэрозоля. Дополнительно модель позволяет получить информацию о различных путях выведения из легких. Система дифференциальных уравнений, описывающих распределение радионуклида в организме может быть записана в виде:

$$\frac{d}{dt} q_i(t) = I(t) - \lambda_i \cdot q_i(t) - \lambda_R \cdot q_i(t), \quad i=1,2,\dots,n \quad (13)$$

где  $n$  - число рассматриваемых отделов легочной системы, органов и тканей организма,  $I(t)$  - скорость поступления радионуклида в камеру  $i$ ,  $\lambda_i$  - скорость биологического выведения из камеры  $i$ ,  $\lambda_R$  - постоянная радиоактивного распада нуклида. Система (13) решена обобщенным методом Рунге-Кутты для системы жестких дифференциальных уравнений.

**Четвертая глава** посвящена обоснованию достоверности математических моделей и методов решения. Проверка численных результатов проводилась на основе общепринятых в данном случае приемах:

- проверки самой численной схемы решения уравнения Эйлера с целью получения информации о точности аппроксимирующих функций и устойчивости вычислительной процедуры метода конечных элементов;
- сравнении результатов расчета по моделям с экспериментальными измерениями;
- сопоставлении восстановленной мощности источника техногенного пыления с имеющимися в литературе полуэмпирическими зависимостями.

Разность между значением искомой функции, найденным при численном решении уравнения (7) и значением самой пробной функции не превышала для линейной функции - 7% на левой вертикальной границе области и  $10^{-4}\%$  в остальных точках области. Для экспоненциальной пробной функции расхождения не превышали  $0,5 \cdot 10^{-3}\%$ .

С помощью моделей, разработанных в главе 2 и пакетов программ NIKAT и DUST была проведена обработка экспериментальных измерений распространения радионуклидов в атмосфере и восстановлены параметры техногенного источника пыления по имеющимся значениям приземной концентрации в заданных точках площадки. Отклонения между расчетными и экспериментальными данными в этом случае не превышали 35-40%. Отклонение восстановленной мощности источника техногенного пыления от рассчитанной по полуэмпирической формуле не превышало 20%.

**В пятой главе** представлены основные результаты исследований и описаны принципы построения пакетов разработанных компьютерных программ. На рис. 1 и 2 показаны распределения концентрации цезия на поверхности земли и в приземном слое в условиях техногенного пылеобразования. На основе обработки экспериментальных измерений была рассчитана мощность источника пыления. Модели и программы могут быть использованы для любых источников техногенного пыления.



Пути распространения радионуклидов в первые несколько суток по территории южных регионов Беларуси (Гомельская и частично Могилевская области) можно проследить на рис.3, на котором отражены три основных следа распространения радионуклидов в первые дни после аварии.

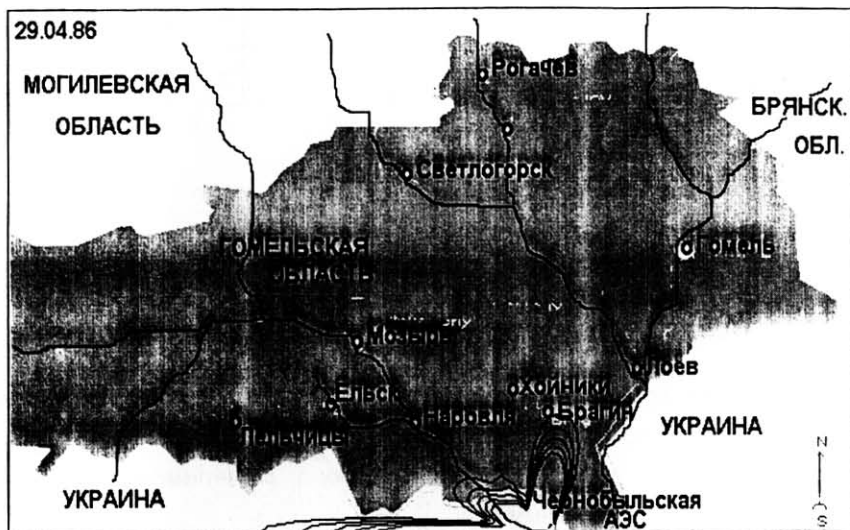


Рис. 3. Карта Гомельской области и расчетные значения изолиний приземной концентрации для рутения-103:  $\min=1,5 \cdot 10^3$ ,  $\max=4,0 \cdot 10^3$  Бк/м<sup>3</sup>

Таблица 1. Процентные отклонения между экспериментальными измерениями поверхностного загрязнения по <sup>137</sup>Cs и расчетными значениями

Брагин	Наровля	Хойники	Ельск	Лельчицы
-14,9	+18,0	-27,5	-2,8	+8,0

На основе решения обратной задачи по восстановлению параметров источника и динамики выброса была проведена реконструкция мощности выброса <sup>137</sup>Cs из реактора в период 27-28 апреля 1986г. Общее количество выброса составило около 0,188 МКи <sup>137</sup>Cs за период 27-28 апреля 1986г. при мощности выброса 2,9 Ки/с.

Особое место в работе занимает оценка доз внешнего, внутреннего ингаляционного облучения и риска возникновения онкологических заболеваний

(таблица 2). С этой целью разработана программа DOZA. Расчеты показали, что основная доза внешнего облучения от почвы в первые дни после аварии определялась, главным образом, вкладом  $^{140}\text{La}$ ,  $^{133,131}\text{I}$ ,  $^{105}\text{Rh}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ , и  $^{95}\text{Zr}$ , а вот при расчетах дозы от облака необходимо учитывать  $^{140}\text{Ba}$  и  $^{106}\text{Ru}$ . Через год после аварии основной вклад в дозу внешнего облучения вносили изотопы  $^{134,137}\text{Cs}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{103,106}\text{Ru}$ ,  $^{140}\text{La}$ . Максимальные значения индивидуальных доз при внешнем облучении по результатам расчетов составили в период с 26 апреля по 10 мая 1986 года для жителей г.Брагина около 29-30 мЗв, где среднее поверхностное загрязнение по  $^{137}\text{Cs}$  составляло около 32 Ки/км<sup>2</sup>, а объемная концентрация в воздухе достигала  $0,5-0,6 \cdot 10^{-7}$  Ки/м<sup>3</sup> по  $^{137}\text{Cs}$  и  $0,5 \cdot 10^{-6}$  Ки/м<sup>3</sup> по  $^{131}\text{I}$ . Доза внешнего облучения от облака составила около 20% дозы внешнего облучения от почвы во время прохождения облаков (до 10 мая). Значения индивидуальных доз при внешнем облучении от почвы и от облака в период с 26 апреля по 10 мая 1986г. для жителей других населенных пунктов составили: для Хойников - 15,5 мЗв, из которых 12,5 мЗв - облучение от почвы; для Наровли - 20,5 мЗв; для Лельчиц - 2,5 мЗв; для Ельска - 14,0 мЗв.

Расчет доз внутреннего ингаляционного облучения показал, что доза облучения щитовидной железы от  $^{131}\text{I}$  за первый месяц после аварии для г.Брагина составила около 22 мГр, а полная доза облучения щитовидной железы от  $^{131}\text{I}$  равнялась 28 мГр, от  $^{133}\text{I}$  - 26 мГр, от  $^{135}\text{I}$  - 1,6 мГр. Суммарная эффективная эквивалентная доза внутреннего облучения составила за этот же период около 2,5 мЗв, а за первый год после аварии около 5,2 мЗв. Эквивалентная доза от рассматриваемых радионуклидов, полученная легкими, составила для г.Брагина  $\approx 19$  мЗв за 1 месяц после аварии при высокой растворимости рассматриваемых радионуклидов с АМАД=1мкм. В дозу, полученную легкими, основной вклад внесли изотопы  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{140}\text{La}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{143,144}\text{Ce}$  (по мере убывания дозы). При изменении АМАД радионуклидов с 1мкм до 0,2мкм эквивалентная доза, полученная легкими, изменялась примерно в 2 раза и составила для г.Брагина 38,0 мЗв через месяц после аварии. При уменьшении растворимости веществ наблюдалось существенное увеличение дозы, полученной легкими. Так, для радионуклидов с АМАД 1мкм для г.Брагина эквивалентная доза, полученная легкими, увеличилась до 120,0 мЗв через месяц после аварии, т.е.  $\approx 6$  раз, а через год после аварии достигла 500,0 мЗв, что превышает  $\approx 26$  раз дозу для радионуклидов, имеющих быструю растворимость. На основе расчета коллективных доз сделана оценка риска онкологических заболеваний для взрослого населения пяти населенных пунктов на юге Беларуси. Расчеты показали, что значения риска онкологических

заболеваний для взрослого населения - наибольшие для жителей Хойников, а наименьшие для жителей Лельчиц и составляют соответственно 36,5 и 1,8.

**Таблица 2.** Расчетные значения коллективных доз и риска

Населенный пункт	Значение коллективной дозы, чел.* Зв	Риск
Брагин	580	29,0
Наровля	629	31,5
Хойники	730	36,5
Ельск	480	24,0
Лельчицы	36	1,8

В шестой главе представлены расчеты радиоактивных выбросов в окружающую среду и аварийных уровней облучения населения при проектных и запроектных авариях на АЭС средней мощности нового поколения с блоками ВВЭР-640, выполненные на основе разработанных в диссертации моделей.

## ВЫВОДЫ

1. Разработанные в диссертации траекторная модель переноса примеси в атмосфере и программа ПК NIKAT позволяют моделировать реальные процессы атмосферного переноса радионуклидов из Чернобыльского реактора с учетом метеорологических условий и современных данных о величине выброса из разрушенного реактора. Результаты расчетов достаточно хорошо согласуются с экспериментальными измерениями поверхностного загрязнения по  $^{137}\text{Cs}$  для исследуемых населенных пунктов (Брагин, Хойники, Наровля, Лельчицы, Ельск). Различия между расчетными и экспериментальными данными не превышало 27-28%. Результаты расчетов поверхностного загрязнения по  $^{131}\text{I}$  хорошо согласуются с экспериментальными измерениями. Так, например, для г.Брагина отклонение между экспериментальными и расчетными данными не превышало 14%.
2. На основе решения обратной задачи по восстановлению параметров источника и динамики выброса была проведена реконструкция мощности выброса  $^{137}\text{Cs}$  из реактора в период 27-28 апреля 1986г. Общее количество выброса составило около 0,188 МКи  $^{137}\text{Cs}$  за период 27-28 апреля 1986г. при мощности выброса 2,9 Ки/с.
3. На основе разработанных в диссертации моделей проведена численная обработка экспериментальных измерений пылепереноса при техногенном пылении в регионах с поверхностным загрязнением почвы до 40 Ки/км<sup>2</sup> и удельной активностью до 12Бк/г. Расхождения расчетных и экспериментальных значений не превышали 35-40%.



4. Достоверность математических моделей и полученных численных результатов обоснована апробированием численной схемы методом пробной функции, сравнением результатов расчета с экспериментальными измерениями и сопоставлением восстановленной мощности источника техногенного пыления с имеющимися в литературе полуэмпирическими зависимостями. Значения пробных функций, полученных при численном решении уравнения турбулентной диффузии методом конечных элементов совпали с точными аналитическими решениями с точностью до  $10^{-4}\%$  для линейной и  $0,5 \cdot 10^{-3}\%$  для экспоненциальной пробной функции. Отклонение восстановленной мощности источника техногенного пыления от рассчитанной по полуэмпирической формуле не превышало 20%.

5. Разработанные в диссертации программы расчета дозовых нагрузок впервые позволили оценить дозы внешнего облучения и внутреннего ингаляционного облучения с учетом метаболизма в различных отделах легочной системы. Рассчитаны коллективные дозы облучения и оценен риск онкологических заболеваний. Исследования были выполнены для пяти населенных пунктов (Брагин, Хойники, Наровля, Лельчицы, Ельск), расположенных на различных расстояниях и азимутальных направлениях относительно источника выброса для 19 изотопов:  $^{134,136,137}\text{Cs}$ ,  $^{103,106}\text{Ru}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{140}\text{La}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{131,132,133,135}\text{I}$ ,  $^{141,143,144}\text{Ce}$ ,  $^{239}\text{Np}$ ,  $^{95}\text{Zr}$  и  $^{105}\text{Rh}$ .

6. На основе разработанных в диссертации моделей рассчитаны радиоактивные выбросы в окружающую среду и аварийные уровни облучения населения при проектных и запроектных авариях на АЭС средней мощности нового поколения с блоками ВВЭР-640.

7. Разработанные проблемно-ориентированные программные комплексы (ПК) NIKAT, DUST, DOZA являются эффективным средством для оперативной оценки атмосферного переноса примесей и расчета доз облучения. Модели и программы переноса примесей в атмосфере и расчета дозовых нагрузок позволяют одновременно учитывать влияние многих факторов: мощности и высоты источника выброса, размеров и плотности осаждаемых частиц, скорости и направления ветра, диффузионных параметров атмосферы, скорости сухого и влажного осаждения, химических и радиационных превращений примеси и др.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

1. Николаев В.И., Шароваров Г.А., Яцко С.Н., Компель В.Г. Обработка экспериментальных измерений атмосферного переноса радионуклидов при

- техногенном пылении на основе программных продуктов NIKAT и DUST.-  
Препринт/ ИРЭП АНБ. - Минск, 1996. - 30 с
2. Николаев В.И., Ролевич И.В., Яцко С.Н., Компель В.Г. Оценка поглощенных доз внешнего и ингаляционного облучения Беларуси от короткоживущих радионуклидов на основе современных данных о радиоактивных выбросах из Чернобыльского реактора.-Препринт/ ИРЭП АНБ.- Минск, 1996.-28с.
  3. Nikolaev V.I., Kompel V.G. The Modelling of Airborne and Reconstruction of Inhalation Population Dose and Risk Assessment in the South Regions of Belarus after Chernobyl NPP Accident.// Proc. of the Int. Conf. on Environmental Pollution (ICEP.3).-Budapest, Hungary, 15-19 April, 1996.
  4. Nikolaev V.I., Kompel V.G. Radionuclide Contamination and Exposures from External Radiation and from Inhalation due to the Chernobyl Accident in the South Regions of Belarus.// Proc. of the 24th DOE/NRC Nuclear Air Cleaning and Treatment Conf.- Portland, USA, 15-18 July, 1996.
  5. Nikolaev V.I., Kompel V.G. The Simulation of Environment Contamination and the Assessment of External and Inhalation Doses in the Gomel's Region of Belarus after the Chernobyl NPP Accident.// Proc. of the 28th Anniversary Meeting of Fachverband fur Strahlenschutz e.V.- Hannover, 23-25 Okt., 1996.
  6. Nikolaev V.I., Kompel V.G. The Risk Assessment of the Exposure Consequences for the Population of the South Regions of Belarus after Chernobyl NPP Accident.// Proc. of the Meeting for the '96 International Symposium on the Nuclear Energy and the Environment ('96NEE).- Beijing, China, 6-9 May, 1996.
  7. Nikolaev V.I., Kompel V.G. Measurements and Modelling of Airbornes, Reconstruction of Population Dose and Risk Assessment: Methods and Applications in the Environment in the Post Chernobyl Period.// Proc. of the 2nd Int. Symp. and Workshop on Biological Environmental Specimen Banking.- Sweden, Stockholm, 20-23 May, 1996.
  8. Николаев В.И., Компель В.Г., Ролевич И.В., Яцко С.Н. Оценка доз внешнего и внутреннего ингаляционного облучения в первый поставарийный период на основе современных данных по выбросам из Чернобыльского реактора// Межд. науч. конф. "Десять лет после Чернобыльской катастрофы": Тез. докл. конф.- Минск, 1996.- С.214.



## РЕЗЮМЕ

Компель Вера Геннадьевна, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНОГО ПЕРЕНОСА РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ И ОЦЕНКА РАДИАЦИОННЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ НА АЭС

Турбулентная диффузия, радионуклид, приземная концентрация, эквивалентная доза, ингаляционное облучение, радиационный риск.

Сделан анализ радиационной обстановки в южных регионах Беларуси в первый период (до 1 года) после аварии на ЧАЭС на основе траекторной модели переноса примеси в атмосфере, программ расчета дозовых нагрузок внешнего и внутреннего ингаляционного облучения. Оценен риск возникновения онкологических заболеваний в ряде населенных пунктов Гомельской области (Брагин, Хойники, Наровля, Лельчицы, Ельск). Проведена реконструкция выбросов из Чернобыльского реактора на основе экспериментальных данных. Исследовано вторичное загрязнение территорий под действием процессов пылеобразования от линейного источника техногенного пыления на базе траекторной модели Лагранжа и модели, основанной на численном решении уравнения турбулентной диффузии. Сделана оценка радиоактивных выбросов в окружающую среду и аварийных уровней облучения населения при проектных и запроектных авариях на АЭС средней мощности нового поколения с блоками ВВЭР-640.

## РЭЗЮМЭ

Компель Вера Генадзьеўна, МАТЭМАТЫЧНАЕ МАДЭЛІРАВАННЕ АТМАСФЕРНАГА ПЕРАНОСУ РАДЫЁАКТЫВНЫХ РЭЧЫВАУ І АЦЭНКА РАДЫЯЦЫЙНЫХ ВЫНІКАУ АВАРЫЙНЫХ ВЫКІДАУ НА АЭС

Турбулентная дыфузія, радыёнуклід, прыземная канцэнтрацыя, эквівалентная доза, інгаляцыйнае апраменьванне, радыяцыйная рызыка.

Зроблен аналіз радыяцыйнага становішча у паўднёвых рэгіёнах Беларусі ў першы перыяд (да 1 году) пасля аварыі на ЧАЭС на аснове траекторнай мадэлі пераносу прымесі ў атмасферы, праграм разліку дозавых нагрузкаў знешняга і унутранага інгаляцыйнага апраменьвання. Ацэнена рызыка узнікнення анкалагічных захворванняў у шэрагу населеных пунктаў Гомельскай вобласці (Брагін, Хойнікі, Нароўля, Лельчыцы, Ельск). Праведзена рэканструкцыя выкідаў з Чэрнобыльскага рэактара на аснове эксперыментальных даных. Даследавана другаразовае забруджванне тэрыторый пад уздзеяннем працэсаў пылаутварэння ад лінейнай крыніцы тэхнагеннага пылення на базе траекторнай мадэлі Лагранжа і мадэлі,

2A427407

заснаванай на лікавым рашэнні ураўнення турбулентнай дыфузіі. Зроблена ацэнка радыяцыйных выкідаў у навакольнае асяроддзе і ацэнка рызыкі апраменьвання насельніцтва пры праектных і пазапрае сярэдняй магутнасці новага пакалення з блокамі ВВЭР-640.



6000000 1752988

## SUMMARY

Kompel Vera, THE SIMULATION OF RADIONUCLIDE TRANSPORT IN ATMOSPHERE AND RADIOACTIVE CONSEQUENCES ASSESSMENT OF NPS ACCIDENTS .

Turbulent diffusion, radionuclide, dose equivalent, radiation risk, trajectory model, inhalation dose.

The analysis of radioactive contamination at the short post period after Chernobyl accident ( 1 year) have been performed on the basis of the Lagrangian trajectory model, external and inhalation population dose computer codes. Risk assessment of cancer disease has been done in the five settlements of Gomel's region (Bragin, Hoiniki, Narovlia, Lelchici, Elsk). The Chernobyl release reconstruction has been performed on the basis of experimental measurements. The problem of resuspension from the linear source of dust generator has been investigated on the basis of the Lagrangian trajectory model and numerical solution of turbulence diffusion equation. Environment radioactive consequences and radiation exposure population dose assessment have been done when projective and overprojective accidents at the middle power new generation nuclear power stations with WWER-640 blocks are happened.

