Modeling Technology of the Radioactive Pollutants Propagation in Densely Built and Populated Areas

ЭКОЛОГИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ / ENVIRONMENTAL ASPECTS OF NUCLEAR POWER

УДК 504.61:351.78:614.8:61/69

DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2025.2.09 Оригинальная статья / Original paper

Технология моделирования распространения радиоактивных загрязняющих веществ в условиях сложной застройки

А.Г. Царина, Е.Г. Алексанян, Л.М. Хачатурова, И.В. Стогова, Г.Н. Фреймундт

НПО «Тайфун»,

249038 Россия, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Победы, 4

Реферат. Рассматривается система оперативного прогнозирования процессов переноса и рассеяния радионуклидов, попавших в атмосферу в результате аварии. Представлено описание программного комплекса, реализующего технологию моделирования полей концентрации радиоактивных загрязняющих веществ над урбанизированными территориями по конкретным метеорологическим данным и заданным источникам загрязнения. Для проведения расчетов строится цепочка взаимодействия вычислительных модулей, включающая в себя предпроцессинг, обеспечивающий подготовку модели расчетной области с оптимизированными границами зданий и цифровым макетом рельефа; процессинг, выполняющий построение трехмерных полей ветра с учетом застройки, моделирование переноса загрязнения и получение полей объемной концентрации загрязняющих веществ и постпроцессинг, позволяющий наглядно представить результаты расчетов в табличном, графическом и анимированном видах. Приведено сопоставление получаемых при тестировании основных программных модулей данных с опубликованными в научной литературе материалами натурных и вычислительных экспериментов. В частности, проведено сравнение полей скорости ветра и рассмотрены диффузионные эксперименты, получены хорошие показатели согласованности. Показаны результаты применения программного комплекса для решения задач моделирования формы облака при аварийном загрязнении урбанизированной территории и оценки интегрального радиационного воздействия поступивших при аварийном выбросе загрязняющих веществ.

Ключевые слова: оперативная модель, распространение радиоактивной примеси, застройка, поле ветра, оценка воздействия радиационного загрязнения.

Для цитирования: Царина А.Г., Алексанян Е.Г., Хачатурова Л.М., Стогова И.В., Фреймундт Г.Н. Технология моделирования распространения радиоактивных загрязняющих веществ в условиях сложной застройки. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;2:100–113. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2025.2.09

[©] Царина А.Г., Алексанян Е.Г., Хачатурова Л.М., Стогова И.В., Фреймундт Г.Н., 2025

Введение

Федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии и стандартами МАГАТЭ, обеспечивающими безопасность атомных электрических станций (АЭС), предусматривается в условиях радиационной аварии оперативная выработка мер по ликвидации последствий радиационной аварии и защите населения [1]. Для обоснованного определения таких мер необходимо создание специализированных систем, имеющих в своем составе блок оперативного прогнозирования процессов атмосферного переноса и рассеяния радионуклидов, попавших в атмосферу в результате аварии.

Непрерывный контроль значений параметров, характеризующих радиационную обстановку в помещениях и на площадке АЭС, в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения при всех режимах эксплуатации АЭС, проектных и запроектных авариях, обеспечивается сетью спектрометрических постов. По данным спектрометрических измерений в условиях аварии формируется сценарий поступления в атмосферу продуктов деления и выполняется прогноз их дальнейшего распространения согласно текущей метеорологической обстановке.

Для условий радиационной аварии характерны острая нехватка времени, необходимость гибкого оперативного реагирования, учитывающего все реальные факторы сложившейся ситуации, неполнота и возможная неточность доступной информации. Поэтому к оперативным прогностическим система предъявляется ряд требований, в том числе необходимость учета различных особенностей атмосферной динамики, которые могут повлиять на перенос и рассеяние радионуклидов, использование оперативных данных о метеоусловиях, быстродействие и возможность программной реализации на недорогом вычислительном оборудовании.

В Концерне «Росэнергоатом» решение задач анализа и прогноза в случае аварийных событий на ядерных объектах используется система RECASS NT, созданная, поддерживаемая и развиваемая в Федеральном информационно-аналитическом центре (ФИАЦ) Росгидромета в составе Научно-производственного объединения «Тайфун» [2]. Основное назначение этой системы – оценка и прогноз последствий аварийных поступлений загрязняющих веществ (ЗВ) в окружающую среду, включая выработку рекомендаций по необходимости проведения защитных мероприятий.

Корректный расчет дозовых характеристик является определяющим фактором для адекватной выработки рекомендаций о необходимости проведения мероприятий по защите населения в случае радиационного инцидента. В настоящее время в системе RECASS NT расчет поглощенных доз проводится на основе идеализированного представления радиоактивного облака в форме полубесконечного пространства с равномерно распределенной концентрацией радионуклидов, равной приземной объемной активности. Такая идеализация допустима для длительных выбросов при расчете доз за зоной максимума приземной концентрации, при этом погрешность не превышает 5 – 10%, если размеры области загрязненного воздуха превосходят три длины свободного пробега фотонов в воздухе.

При кратковременных выбросах, при расчете доз вблизи источника радиоактивного выброса, а также в условиях распространения радиоактивного облака в пределах городской или промышленной застройки такая идеализация является неприемлемой. В перечисленных случаях оценка дозовых характеристик на основе модели облака

Tsarina A.G., Aleksanyan E.G. et al.

Modeling Technology of the Radioactive Pollutants Propagation in Densely Built and Populated Areas

в виде полубесконечного пространства может приводить к значительным ошибкам и, соответственно, рекомендации, построенные по этим результатам, также могут оказаться неверными. Таким образом, оценка дозовых характеристик должна выполняться с учетом конечной геометрии радиоактивного облака на любых расстояниях от источника выброса радиоактивных веществ в атмосферу.

Особенностью процессов атмосферного переноса и рассеяния радионуклидов в условиях городской и промышленной застройки является существенная неоднородность распределения радионуклидов в радиоактивном облаке. Кроме того, эволюция облака радионуклидов имеет сложный характер и обусловлена не только метеоусловиями, но и значительным влиянием застройки.

Моделирование атмосферных загрязнений над урбанизированной территорией

В работе рассматривается разработанный авторами программный комплекс «Моделирование атмосферных загрязнений над урбанизированной территорией» (ПК MA3-Город), который для территорий со сложной застройкой при известных параметрах источников и заданных метеорологических условиях позволяет в автоматизированном оперативном режиме решать задачи построения полей концентраций ЗВ, в том числе радиоактивных, и строить оценки воздействия радиоактивной примеси на людей (население, персонал АЭС, пожарные и т.п.), находящихся в окрестности места аварийного выброса.

Архитектура ПК МАЗ-Город включает в себя три основные блока. На нижнем уровне представлена система предпроцессинга, основная задача которой состоит в сборе, предварительной обработке и организации хранения необходимого для решения поставленных задач массива информации. Центральным блоком системы является набор расчетных модулей, который строится вокруг двух основополагающих элементов: во-первых, это модель сложного поля ветра в условиях застройки, позволяющая рассчитывать в узлах трехмерных сеток компоненты вектора скорости ветра и коэффициенты пространственной диффузии, а во-вторых, модель переноса и рассеяния ЗВ над урбанизированной территорией – транспортный блок, обеспечивающий получение значений объемной концентрации ЗВ в пространстве над урбанизированной территорией. Уровень постпроцессинга – это возможность графического отображения как промежуточных, так и конечных результатов моделирования, что является удобным инструментом для систематизации информации и создания отчетов. Ниже приведено краткое описание расчетных модулей ПК МАЗ-Город.

Для задания границ области моделирования формируется цифровой макет территории, который включает в себя информацию о рельефе местности, геометрии расположения зданий и системе землепользования, полученную из открытых источников. Основные алгоритмы и принципы работы модуля построения модели застройки описаны в [3]. Для иерархического описания геометрии области загружаются карты высот указанной территории, план ее застройки с атрибутами высоты или этажности каждого здания, выполнятся оптимизация объектов застройки для их упрощенного представления в системе и создается набор двумерных карт разного масштаба, где застройка на нижнем уровне представлена отдельными зданиями,

Царина А.Г., Алексанян Е.Г. и др.

Технология моделирования распространения радиоактивных загрязняющих веществ в условиях сложной застройки

а на верхнем — кварталами, для которых процедура укрупнения производится на основании процедуры, позволяющей минимизировать искажение набегающего потока. На основе построенного макета застройки строится двумерная сетка поверхности города и трехмерная вычислительная сетка для дискретизации приземного слоя атмосферы в пределах городской застройки.

Задача построения трехмерного поля ветра в условиях застройки решается двумя способами: методом дискретных вихрей (МДВ) [4] и вариационным методом оптимизации исходного поля ветра под условия бездивергентности [5]. Каждый из этих подходов позволяет учесть геометрию застройки и по эффективности соответствует требованиям проведения оперативных расчетов, но обладает своими преимуществами и недостатками. Так для проведения расчетов по МДВ требуется двумерная сетка поверхности зданий или их блоков, при этом не учитывается рельеф, а набегающий ветер задается постоянным во всей границе расчетной области. Вариационный метод работает с трехмерной сеткой области городской застройки, в которую также могут быть включены параметры рельефа, что требует значительно больших вычислительных ресурсов. Но при этом исходный ветер в этом случае задается в каждой точке сетки, т.е. можно интерполировать значения, с учетом измерений.

Модели построения ветровых полей с учетом застройки и их тестирование

МДВ позволяет находить поле скоростей ветрового потока путем прямого численного моделирования процесса обтекания группы зданий [6]. Поверхности зданий и ветровая тень за ними моделируется совокупностью многих дискретных невязких вихрей с эволюцией, прослеживаемой по времени.

В пределах рассматриваемой части пространства D вокруг зданий полагается, что атмосферу можно считать идеальной несжимаемой жидкостью, течение которой является потенциальным везде вне зданий и вихревых следов, образованных за ними. Пусть задана скорость набегающего потока $ar{W}$ с потенциалом U, таким что $ar{W}=
abla U$. Потенциал возмущенных скоростей $\Phi = \Phi(M, t)$, обусловленных препятствиями и их вихревыми следами, должен удовлетворять уравнению Лапласа *∆U*=0 во всех точках $M \in D \setminus (\sigma_t \cup \sigma_s)$, где σ_s – поверхность зданий, а σ_t – поверхность потенциального разрыва скоростей, т.е. вихревая пелена. Вихревая пелена формируется в результате схода слоя свободных вихрей с линии отрыва L, которая является объединением линий на острых кромках тел и, если имеются, определенных линий на гладких поверхностях. Решение задачи ищется в виде суммы потенциала набегающего потока U и потенциала возмущенных скоростей Ф, обусловленных препятствиями и их вихревыми следами. На поверхности тел σ_s ставится условие непротекания $(\nabla \Phi(M, t), \vec{n}_M) = -(\vec{W}, \vec{n}_M), M \in \sigma_s$ где \vec{n}_{M} – нормаль к поверхности σ, в точке M. На бесконечности должно выпо́лняться условие убывания возмущенной скорости $\lim \nabla \Phi = 0$ и непрерывности ее нормальной составляющей и давления на вихревой пелене $(\nabla \Phi(M,t), \vec{n}_M) = (\nabla \Phi(M,t), \vec{n}_M)$, $M \in \sigma_L$ p(M, t) = p(M, t). Потенциал возмущенных скоростей ищется в виде потенциала слоя

диполей:

Tsarina A.G., Aleksanyan E.G. et al.

Modeling Technology of the Radioactive Pollutants Propagation in Densely Built and Populated Areas

$$\Phi(M_0,t) = \frac{1}{4\pi} \int_{\sigma_s} g_s(M,t) \frac{\partial}{\partial \vec{n}_M} \left(\frac{1}{r_{MM0}}\right) dS_M + \frac{1}{4\pi} \int_{\sigma_L} g_L(M) \frac{\partial}{\partial \vec{n}_M} \left(\frac{1}{r_{MM0}}\right) dS_M, \quad (1)$$

где $g_s(M, t)$ и $g_L(M)$ – плотность двойного слоя на поверхности тела и пелены соответственно.

Для построения численной схемы поверхности обтекаемых тел и вихревые пелены на *k*-ом шаге по времени аппроксимируются дискретными четырехугольными или треугольными вихревыми рамками, т.е. множествами $\Sigma_s = \{\sigma_s^i\}_{i=1}^n$ и $\Sigma_L(k) = \{\sigma_L^{rk}\}_{r=1}^{n_k}$ соответственно. Интенсивности построенных вихревых элементов вычисляются из дискретизированного условия непротекания, которое принимает следующий вид:

$$\sum_{j=1}^{n} w_{ij} \Gamma_{j}^{k} = f_{i}^{k}, i = 1, .., n; \quad w_{ij} = \left(\vec{w} \left[\sigma_{s}^{j} \right] (M_{0i}), \vec{n}_{i} \right);$$

$$f_{i}^{k} = -\left(\vec{W}, \vec{n}_{i} \right) - \left(\vec{n}_{i}, \sum_{r=1}^{n_{k}} \delta_{r} \vec{w} \left[\sigma_{L}^{rk} \right] (M_{0i}) \right), \qquad (2)$$

где k – номер шага по времени; i и j – номера двух вихревых рамок σ_s^i и σ_s^j на поверхности обтекаемого тела; Γ_j^k – интенсивность вихревой рамки σ_s^j ; $\vec{w} [\sigma](M_{0i})$ – вектор скорости ветра, который вихревая рамка σ создает в точке M_{0i} ; вычисляется по закону Био-Савара; M_{0i} – точка в центре вихревой рамки; \vec{n}_i – нормаль в точке M_{0i} к поверхности рамке σ_s^i ; δ_r – интенсивность вихревых элементов пелены.

В начальный момент вихревой пелены нет, а на каждом последующем шаге сход пелены моделируется на основе закона о движении вихревых линий с жидкими частицами. Таким образом, вычисляется положение каждой рамки пелены, сходящей с линии отрыва *L*. Результирующая скорость ветра в любой точке расчетной области *M* на *k*-ом шаге определяется соотношением

$$\vec{W}^{k}(M) = \vec{W} + \sum_{j=1}^{n} \Gamma_{j}^{k} \vec{w} \left[\sigma_{s}^{j} \right](M) + \sum_{r=1}^{n_{k}} \delta_{r} \vec{w} \left[\sigma_{L}^{rk} \right](M).$$
(3)

Вариационный метод реализует двухэтапный подход [7]: на первом этапе начальные значения скорости и направления ветра, полученные в метеомодуле, модифицируются в прилегающих зонах вокруг ветровых препятствий. Местоположение и размер зон, а также значения, используемые для скорости и направления ветра, получены эмпирически на основании наблюдений в аэродинамической трубе [8–10]. Размер каждой из этих зон рассчитывается исходя из размеров препятствий. Скорость и направление ветра зависят от типа зоны и ее расположения. Модифицированное параметризацией зданий и уличных каньонов трехмерное поля ветра в центре граней элементов тетраэдрической неравномерной сетки устанавливается как начальное значение $\vec{U}_0 = u_0 \vec{i} + v_0 \vec{j} + w_0 \vec{k}$. Второй шаг заключается в минимизации изменений исходного поля ветра при сильном условии равенства нулю дивергенции скорости ветра:

$$E(u,v,w) = \int_{D} \left[\alpha_1^2 \left(u - u_0 \right)^2 + \alpha_1^2 \left(v - v_0 \right)^2 + \alpha_2^2 \left(w - w_0 \right)^2 + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \rightarrow \min.$$
(4)

Результаты работы модулей генерации поля ветра фиксируются в виде значений компонент скорости в контрольных точках элементов трехмерной сетки и центральных точках их граней и передаются в транспортный модуль.

Для подтверждения корректности полученных результатов при вычислении компонент скорости ветра в пространстве над застройкой были проведены расчеты по моделям, соответствующим натурным экспериментам [11, 12].

Эксперимент Oklahoma экологической лаборатории Гамбургского университета (Германия) проводился в аэродинамической трубе для исследования процессов переноса и рассеивания веществ в модели центра города Оклахома-Сити, при этом данные сравнивались с реальными полевыми измерениями в центре города Оклахома-Сити, что стало гарантией правдоподобности полученных оценок. В рамках тестирования ПК была построена цифровая модель, соответствующая геометрии той части города, для которой проводились эксперименты, и в результате по обоим модулям получены трехмерные поля ветра для указанных в эксперименте метеоусловий: ветер южный со скоростью 5 м/с. Датчики располагались между двумя зданиями соответственно с подветренной и наветренной стороны. Результаты одного из тестов для высоты измерений, соответствующей 10 м над уровнем земли, приведены на рис. 1. На рисунках 1а, б показано соответствие в структурах векторных полей ветра в окрестности зданий, полученных экспериментально и с помощью расчетов по модели дискретных вихрей. Рассматривается проекция на плоскость, параллельную поверхности земли в локальных координатах модели. Видны зоны ускорения ветра на улицах, вдоль которых дует ветер, и зоны замедления и застоя за и перед зданиями, которые обтекаются воздушным потоком. Отличие в структуре ветра можно объяснить огрублением модельной геометрии зданий. Согласованность между экспериментом и расчетом подтверждают и статистические тесты, в частности, значения вычисленного коэффициента корреляции *R* для компонент скорости ветра в направлении набегающего потока превышают 0,8. Диаграмма рассеяния для продольной скорости ветра, совпадающей по направлению с набегающим потоком, представлена на рис. 1в, где ось Ох соответствует расчетным, а ось Оу – экспериментальным данным.

Материалы по проекту [12] представляют собой набор моделей для сравнительных и параметрических исследований, по которым доступны данные по геометрии модельной области, граничные условия и результаты измерений и расчетов по тринадцати различным экспериментам. Были проведены тестовые расчеты для одиночно стоящих зданий (тесты A и B в [12]) и для регулярной застройки из однотипных объектов (тест C). Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных, которые оценивались по корреляции между компонентами скорости ветра или модулей скорости, представленные в табл. 1, показывают достаточно высокий уровень согласованности.

Для моделирования переноса и рассеяния примеси применяется лагранжевый стохастический подход построения траекторий частиц примеси. Предполагается, что диффузионные процессы в среде индуцируются турбулентной диффузией, параметры которой определяются такими характеристиками пограничного слоя атмосферы, как вертикальные профили направления и скорости ветра, степень турбулизованности

Tsarina A.G., Aleksanyan E.G. et al.

Modeling Technology of the Radioactive Pollutants Propagation in Densely Built and Populated Areas



Рис. 1. Поля ветра на высоте 10 м, полученные а) экспериментально, б) расчетным способом; в) диаграмма рассеяния для продольной составляющей скорости ветра *v*, *R* = 0,84

Таблица 1

Коэффициенты корреляции между экспериментальными и рассчитанными по ПК МАЗ-Город данными

Таст	Компоненты с	Модуль скорости	
leci	Продольная	Поперечная	
А	0,87	0,71	
В	0,89	0,43	
С			0,85

приповерхностного слоя атмосферы, высоты пограничного слоя и слоя перемешивания, вертикальный профиль температуры. Расчет коэффициентов диффузии основан на приведенных в [13] параметризациях перечисленных характеристик.

Движение трассера в турбулентном потоке может быть описано моделью случайных блужданий, когда изменение положения *г*_p частицы *p* определяется через среднюю скорость потока *Ü* и флуктуацию скорости *ü* выражением:

$$\frac{d\vec{r}_p}{dt} = \vec{U} + \vec{u}.$$
(5)

Под «частицей» понимается статистическое представление элемента жидкости или газа, содержащего множество молекул, а не фактическая аэрозольная частица. Флуктуация моделируется процессом случайного блуждания, формализованным стохастическим уравнением Ланжевена, которое имеет вид

$$du = -a_{u} udt + \sum_{i} b_{uj} dW_{j},$$

$$dv = -a_{v} vdt + \sum_{i} b_{vj} dW_{j},$$

$$dw = -a_{w} udt + \sum_{i} b_{wj} dW_{j},$$

(6)

где a – коэффициент, определяемый вязким сопротивлением; $B = \{b_{ij}\}$ – тензор масштабирования для независимых случайных величин $d\vec{W} \sim N(0, dt)$, моделирующих броуновское движение.

Для упрощенной модели коэффициент *a* и тензор *B* определяются как функции лагранжевого временного масштаба τ_x , τ_y , τ_x и стандартных отклонений скорости ветра σ_u , σ_v , σ_w :

$$a_{u} = \frac{1}{\tau_{x}}, \quad a_{v} = \frac{1}{\tau_{y}}, \quad a_{w} = \frac{1}{\tau_{z}},$$

$$B = \begin{pmatrix} b_{u} & 0 & 0\\ 0 & b_{v} & 0\\ 0 & 0 & b_{w} \end{pmatrix}, \quad b_{u} = \sqrt{\frac{2\sigma_{u}^{2}}{\tau_{x}}}, \\ b_{v} = \sqrt{\frac{2\sigma_{v}^{2}}{\tau_{y}}}, \\ b_{w} = \sqrt{\frac{2\sigma_{w}^{2}}{\tau_{z}}}.$$
(7)

Значения для σ_u, σ_v, σ_w вычисляются на основании данных табл. 2, в которой u_{*} – динамическая скорость.

Таблица 2

-	•				
		CTOUROD	FULIV ATI/I	CUARACTIA	DOTDO
-	пачепия для	стапдар			BEIDA
-	····• · • · · · · · · · · · · · · · · ·			 	

Параметр	Тип территории				
	пригород	среднеэтажная застройка	высотная застройка	парк, лесопарк	
σ_u/u_*	2,5	2,32 - 2,49	2,4	2,5	
σ_v/u_*	1,9	1,91 - 1,99	1,9	1,8	
σ _w /u∗	1,25	1,27 – 1,29	1,3	1,25	

Modeling Technology of the Radioactive Pollutants Propagation in Densely Built and Populated Areas

Для нахождения положения частицы, согласно уравнению (5), используется явная схема Эйлера:

$$\mathbf{x}_{i}^{(n+1)} = \mathbf{x}_{i}^{(n)} + \left(U_{i}^{(n)} + u_{i}^{(n+1)} \right) \Delta t.$$
(8)

Оценка уровней радиоактивного загрязнения урбанизированной территории

Моделирование потока излучения от распределенного облака радионуклидов в атмосферном воздухе, полученного в результате моделирования на предыдущем этапе, основывается на решении кинетического уравнения переноса излучения, которое по существу является уравнением баланса гамма-квантов для элементарного объема. Наиболее распространенным методом вычисления мощности поглощенной дозы [14] без использования сложных методов решения уравнения переноса, но с учетом неоднородности распределения радионуклидов в атмосфере, является интегрирование функции ослабления точечного изотропного источника. Тогда мощность поглощенной дозы $D_i^{j}(\vec{r_p})$ от распределенного в атмосфере *i*-ого радионуклида в *j*-ом интервале энергии в момент времени *t* с учетом геометрии радиоактивного облака рассчитывается по следующей формуле:

$$D_{i}^{j}\left(\vec{r}_{p},t\right) = \frac{k \cdot E_{j}^{i} \cdot \mu_{m}^{j} \cdot \eta_{j}^{i}}{4\pi} \cdot \int_{0}^{\infty} dr \int_{0}^{\pi/2} \sin\theta d\theta \int_{0}^{2\pi} d\phi \cdot q_{i}\left(\vec{r}_{p}+\vec{r},t\right) B_{a}^{j}\left(\mu_{j}\cdot r\right) \cdot e^{-\mu_{j}\cdot r}, \qquad (9)$$

где $\vec{r_p}$ – рецептор, точка пространства, в которой рассчитывается мощность дозы; E_j^i – энергия γ -кванта для *i*-го радионуклида в *j*-ом интервале энергии, МэВ; μ_m^j – массовый коэффициент поглощения *j*-ого интервала энергий, м²/кг; η_j^i – квантовый выход *i*-го радионуклида в *j*-ом интервале энергии, квант/распад; (*r*, φ , θ) – сферическая система координат, с центром в точке расположения рецептора; \vec{r} – радиус-вектор;

 $q_i(\vec{r_p} + \vec{r}, t)$ – объемная активность *i*-го радионуклида в момент времени *t* в воздухе в точке $\vec{r_p} + \vec{r}$, Бк/м³; $B_a^j(\mu_j \cdot r)$ – фактор накопления для излучения в *j*-ом интервале энергий точечного источника на расстоянии *r* от рецептора; μ_j – линейный коэффициент ослабления в атмосферном воздухе для моноэнергетических фотонов из *j*-ого интервала энергий, 1/м; *k* = 1,602 · 10⁻¹³, Дж/МэВ.

С помощью ПК-МАЗ Город были проведены расчеты для набора модельных аварий в пределах городских застроек с целью оценки возможности определения радиационного риска для населения. Тестировалась полная вычислительная цепочка, включающая в себя все вышеописанные расчетные модули для получения приземного поля мощности поглощенной дозы от радиоактивного облака. Результаты расчетов представлены на рис. 2, 3. Для моделирования была выбрана та же геометрия застройки, которая была использована для экспериментов по вычислению поля ветра. Рассматриваются два направления набегающего потока и разные условия рассеяния примеси: в первом эксперименте (рис. 2а, 3а) установлена категория устойчивости

Царина А.Г., Алексанян Е.Г. и др.

Технология моделирования распространения радиоактивных загрязняющих веществ в условиях сложной застройки



Рис. 2. Результаты моделирования облака загрязняющих веществ для модельной аварии в пределах городской застройки: а) при южном ветре, б) при юго-западном ветре



Рис. 3. Результаты расчетов мощности поглощенной дозы, Гр/с, выполненных для радионуклида ¹³³₅₄Xe, *E*=0.081 МэВ для модельной аварии в пределах городской застройки: а) при южном ветре, б) при юго-западном ветре

атмосферы *F* и южный ветер, во втором (рис. 26, 36) – категория A, ветер юго-западный. По сценарию из источника, расположенного на территории застройки, в течение часа непрерывно поступает в атмосферу радиоактивная примесь, мощность модельного источника 4,2·10⁶ Бк/с (¹³³Хе – 4,1·10⁶ Бк/с, ¹³⁵Хе – 7,4·10⁵ Бк/с, ¹³¹I – 1,6·10⁴ Бк/с). На рисунке 2 показана структура облака загрязняющих веществ, сформировавшегося над застройкой, на рис. 3 приведено соответствующее поле мощности поглощенной дозы. Из рисунков видно, что влияние геометрии и расположения зданий сказывается не только на структуре распределения объемной концентрации 3В над территорией с застройкой, но и, как следствие, на объемном распределении активности 3В, поступивших в атмосферу в результате аварии, что в свою очередь влияет на дозовою нагрузку на людей, которая рассчитывается согласно [15].

Аналогичные расчеты могут быть проведены для территории города, рядом с которым расположены атомные электростанции или научные институты, работающие с атомными технологиями, или для промплощадки объекта использования атомной энергии. Modeling Technology of the Radioactive Pollutants Propagation in Densely Built and Populated Areas

Заключение

В статье исследованы возможности программного комплекса MA3-Город для проведения оперативных расчетов при моделировании загрязнения промплощадки или городской среды для анализа последствий радиационных аварий. Приведены алгоритмы для вычисления концентрации загрязняющих веществ при выбросах в пределах городской черты и оценки риска радиационного воздействия. Показано, что пространственная неоднородность и геометрия облака сказываются на распределении загрязняющих веществ в атмосфере и, как следствие, на дозовые нагрузки людей, находящихся на территории. Применение программного комплекса MA3-Город может быть расширено для решения, например, таких задач как оценка источника по спектрометрическим измерениям на промплощадке или в санитарно-защитной зоне, оптимизация размещения измерительной аппаратуры на промплощадке или планирование перемещения персонала в условиях аварии.

Литература

1. Букринский А.М. Безопасность атомных электростанций по федеральным нормам и правилам России и стандартам МАГАТЭ. М.: НТЦ ЯРБ, 2007.

2. Косых В.С., Бородин Р.В., Корнейчук Н.А. RECASS: система информационной поддержки принятия решений в случае аварийных ситуаций на радиационно и химически опасных объектах. Проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды. Сборник статей. Том III. ГУ «НПО «Тайфун». Обнинск, 2010, т. III, с. 24–35.

3. Царина А., Алексанян Е. Технология создания цифровой модели урбанизированной территории. *Метеоспектр.* 2022;3:10–15.

4. Гутников В.А., Лифанов И.К., Сетуха А.В. О моделировании аэродинамики зданий и сооружений методом замкнутых вихревых рамок. *Механика жидкости и газа*. 2006;4:78–92.

5. Nelson M, Addepalli B., Hornsby F., Gowardhan A., Pardyjak E., Brown M. Improvements to a Fast-Response Urban Wind Model. *15th AMS Applications of Air Pollution Meteorology Conference. Conference Paper*. New Orleans, LA, 2008. URL: https://www.researchgate.net/publication/260320981_Improvements_to_a_Fast-Response_Urban_Wind_Model (дата обращения: 02.11.2024).

6. Самохина А.С., Сетуха А.В., Кирякин В.Ю., Марчевский И.К., Щеглов Г.А. Имитационная модель распространения поражающего агента в городской застройке. *Управление большими системами*. 2008;20. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-modelrasprostraneniya-porazhayuschego-agenta-v-gorodskoy-zastroyke (дата обращения: 02.11.2024).

7. Bernard J., Lindberg F., Oswald S.M. URock 2023a: an open-source GIS-based wind model for complex urban settings. *Geoscientific Model Development*. 2023;16(20):5703–5727. DOI: https://doi.org/10.5194/gmd-16-5703-2023

8. Bagal N., Pardyjak E., Brown M. Improved Upwind Cavity Parameterization for a Fast Response Urban Wind Model. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2004;567–570.

9. Pol S., Bagal N., Singh B., Brown M., Pardyjak E. Implementation of a new roof-top recirculation parameterization into the QUIC fast response urban wind model. *86th AMS Annual Meeting*, 2006. URL: https://www.researchgate.net/publication/267780172_Implementation_of_a_new_rooftop_recirculation_parameterization_into_the_quic_fast_response_urban_wind_model (дата обращения: 21.11.2024).

10. Nelson M, Addepalli B., Hornsby F., Gowardhan A., Pardyjak E., Brown M. Im-provements to a Fast-Response Urban Wind Model. *15th AMS Applications of Air Pollution Meteorology Confer*-

ence. Conference Paper. New Orleans, LA, 2008. URL: https://www.researchgate.net/publication/260320981_Improvements_to_a_Fast-Response_Urban_Wind_Model (дата обращения: 21.11.2024).

11. Klein P., Leitl B., Pascheke F., Schatzmann M. 5.4 Wind-Tunnel Simulation of the Joint Urban 2003 Tracer Experiment. *Symposium on Planning, Nowcasting, and Forecasting in the Urban Zone*. 2003. URL: https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/73272.pdf (дата обращения: 21.11.2024)

12. Tominaga Y., Mochida A., Yoshie R., Kataoka H, Nozu T., Yoshikawa M., Shirasawa T. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2008;96:1749–1761. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.058

13. РД 52.18.717-2009 Методика расчета рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах. Обнинск, ООО «ПРИНТ-СЕРВИС», 2009, 113 с.

14. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1995, 497 с. ISBN 5-283-03059-8

15. РБ-106-21. Рекомендуемые методы расчета параметров, необходимых для разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух. М: Ростехнадзор, 2021, 72 с.

> Поступила в редакцию 24.12.2024 После доработки 20.05.2025 Принята к опубликованию 30.05.2025

Авторы

Царина Анна Георгиевна, в.н.с., к.ф.-м.н., E-mail: tsarina@feerc.ru <u>Алексанян</u> Елизавета Геннадьевна, инженер, E-mail: ruzova@feerc.ru <u>Хачатурова</u> Людмила Михайловна, с.н.с., E-mail: klm@feerc.ru <u>Стогова</u> Инга Владимировна, с.н.с., E-mail: siv@feerc.ru <u>Фреймундт</u> Геннадий Николаевич, с.н.с., E-mail: freimundt@feerc.ru

UDC 504.61:351.78:614.8:61/69

Modeling Technology of the Radioactive Pollutants Propagation in Densely Built and Populated Areas

Tsarina A.G., Aleksanyan E.G., Khachaturova L.M., Stogova I.V., Freimundt G.N.

RPA "Typhoon", 4 Pobeda St., 249038 Obninsk, Kaluga reg., Russia

Abstract

The article considers an operational forecasting system of radionuclides transport and scattering due to accidental release to the surrounding atmosphere in the urban areas. The software package implementing the modeling of the radioactive pollutants concentration fields over urbanized territories based on specific meteorological data and

Modeling Technology of the Radioactive Pollutants Propagation in Densely Built and Populated Areas

known sources of pollution is described. To carry out calculations, a chain of calculation modules is being built. It includes preprocessing step, which ensures the preparation of computational domain with optimized building geometry and a digital elevation model. The processing phase aims to build three-dimensional wind fields with surrounding buildings taken into account, it also has procedures to simulate pollution transfer and to obtain fields of volumetric pollutants concentrations. Wind fields are calculated using the discrete vortex method and the mass-consistent model based on variational methods. The application of these two approaches for different scales has been proven to be effective. The postprocessing subsystem makes it possible to visualize the calculation results and present them in the form of tables, plots, diagrams and animated pictures. The data recieved during testing stage of the main software modules is compared with the materials of field and computational experiments published in the scientific literature. In particular, wind velocity fields were compared and diffusion experiments were considered, and good consistency of results is obtained. The results of applying the software package to solve problems of determining the shape of a cloud during emergency contamination over the concrete urban area and to assess the integral radiation impact of the pollutants of the emergency release are shown.

Keywords: operational model, propagation of radioactive impurities, densly built area, wind field, radiation pollution impact assessment.

For citation: Tsarina A.G., Aleksanyan E.G., Khachaturova L.M., Stogova I.V., Freimundt G.N. Modeling Technology of the Radioactive Pollutants Propagation in Densely Built and Populated Areas. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;2:100–113. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2025.2.09 (in Russian).

References

1. Bukrinsky A.M. Safety of nuclear power plants according to federal norms and regulations of Russia and IAEA standards. Moscow, SEC NRS, 2007 (in Russian).

2. Kosykh V.S., Borodin R.V., Korneichuk N.A. RECASS: information support system for decisionmaking in emergency situations at radiation and chemically hazardous objects. *Problems of Hydrometeorology and Environmental Monitoring. Collection of articles*. 2010, vol. III, pp. 24–35 (in Russian).

3. Tsarina A., Aleksanyan E. Technology for creating a digital model of an urbanized territory. *Meteospektr.* 2022;3:10–15 (in Russian).

4. Gutnikov V.A., Lifanov I.K., Setukha A.V. On modeling the aerodynamics of buildings and facilities using the enclosed vortex frame method. *Fluid Dynamics*. 2006;4:78–92. DOI: https://doi.org/10.1007/s10697-006-0073-4.

5. Nelson M, Addepalli B., Hornsby F., Gowardhan A., Pardyjak E., Brown M. Improvements to a Fast-Response Urban Wind Model. *15th AMS Applications of Air Pollution Meteorology Conference. Conference Paper*. New Orleans, LA, 2008. URL: https://www.researchgate.net/publication/260320981_Improvements_to_a_Fast-Response_Urban_Wind_Model (accessed Nov. 02, 2024).

6. Samokhina A.S., Setukha A.V., Kiryakin V.U., Marchevsky I.K., Scheglov G.A. Simulation model of the spread of a damaging agent in urban development. *Large Systems Management*. 2008;20. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-rasprostraneniya-porazhayuschego-agenta-v-gorodskoy-zastroyke (accessed Nov. 02, 2024) (in Russian).

7. Bernard J., Lindberg F., Oswald S. M. URock 2023a: an open-source GIS-based wind model for complex urban settings. *Geoscientific Model Development*. 2023;16(20):5703–5727. DOI: https://doi.org/10.5194/gmd-16-5703-2023

8. Bagal N., Pardyjak E., Brown M. Improved Upwind Cavity Parameterization for a Fast Response Urban Wind Model. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2004;567–570.

9. Pol S., Bagal N., Singh B., Brown M., Pardyjak E. Implementation of a new roof-top recirculation parameterization into the QUIC fast response urban wind model. *86th AMS Annual Meeting*. 2006. URL: https://www.researchgate.net/publication/267780172_Implementation_of_a_new_rooftop_recirculation_parameterization_into_the_quic_fast_response_urban_wind_model (accessed Nov. 21, 2024).

10. Nelson M, Addepalli B., Hornsby F., Gowardhan A., Pardyjak E., Brown M. Improvements to a Fast-Response Urban Wind Model. *15th AMS Applications of Air Pollution Meteorology Conference. Conference Paper*. New Orleans, LA, 2008. URL: https://www.researchgate.net/publication/260320981_Improvements_to_a_Fast-Response_Urban_Wind_Model (accessed Nov. 21, 2024).

11. Klein P., Leitl B., Pascheke F., Schatzmann M. 5.4 Wind-Tunnel Simulation of the Joint Urban 2003 Tracer Experiment. *Symposium on Planning, Nowcasting, and Forecasting in the Urban Zone*. 2003. URL: https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/73272.pdf (accessed Nov. 21, 2024).

12. Tominaga Y., Mochida A., Yoshie R., Kataoka H, Nozu T., Yoshikawa M., Shirasawa T. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008;96:1749–1761. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.058

13. RD 52.18.717–2009. *Methodology for calculating the dispersion of pollutants in the atmosphere during emergency emissions*. Obninsk, Print-Service Publ., 2009, 113 p.

14. Mashkovich B.P., Kudryavtseva A.V. *Protection from ionizing radiation. Handbook*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995, 497 p. ISBN 5-283-03059-8 (in Russian).

15. RB-106-21. Recommended methods for calculating parameters necessary for the development and establishment of standards for maximum permissible emissions of radioactive substances into the atmosphere. Moscow, Rostechnadzor, 2021, 72 p. (in Russian).

Authors

Anna G. <u>Tsarina</u>, Leading Researcher, Cand. Sci. (Phys.-Math.), E-mail: tsarina@feerc.ru Elizaveta G. <u>Aleksanyan</u>, Engineer, E-mail: ruzova@feerc.ru Ludmila M. <u>Khachturova</u>, Senior Researcher, E-mail: klm@feerc.ru Inga V. <u>Stogova</u>, Senior Researcher, E-mail: siv@feerc.ru Gennady N. <u>Freimundt</u>, Senior Researcher, E-mail: freimundt@feerc.ru