

3. **Manheimer W.** Fusion breeding for mid-century, sustainable, carbonfree power. — *Heliyon*, 2020, v.6, №9, e04923.
4. **Азизов Э.А., Гладуш Г.Г., Минеев А.Б.** УТС с магнитным удержанием и разработка гибридного реактора синтез—деление на основе токамака. М.: Троянт, 2016. 320 с.
5. **Орлов В.В., Пономарев Л.И.** Ядерные проблемы термоядерной энергетики. — *Атомная энергия*, 2018, т. 124, вып. 2, с. 105—113.
6. **Мирнов С.В., Гладуш Г.Г., Гостев А.А. и др.** Концепция гибридного энергетического реактора синтез—деление на основе токамака с blanketом на отвалном уране. — *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез*, 2019, т. 42, вып. 2, с. 23—30.
7. **Гладуш Г.Г., Мирнов С.В., Лопаткин А.В., Лукасевич И.Б.** Нейтронно-физические расчеты повышения производительности литий-уранового blanketа реактора-токамака. — *Атомная энергия*, 2021, т. 130, вып. 6, с. 303—306.

Поступила в Редакцию 29.04.22

УДК 621.039.001.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ И ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РИСКА ДЛЯ ПЕРСОНАЛА АЭС-2006

Орловская В.И., Трифонов А.Г. (ОИЭЯИ—Сосны НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь)
e-mail: val@sosny.bas-net.by

Атомные электростанции представляют собой источник опасности и риска радиационного воздействия на персонал, население и окружающую среду в результате накопления при эксплуатации значительного количества радиоактивных продуктов и возможности их выхода за предусмотренные границы при авариях. Определение возможной радиационной опасности является одной из важных задач, которые необходимо решать на всех этапах жизненного цикла АЭС. Поэтому в соответствии с нормами безопасности МАГАТЭ риск для здоровья людей должен быть оценен в зависимости от планируемого, существующего и аварийного облучения.

Определение облучения в целях планирования или выбора мер защиты основано на:

разработке и оценке вероятности реализации сценариев, которые представляют цепь событий, приводящих к облучению;

прогнозе дозы и наносимого вреда;

сравнении результатов с критерием приемлемости этого вреда и оптимизации защиты [1].

Распространение радиоактивных веществ в атмосфере прогнозируется с использованием математических моделей атмосферной дисперсии, которые различаются учитываемыми факторами, влияющими на перенос, и способами учета их влияния. Ввиду сложности и нелинейно-

сти рассматриваемых процессов необходимо определять факторы, существенно влияющие на прогноз радиационной обстановки в рамках поставленной задачи, и тем самым оптимизировать моделирование с достижением требуемой точности и оперативности получения результата [2].

Цели настоящей статьи — расчетный анализ распределения концентрации аэрозольных компонентов выброса на промышленной площадке и оценка радиационного риска для персонала АЭС-2006 при аварийной ситуации.

Методика. Перенос примеси в атмосфере и ее осаждение на поверхность земли представляет собой сложную многогранную задачу. Распространение радиоактивного облака подвержено влиянию разных факторов, в числе которых метеорологические условия района, рельеф поверхности, а также наличие турбулизированного внешнего газового потока, который вносит существенные коррективы в перенос аэрозольных частиц. Для оценки осаждения радиоактивных веществ на территории промышленной площадки АЭС в аварийных ситуациях, моделирования потока и переноса дисперсной примеси были выбраны системы уравнений сохранения для отдельных фаз, которые решаются численно совместно с уравнениями, описывающими межфазный перенос и динамику межфазных по-

верхностей. Для учета миграции радионуклидов в потоке в систему уравнений были введены уравнения движения и сохранения аэрозольных частиц.

Для моделирования динамики потока принята следующая система уравнений сохранения [3, 4]:

$$\partial \rho W_i / \partial x_i = 0; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \partial W_i / \partial t + W_j (\partial W_i / \partial x_j) = & -(1/\rho) (\partial P / \partial x_i) + \\ & + \partial \left(v_E (\partial W_i / \partial x_j) - \overline{W_i' W_j'} \right) / \partial x_i + g_i \delta_{ij}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\partial T / \partial t + W_j (\partial T / \partial x_j) = \partial (a_E (\partial T / \partial x_j)) / \partial x_j, \quad (3)$$

где ρ — плотность, кг/м³; W_i, W_j — компоненты скорости потока вдоль оси x_i, x_j ($i, j = 1, 2, 3, i \neq j, x_1, x_2, x_3$ — пространственные координаты), м/с; t — время, с; P — давление, Па; v — коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

$$\overline{W_i' W_j'} = -v_E (\partial W_i / \partial x_j + \partial W_j / \partial x_i) - (2/3) \delta_{ij} K_j;$$

K — турбулентная кинетическая энергия согласно k — ϵ -модели, Дж/м³; g — ускорение силы тяжести, м/с²; δ — символ Кронекера; T — температура, К; a — коэффициент температуропроводности, м²/с; v_E, a_E — эффективный коэффициент кинематической вязкости и температуропроводности с учетом принятых моделей для ламинарного и турбулентного течений.

Для описания миграции радионуклидов в потоке в исходную систему сохранения вводится уравнение движения и сохранения концентрации аэрозольных частиц [4]:

$$\begin{aligned} \partial C_k / \partial t + W_i (\partial C_k / \partial x_i) = & \tilde{\nabla} \left(D_k \tilde{\nabla} (C_k) \right) - \\ & - \lambda_k C_k + j_k, \end{aligned} \quad (4)$$

где C_k, D_k — концентрация и коэффициент диффузии аэрозольных частиц фракции k в несущем потоке, соответственно кг/м³, м²/с; $\tilde{\nabla}$ — оператор дифференцирования по x_i, x_j ; λ_k — постоянная распада радионуклида, с⁻¹; j_k — интегральный источник радионуклидов вследствие радиоактивного распада, кг/(м³·с).

Для описания движение потока в приземном слое атмосферы необходимо учитывать турбулизирующие возмущения. Различают три источ-

ника сил, турбулизирующих поток: механическое препятствие (шероховатость), статическая неустойчивость воздуха (естественная конвекция), сдвиг ветра. Все три вида источника турбулентности характерны для ветровых потоков в инфраструктуре АЭС. Поскольку турбулентность является неотъемлемым свойством потоков в приземном слое атмосферы, она должна учитываться при расчете дисперсии радиоактивных аэрозолей. Это достигается за счет учета турбулентной диффузии

$$D_k = v_T / \sigma_T, \quad (5)$$

где v_T — коэффициент кинематической турбулентной вязкости, м²/с; $\sigma_T = 0,35$ — $0,7$ — турбулентное число Шмидта для аэрозольных частиц. В приводимых расчетах турбулентное число Шмидта было принято равным $0,35$ [5]. Соответственно эффективная скорость движения аэрозольной частицы

$$\mathbf{W}_k = \mathbf{W} - (D_k / C_k) \nabla C_k - \mathbf{W}_{oc}, \quad (6)$$

где $\mathbf{W}_{oc}$ — скорость осаждения аэрозольных частиц, м/с.

В формуле (6) используется векторная скорость аэрозольных частиц, которая зависит от вектора скорости основного потока и вектора смещения вследствие турбулентной диффузии, а также скорости осаждения по вертикальной оси OZ относительно приповерхностного слоя.

Уравнения (1)—(4) были дополнены начальными и граничными условиями с учетом генерального плана АЭС, метеорологическими данными на площадке размещения. В качестве параметров турбулентности на входе в расчетную область и на срезе места выхода продуктов деления в окружающую среду принималась слабая турбулизация потока. Далее степень турбулизации устанавливалась с учетом инфраструктуры площадки АЭС и теплофизических параметров воздушного потока. Равновесная турбулентность устанавливалась через 5—10 геометрических расчетных шагов, что значительно меньше расстояния от границы расчетной области до препятствий в виде зданий и сооружений. На поверхности инфраструктуры АЭС принимались условия непроницаемости. Обтекание препятствий учитывается при решении трехмерных уравнений газодинамики

(1)—(3). Наличие шероховатости и растительности на поверхности промышленной площадки не рассматривалось. Естественная конвекция от нагретого потока выброса учитывалась в приближении Буссинеска [6].

Геометрические размеры расчетной области и граничные условия следующие:

расчетная область представляет собой цилиндр диаметром 2000, высотой 300 м. Цилиндрическая форма позволяет иметь постоянную форму данной области при разных направлениях ветрового потока (угол α). «Дно» расчетной области имитирует форму инфраструктуры АЭС;

на боковых границах расчетной области принят квадратичный профиль скорости, на верхней границе — максимальная скорость (константа) воздушного потока;

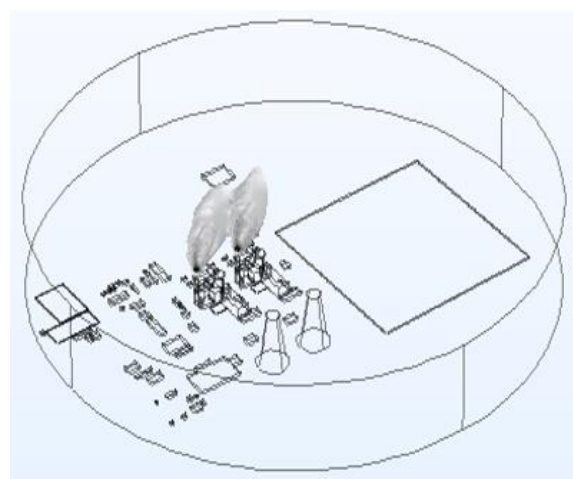
на всех боковых входных по потоку границах приняты постоянная концентрация аэрозоля ($C = 0$) и постоянная характерная температура — летняя и зимняя температура 20 и -20 °С;

на выходе из вентиляционной трубы принята постоянная относительная концентрация $C = 1$.

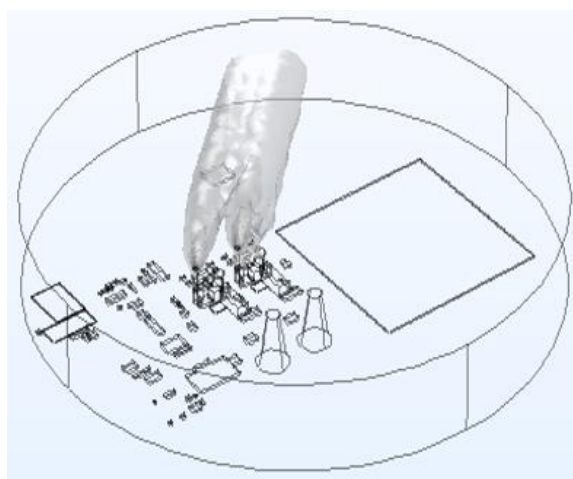
Уравнения (1)—(6) были реализованы в среде разработки компьютерных программ COMSOL, версия 5.6, на базе которой создан компьютерный модуль расчета переноса и осаждения аэрозольных частиц на характерные поверхности инфраструктуры АЭС с учетом турбулентности внешнего воздушного потока. Модуль позволяет учитывать выброс на разной высоте: выбраны точки выброса из вентиляционной трубы на высоте 100 м и при нарушении целостности защитной оболочки на высоте 30 м.

Варьируемые параметры: выброс, определяющийся аварийной ситуацией, восемь румбов ветра при скорости 0, 10, 20 м/с для каждой аварии, летние/зимние условия, сухое/мокрое осаждение, скорость осаждения аэрозольных частиц 0,001, 0,005 и 0,05 м/с, что соответствует размеру аэрозолей 2, 4 и 15 мкм при плотности 2000 кг/м^3 [7, 8]. Для верификации программного модуля были проведены расчеты и их сравнительный анализ с кодами, разработанными ИБРАЭ РАН. Сравнение показало удовлетворительное совпадение с данными стандартного образца ИБРАЭ РАН — расхождение не более 5%) [9].

В рамках модельных вычислительных экспериментов были проведены тестовые расчеты распространения радионуклидов в аварийных ситуациях с выбросом из вентиляционной трубы (рис. 1). Аварийный выброс представлял собой шлейф по ходу ветра. Расчеты проводили для характерного генерального плана АЭС-2006, температуры окружающей среды 20 °С, скорости осаждения аэрозольных частиц на высоте 10 м 0,1 м/с, что соответствует частицам диаметром 30 мкм, плотностью 1000 кг/м^3 [10]. При максимальной скорости ветра 5 м/с численные расчеты можно проводить для ламинарного и турбулентного течений. Характер распространения факела выброса примерно одинаков при принятой равной скорости осаждения аэрозоль-



а



б

Р и с. 1. Распространение факела аэрозольных частиц в ламинарном (а) и турбулентном течении (б) при относительной равной 1 начальной концентрации аэрозоля на выходе из вентиляционной трубы

ных частиц. Однако для турбулентного течения отмечается размыв его границ. Дальнейшие модельные расчеты с увеличением скорости ветра (более 5 м/с) проводились только с учетом турбулентных эффектов. В данном случае была принята k — ε -модель в ее стандартном приближении для больших чисел Рейнольдса (более 2000).

Моделирование приземного слоя атмосферы при увеличении максимальной скорости ветра более 10 м/с приводит к неустойчивым численным решениям, и k — ε -модель не обеспечивает устойчивое решение. При максимальной скорости ветра от 15 м/с и более происходит сбой модельных программ. Такую неустойчивость модели можно объяснить асимметричностью условий на верхней и нижней границах приземного слоя атмосферы. В этом случае мелкомасштабную турбулентность в приземном слое необходимо сращивать с крупномасштабной в верхней части расчетной области. В расчетах при максимальной скорости ветра более 15 м/с было использовано моделирование с выделением крупных вихрей (LES-метод), в котором детализируются (разрешаются) только крупные вихри, влияние мелкомасштабной турбулентности учитывается с помощью параметрических моделей [9]. Удовлетворительные результаты моделирования для данных условий были получены при использовании модели подсеточной турбулентности по методу Смогоринского [11].

Для прогнозной оценки дозовых нагрузок на персонал на ранней стадии аварии приняты следующие допущения:

краткосрочный период облучения — обычно не более 4 ч для запроектных аварий, 8 ч для проектных, в течение которого ожидаются постоянными радионуклидный состав и условия выброса, изменение метеорологических условий, в частности, направление ветра при выполнении расчета не учитывается;

возможное уменьшение облучения из-за пребывания в укрытии не рассматривается;

облучаемый персонал — взрослые (возраст более 17 лет) с объемом дыхания 1,4 м³/ч, выполняющие легкую физическую работу, не употребляющие загрязненные продукты питания.

Для выбранных условий концентрация радионуклидов в приземном слое воздуха является

параметром, определяющим их ингаляционное поступление в организм человека и последующее внутреннее облучение. Также были оценены эффективная доза внешнего облучения на открытой местности при погружении в радиоактивное облако и эквивалентная доза облучения щитовидной железы. Прогнозная оценка суммарной эффективной дозы выполнялась с учетом внешнего облучения от облака и выпадений на поверхность площадки, а также внутреннего облучения за счет ингаляционного поступления [12, 13].

Вероятностный ущерб здоровью можно оценить, используя концепцию радиационного риска, согласно которой индивидуальный риск облучения рассматривается как вклад дозы в вероятность реализации всех типов рака на протяжении всей жизни человека [1]. Возможный риск при однократном облучении в случае аварийной ситуации на АЭС оценивали по моделям избыточного абсолютного и относительного риска МКРЗ, риск злокачественных новообразований щитовидной железы за счет радиоизотопов йода — по модели НКДАР ООН [1, 14, 15].

Расчеты. В качестве примера расчета дозовых нагрузок и радиационного риска приведем прогнозную оценку дозы облучения персонала только по одному сценарию: летние условия, скорость ветра 10 м/с, скорость осаждения аэрозолей 0,005 м/с, что соответствует размеру 4 мкм при плотности 2000 кг/м³. Выброс радионуклидов в окружающую среду происходит при запроектной аварии без плавления топлива «авария с потерей теплоносителя при малых течах с отказом активной части системы аварийного охлаждения активной зоны высокого давления». При такой аварии выброс продуктов деления определяются двумя основными путями: через неплотность первичной защитной оболочки в межоболочечное пространство и далее через аварийную вентиляционную систему в окружающую среду и через байпас межоболочечного пространства в окружающую среду. Исходными данными состава и активности радионуклидов были приняты результаты предварительного отчета по обоснованию безопасности Белорусской АЭС. Оценка дозовых нагрузок на персонал АЭС выполнялась с учетом загрязнения, формируемого ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs, ¹³¹I, ¹³³I.

Прогнозная оценка профессионального облучения персонала при запроектной аварии — выброс продуктов деления в окружающую среду через вентиляционную трубу на высоте выброса 100 м приведена в табл. 1 (доза ниже 10^{-2} мкЗв в таблице не указывалась).

Т а б л и ц а 1. Прогнозная оценка дозы облучения персонала при запроектной аварии для скорости ветра 10 м/с, скорости осаждения аэрозольных частиц 0,005 м/с, высоты выброса 100 м, мкЗв

Доза облучения	Зона, м				
	1	2	3	4	5
	210— 290	290— 390	390— 510	510— 680	680— 920
Эффективная ингаляционная:					
^{137}Cs	—	—	—	—	—
^{134}Cs	—	—	—	—	—
^{131}I	6,65	5,57	4,44	3,33	2,22
^{133}I	0,08	0,07	0,05	0,04	0,03
Σ ингаляционная	6,73	5,64	4,49	3,37	2,24
Внешнее облучение от радиоактивного облака	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01
Σ эффективная	6,76	5,67	4,51	3,38	2,25
Эквивалентная доза щитовидной железы	90,21	80,12	59,82	50,05	30,62
Вклад в эффективную от радиоизотопов йода	3,67	3,08	2,45	1,84	1,22

Для наиболее загрязненной зоны 1 доза облучения персонала за первые 4 ч после начала запроектной аварии за счет внешнего облучения от радиоактивного облака составит 0,03 мкЗв, ингаляционная — 6,73 мкЗв. Суммарная эффективная доза облучения персонала в результате нахождения на площадке при аварийном выбросе продуктов деления через вентиляционную трубу составит 6,76 мкЗв, что существенно ниже порогового предела допустимой годовой дозы для персонала в аварийной ситуации 50 мЗв.

Прогнозная оценка профессионального облучения персонала при запроектной аварии — выброс продуктов деления в окружающую среду через байпас межоболочечного пространства на высоте 30 м приведена в табл. 2.

Для наиболее загрязненной зоны 1 энергоблока № 1 доза облучения персонала за первые 4 ч

после начала запроектной аварии за счет внешнего облучения от радиоактивного облака составит $0,7 \cdot 10^{-3}$ мЗв, энергоблока № 2 — $0,1 \cdot 10^{-3}$ мЗв, ингаляционная — 0,1 мЗв и 0,01 мЗв для энергоблоков № 1 и № 2 соответственно. Суммарная эффективная доза облучения персонала при нахождении на площадке в случае аварийного выброса продуктов деления в окружающую среду через байпас межоболочечного пространства для энергоблока № 1 составит 0,1 мЗв, для энергоблока № 2 — 0,01 мЗв, что существенно ниже порогового предела допустимой годовой дозы для персонала в случае аварийных ситуаций 50 мЗв.

Дозовые нагрузки на персонал энергоблоков обуславливаются отличающейся вблизи них застройкой промышленной площадки, что доказывает влияние инфраструктуры на воздушный перенос радиоактивных аэрозолей и, как следствие, неравномерность распределения концентрации.

Интенсивность радиационного риска для всех видов солидных злокачественных новообразований и риска злокачественных новообразований щитовидной железы при остром кратковременном облучении при выбросе продуктов деления в окружающую среду через вентиляционную трубу и байпас межоболочечного пространства энергоблока № 1 приведена в табл. 3, 4. Расчет выполнялся для однократного облучения мужчин в возрасте 30 лет, латентный период для солидных видов рака и рака щитовидной железы был принят равным 10 годам.

Анализ табл. 3 показал, что при суммарной эффективной дозе наиболее загрязненной зоны 1 энергоблока № 1 6,76 мкЗв избыточный абсолютный риск для всех злокачественных образований равен $3,38 \cdot 10^{-5}$ дополнительных случаев смерти на 100 тыс. чел.

Анализ табл. 4 свидетельствует о том, что при суммарной эффективной дозе облучения для наиболее загрязненной зоны 1 энергоблока № 1 0,1 мЗв избыточный абсолютный риск всех злокачественных образований равен $5 \cdot 10^{-4}$ дополнительных случаев смерти на 100 тыс. чел.

Заключение. На основе конвективно-диффузионной модели переноса, реализованной в среде COMSOL 5.6, выполнен расчетный анализ атмосферного переноса радиоактивных аэро-

Т а б л и ц а 2. Прогнозная оценка дозы облучения персонала при запроектной аварии для скорости ветра 10 м/с, скорости осаждения аэрозольных частиц 0,005 м/с, высоты выброса 30 м, мЗв

Доза облучения	Зона, м									
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	65	65—75	75—100	100—135	135—180	65	65—110	110—145	145—175	175—215
Эффективная ингаляционная, 10^{-3} ^{134}Cs ^{137}Cs ^{131}I ^{133}I	Энергоблок № 1					Энергоблок № 2				
	3	3	2	2	1	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2
	0,8	0,7	0,5	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,06
	80	70	60	50	20	10	10	10	10	10
	10	10	10	10	3	4	4	2	2	1
Σ ингаляционная	0,1	0,08	0,07	0,06	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Внешнее облучение от радиоактивного облака, 10^{-3}	0,7	0,6	0,5	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,06
Σ эффективная	0,1	0,09	0,07	0,06	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Эквивалентная доза щитовидной железы	1,29	1,1	0,92	0,74	0,37	0,15	0,13	1,11	0,09	0,07
Вклад в эффективную от радиоизотопов иода	0,05	0,04	0,04	0,03	0,01	0,01	0,01	0,004	0,004	0,003

Т а б л и ц а 3. Прогнозный радиационный риск для персонала при запроектной аварии с высотой выброса 100 м

Показатель риска	Зона, м				
	1	2	3	4	5
	210—290	290—390	390—510	510—680	680—920
Избыточный абсолютный для всех видов солидных злокачественных новообразований, 10^{-5} дополнительных случаев смерти на 100 тыс. чел.	3,38	2,84	2,26	1,69	1,13
Избыточный относительный для всех видов солидных злокачественных новообразований, 10^{-6}	7,95	6,67	5,30	3,97	2,65
Избыточный абсолютный для злокачественных новообразований в щитовидной железе, 10^{-9} дополнительных случаев смерти на 100 тыс. чел.	6,32	5,61	4,21	3,51	2,11
Избыточный относительный для злокачественных новообразований в щитовидной железе, 10^{-4}	2,31	2,06	1,15	1,13	7,71

Т а б л и ц а 4. Прогнозный радиационный риск для персонала при запроектной аварии с высотой выброса 30 м

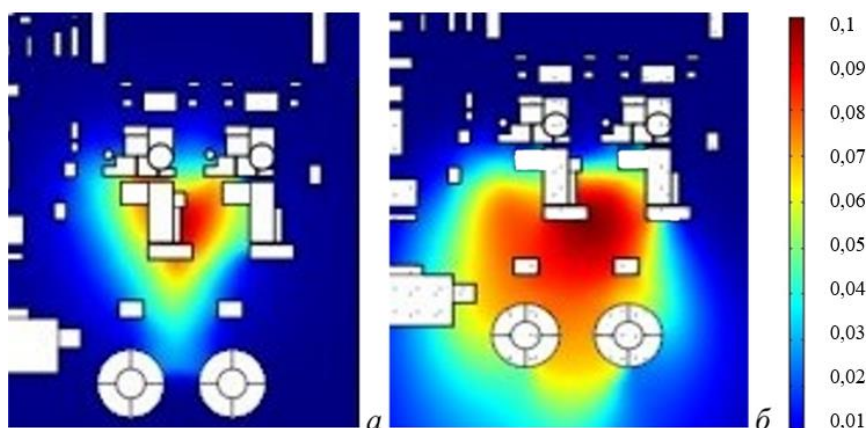
Показатель риска	Зона для энергоблока № 1, м				
	1	2	3	4	5
	65	65—75	75—100	100—135	135—180
Избыточный абсолютный для всех видов солидных злокачественных новообразований, 10^{-5} дополнительных случаев смерти на 100 тыс. чел.	50	45	35	30	15
Избыточный относительный для всех видов солидных злокачественных новообразований, 10^{-5}	11,8	10,6	8,23	7,05	3,53
Избыточный абсолютный для злокачественных новообразований в щитовидной железе, 10^{-8} дополнительных случаев смерти на 100 тыс. чел.	9,05	7,72	6,46	5,19	2,61
Избыточный относительный для злокачественных новообразований в щитовидной железе, 10^{-3}	3,31	2,82	2,34	1,91	0,95

золей на площадке АЭС-2006. Особенностью методического подхода является учет инфраструктуры, которая вносит значительные возмущения в воздушный перенос радионуклидов, что, в свою очередь, приводит к неравномерности распределения концентрации, особенно на небольшом расстоянии от источника выброса, что актуально для промышленной площадки АЭС (рис. 2). Неравномерность распространения радионуклидов наблюдается на разной высоте выброса, при разных погодных условиях и проявляется в образовании рециркуляционных зон позади препятствий, областей аэродинамической тени. Кроме того, наблюдается отличие прогнозируемой дозы при выбросе в идентичных условиях разных блоков многоблочной АЭС, что также обусловлено влиянием застройки.

Возможной областью применения данного метода расчета является прогнозирование последствий аварий на радиационных объектах и объектах использования атомной энергии в условиях неоднородности подстилающей поверхности. Информация может быть использована в том числе для выработки критериев принятия защитных мер при инцидентах на АЭС с аварийным выбросом радионуклидов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Публикация 103 МКРЗ. Пер с англ. Под ред. М.Ф. Киселева и Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. 312 с.
2. Моделирование распространения радионуклидов в окружающей среде. Труды ИБРАЭ РАН. М.: Наука, 2008, вып. 9, 229 с.
3. Pugliese S., Jaeger M., Occelli R. Finite element modeling of plume dispersion in the lower part of the atmosphere. — *Comp. Mech. Pub.*, 1996, v. 8, p. 99—108.
4. Андрижиевский А.А., Трифонов А.Г., Кулик Л.С. Анализ процессов переноса и осаждения аэрозольных частиц на характерных поверхностях инфраструктуры АЭС. — В сб: Труды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ, 2014, № 3 (167), с. 89—93.
5. Kubacki S., Dick E. Simulation of impinging mass transfer at high schmidt number with algebraic models. — *Progress Comp. Fluid Dyn.*, 2011, v. 11, № 1, p. 30—41.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Курс теоретической физики. Гидродинамика. М.: Наука, 1988, т. 6. 736 с.



Р и с. 2. Распределение относительной концентрации радиоактивного аэрозоля в диапазоне изменения 0—0,1 по зонам удаления от источника выброса на высоте 1 м в безветренную погоду (а) и при скорости ветра 10 м/с (б), скорости осаждения аэрозольных частиц 0,005 м/с

7. Давыдов М. Г., Зорина Л.В., Бураева Е.А. Радиоэкология. Учебник для вузов. Ростов-на-Дону: Феникс, 2013. 635 с.
8. Огородников Б.И., Хан В.Е. Аэрозоли-носители ^{212}Pb в подреакторных помещениях объекта «Укрытие» Чернобыльской АЭС. — *Радиохимия*, 2019, т. 61, № 1, с. 72—79.
9. Trifonov A.G., Orlovskaya V.I. Turbulent dispersion simulation of radioactive aerosol applied to the infrastructure of the NPP-2006 industrial site. — *Nonlinear Phenomena Complex Syst.*, 2021, v. 24, № 4, p. 356—364.
10. Walton A., Cheng A. Large-eddy simulation of pollution dispersion in an urban street canyon. Part 2: idealised canyon simulation. — *Atmospheric Environ.*, 2002, v. 36, № 22, p. 3615—3627.
11. Bazilevs Y., Calo V., Cottrell J. e.a. Variational multiscale residual-based turbulence modeling for large eddy simulation of incompressible flows. — *Comput. Meth. Appl. Mech. Engng*, 2007, v. 197, p. 173—201.
12. Орловская В.И., Трифонов А.Г. Прогнозная оценка дозовых нагрузок на персонал АЭС-2006 при проектных авариях с учетом типовой инфраструктуры промплощадки. — *Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*, 2018, т. 63, № 1, с. 111—118.
13. Орловская В.И., Трифонов А.Г. Прогнозная оценка дозовых нагрузок на персонал АЭС-2006 при запроектных авариях с учетом типовой инфраструктуры промплощадки. — Там же, 2019, т. 64, № 4, с. 485—490.
14. Чекин С.Ю., Ловачев С.С., Кашеева П.В. и др. Исследование современных моделей радиационных рисков НКДАР ООН, МКРЗ и ВОЗ при их применении для оценки радиационных рисков в ситуациях аварийного облучения. — *Радиация и риск*, 2020, т. 29, № 2, с. 5—20.
15. Орловская В.И., Трифонов А.Г. Оценка радиационного риска для персонала АЭС-2006 при различных аварийных ситуациях. — *Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*, 2021, т. 66, № 3, с. 378—384.

Поступила в Редакцию 30.05.22