

Алалем Есса Абдаллах Есса

**ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ
В РАЙОНЕ АЭС В КАСЕР-АМРА (ИОРДАНИЯ)**

05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование,
эксплуатацию и вывод из эксплуатации

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:



МОСКВА 2018

Диссертация выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научные руководители: Ксенофонтов Александр Иванович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник НИЯУ МИФИ, член-корреспондент Международной Академии Информатизации, г. Москва

Елохин Александр Прокопьевич, доктор технических наук, профессор, НИЯУ МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты: Чебышев Сергей Борисович, доктор технических наук, профессор, главный конструктор СНИИП, г. Москва

Бураева Елена Анатольевна, кандидат химических наук, заведующая лабораторией радиоэкологических исследований НИИ физики ЮФУ, г. Ростов-на-Дону

Ведущая организация: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики (ИБРАЭ РАН), г. Москва

Защита состоится «14» ноября 2018 г. в 14 часов 30 мин на заседании диссертационного совета Д 212.130.04 при НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, тел. 8(495) 788 56 99, доб. 9677.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте НИЯУ МИФИ <http://ods.mephi.ru>

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан «___» сентября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических
наук, профессор



И.И. Чернов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность работы

Иорданское Хашимитское Королевство – страна с выраженным экономическим ростом и значительным увеличением потребления электроэнергии, как и многие другие страны, не располагающие доступными углеводородными ресурсами, приступила в настоящее время к созданию собственной атомно-энергетической промышленности. Страна в значительной степени зависит от экспорта энергетических ресурсов, что тормозит развитие других отраслей промышленности, нуждающихся в электроэнергии.

Такое положение дел и послужило причиной разработки в Иордании плана развития атомной энергетики и строительства первой в стране атомной электростанции.

Одной из важнейших задач уже на начальной стадии проектирования атомных станций является необходимость моделирования переноса радиоактивных выбросов в атмосферу с учетом местных особенностей климата Иордании. Требуется минимизировать степень экологической опасности, своевременно и максимально точно определить направление возможного распространения загрязнения, его плотность, а также условия распространения.

В соответствие с документами, ратифицированными парламентом Иордании, к 2023 г. запланирован ввод в эксплуатацию первой атомной электростанции (АЭС) с двумя реакторами суммарной мощностью 2000 МВт, что послужит мощным стимулом развития промышленности и росту благосостояния населения Иордании в ближайшие десятилетия. Строительство атомной электростанции планируется в районе «Касер-Амра» российскими специалистами. АЭС предполагается разместить компактно и на расстоянии около 20 км от города Зарка, в малонаселенной местности, которая по своим климатическим особенностям не вполне пригодна для ведения сельского хозяйства.

Цель работы. Целью работы является создание программного комплекса для расчета параметров рассеяния выбросов в атмосферу для моделирования условий эксплуатации будущей АЭС в районе «Касер-Амра» в Иордании на ос-

нове модифицированной базовой модели приземного слоя.

Результаты расчетов направлены на решение задач по охране окружающей среды при создании национальной ядерной инфраструктуры Иордании и обеспечивающие необходимые комплексные мероприятия по оценке и реабилитации возможных радиационно-загрязненных территорий.

В работе для осуществления поставленной цели были решены следующие задачи.

1. Получена и использована необходимая для проведения расчетов информация по метеопараметрам атмосферы в условиях умеренной и тропической зон Иордании.
2. Проведено обоснование принципиальной возможности применения эффективных методов моделирования параметров атмосферного пограничного слоя, отработанных в условиях Иордании.
3. Определено необходимое и достаточное количество гамма-детекторов автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (АСКРО) в районе АЭС.
4. Указаны принципы и методы размещения гамма-детекторов АСКРО на территории, на которой ведется строительство АЭС «Касер-Амра».
5. Рассчитаны дозовые характеристики от атмосферных радиоактивных выбросов вокруг АЭС с помощью метода Монте-Карло и интегрального метода.
6. Проведена адаптация и верификация численной модели атмосферного пограничного слоя для восстановления его вертикальной структуры на основе доступной для климатологического анализа информации.

Научная новизна.

Впервые для подготовки проекта АЭС в Иордании:

- подготовлена информация о метеорологическом состоянии атмосферы региона (скорость ветра, температура на различной высоте, температура уровня земли) в соответствии с методическими требованиями, обеспечивающими определение состояния устойчивости атмосферы в регионе расположения АЭС;

- подготовлена программа, реализующая методику оценки состояния устойчивости атмосферы в регионе АЭС;

- разработан и практически реализован метод восстановления вертикальной структуры атмосферного пограничного слоя над промышленной площадкой для проектируемой АЭС с использованием стандартных гидрометеорологических измерений и анализа метеопараметров на стандартных изобарических поверхностях;

- проведены расчеты, позволяющие определить метеорологические характеристики атмосферы и их средние значения, представляющие возможность проведения прогностических оценок радиоактивного загрязнения окружающей среды в условиях радиационных аварий на АЭС и провести минимизацию их последствий;

- проведен анализ расчётов радиоактивного загрязнения окружающей среды с использованием метода, основанного на концепции лучевого равновесия ионизирующего излучения в атмосфере, интегрального метода и метода Монте-Карло, которые показали удовлетворительное согласие результатов расчета в определенных диапазонах изменения текущих координат, подтверждая, таким образом, их корректность;

- впервые разработана схема размещения системы гамма-детекторов автоматизированной системы контроля радиационной обстановки окружающей среды (АСКРО), основанная на особенностях метеорологических характеристик региона, определяющих состояние устойчивости атмосферы в различные сезоны времен года и учитывающая характер и особенности радиоактивного загрязнения окружающей среды в условиях радиационных аварий на АЭС;

Практическая значимость работы. В связи с развитием ядерной инфраструктуры Иордания для оценки экологической обстановки, вызванной эксплуатацией АЭС «Касер-Амра», и возможностью радиоактивного загрязнения окружающей среды, проведены модельные исследования характеристик газоаэрозольных выбросов и оценки доз от возможного радиоактивного загрязнения поверхности. Определено направление возможного распространения в ат-

мосфере радиоактивного выброса для минимизации степени экологической опасности.

В будущем планируется использование разработанных программных средств и полученных результатов данной работы при составлении предварительных отчетов по обоснованию оценки воздействия на окружающую среду АЭС «Касер-Амра» в Иордании.

Достоверность представленных в диссертации расчетных данных определяется:

- использованием современных методов моделирования атмосферных переносов, проверенных в исследованиях других авторов;
- результатами сравнения величин мощности дозы различными методами, включая метод Монте-Карло.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Метод восстановления вертикальной структуры атмосферного пограничного слоя над территорией проектируемой промышленной площадки АЭС с использованием данных стандартных гидрометеорологических измерений и результатов анализа скорости ветра и температуры на стандартных изобарических поверхностях.
2. Результаты расчетов пространственного распределения мощности дозы для выброса из венттрубы в районе расположения АЭС в Иордании.
3. Рекомендации и обзор характеристик выбранной площадки строительства АЭС «Касер-Амра» в Иордании.

Личный вклад автора. Все выносимые на защиту результаты и положения диссертационной работы получены и разработаны автором самостоятельно, или при его непосредственном участии. Автор принимал участие в постановке задач, расчетах с помощью интегрального метода, проведении и обработке результатов моделирования, аналитическом исследовании и подготовки научных статей.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4-х глав и заключения. Список использованной литературы включает 86 наименований на русском и иностранных языках. Общий объем 108 страниц текста и 61 иллюстраций.

Апробация работ. Основные результаты и положения диссертации представлены на следующих научных конференциях: XII Международная научно-практическая конференция «Безопасность ядерной энергетики», 1–3 июня 2016 г., г. Волгодонск; VII Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», 16–21 апреля 2018 г., г. Москва; II Международная научная конференция «Техногенные системы и экологический риск», 19–20 апреля 2018 г., г. Обнинск; XIV Международная научно-практическая конференция «Безопасность ядерной энергетики» 30 мая–1 июня 2018 г., г. Волгодонск.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 статей, включая одну статью в журнале, индексируемом в базе данных Web of Science и Scopus.

Содержание диссертации

Во введении приводится обоснование необходимости проведения в районе размещения планируемой АЭС в Иордании оценки радиационно-экологической обстановки, прогнозирования и предупреждения возможных негативных последствий радиационного воздействия для населения и окружающей среды. Для принятия необходимых мер по предотвращению или снижению радиационного воздействия, а также в целях систематического предоставления соответствующей оперативной информации органам государственной власти и органам управления по использованию атомной энергии необходимо иметь достоверную информацию, полученную по надежным методам расчета и моделям распространения и рассеяния выбросов АЭС в атмосферу.

В первой главе диссертации приведен аналитический обзор литературы, посвященной проблеме оценки и прогнозирования радиационно-экологической

обстановки в районе АЭС «Касер-Амра» в Иордании. Дан анализ существующих моделей распространения газоаэрозольных выбросов АЭС в окружающей среде, приведен обзор существующих моделей переноса и рассеяния примесей в атмосфере, в том числе модель приземного слоя. Рассматриваются установленные действующими международными и российскими нормативными документами критерии и требования к радиационной безопасности АЭС при возможных авариях. В главе показана актуальность проблемы в целом, а на основе решения рассмотренных задач обосновывается научная новизна данного исследования, необходимость получения результатов и их практическая значимость, и определяются положения, выносимые на защиту.

Во второй главе диссертации исследуются основные характеристики промплощадки в районе города Зарка в Иордании, намеченной для строительства атомной электростанции. Указанные характеристики включают в себя географию, метеорологию, гидрологию региона, его геологические и сейсмологические особенности, а также демографические особенности близлежащих промышленных районов. При выборе площадки был применен оптимальный подход, сочетающий в себе разведку местности, непосредственную работу со статистическими данными, применение согласованных критериев, в сочетании с инженерной оценкой и логическими выводами.

Поэтому, основываясь на нормативных документах МАГАТЭ и Российской Федерации, выбор места размещения АЭС должен касаться, как вопросов метеорологии региона, геологии грунтов, гидрологии, сейсмологии и демографических особенностей региона, а также оптимального пути прокладки трубопровода от станции очистки сточных вод до планируемого пруда-охладителя. Кроме того, в силу существующей политической нестабильности региона стран Ближнего Востока в рамках указанных исследований необходимо рассмотреть роль внешних факторов опасностей.

При выборе района размещения под строительство АЭС в Иордании было проведено комплексное исследование, в результате которого была определена наиболее подходящая территория, названная «Регион-1» с площадью 6,36

км². При этом расстояние до ближайшей станции очистки сточных вод «Самра» составило около 70 км, которая в настоящее время производит очистку для 2,2 млн. жителей столицы страны – города Аммана и прилегающих районов.

Была получена и обработана информация с метеорологической станции по средней годовой температуре воздуха, относительной влажности, среднегодовому количеству осадков, частоте туманов и др. Важными параметрами являются максимальная интенсивность пыльных дней, обусловленных ветровым подъемом пыли, число дней с грозами, преобладающие направления ветра, сейсмической активности.

К социальным демографическим особенностям региона, является низкая плотность населения в 30-ти км зоне, которая варьируется в пределах 10 – 50 чел/км².

Кроме того, появление АЭС в Иордании ставят перед службой безопасности вооруженных сил Иордании задачи по обеспечению физической защиты ядерных объектов, учитывая регион, не отличающийся политической и экономической стабильностью.

В третьей главе диссертации внимание было уделено вопросам моделирования распространения радиоактивного выброса и оценки его воздействия на окружающую среду. Для уменьшения степени экологической опасности необходимо максимально точно определить направление возможного распространения выброса, знать тип радионуклидов и распределение активности, а также характеристики района АЭС «Касер-Амра» в Иордании. Результаты проведенных исследований в проекте АЭС «Бушер» (Иран) дали возможность разработать аналогичную программу по определению необходимого и достаточного количества гамма-детекторов автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (АСКРО) для иорданской АЭС.

На основе данных по метеорологическим характеристикам района строительства АЭС в Иордании для различных сезонов и времени суток приведены расчеты скорости ветра и температуры на разных высотах, коэффициента турбулентной диффузии и энергии турбулентных пульсаций как функции высоты.

Рассчитанные данные позволяют оценить радиоактивное загрязнение окружающей среды в рамках модели приземного слоя атмосферы в условиях гипотетической аварии на АЭС «Касер-Амра». В главе получены результаты исследования необходимого и достаточного количества детекторов ионизирующего излучения, размещаемых вокруг АЭС, что позволяет в дальнейшем оперативно получать оценки радиоактивного загрязнения окружающей среды.

Особенностью АЭС является выход радионуклидов в атмосферу на большой высоте. Газоаэрозольные выбросы создают в атмосферном воздухе аэродисперсные массы, которые в результате турбулентного движения долгое время удерживаются в воздухе и выносятся воздушными потоками из района расположения станции на значительное расстояние, что ведет к распространению радиоактивного загрязнения на обширную территорию. Скорость и дальность переноса таких масс зависят от турбулентных течений в атмосфере, времени их существования в воздухе, метеорологических условий, а также скорости и направления атмосферных потоков и периода полураспада радионуклидов.

В настоящей работе необходимые метеорологические параметры предварительно были получены на двух разных высотах, а на основе решения замкнутой системы уравнений для приземного слоя атмосферы охарактеризован общий характер их зависимости от высоты.

Для моделирования гипотетической аварии с выбросом радиоактивных веществ в атмосферу и определения уровней радиоактивного загрязнения окружающей среды, а также дозовых нагрузок на персонал и население предполагается использование АСКРО. Данная система способна предоставить текущую информацию по развитию радиационной обстановки в режиме реального времени всем необходимым структурам для своевременной оценки риска и принятия решений с целью минимизации последствий аварии.

В настоящей работе при рассмотрении сценария, обусловленного выходом радиоактивных газоаэрозольных примесей в атмосферу, проведена оценка радиоактивного загрязнения воздушного пространства и подстилающей поверхно-

сти, а также дозовых нагрузок на персонал и население региона, оказавшегося под струей радиоактивного выброса.

Приведем математическую формулировку задачи и методы ее решения для объемной активности газоаэрозольной радиоактивной примеси $q(x, y, z)$. В качестве метеопараметров атмосферы обозначим через $u(z)$ – продольную скорость воздушного потока (считая поперечную равной нулю), $k(z)$ – коэффициент турбулентной диффузии и $b(z)$ – энергию турбулентных пульсаций на высоте z , определяемые в рамках модели приземного слоя атмосферы. Тогда:

$$u(z) = v_* u_n / \chi; \quad k(z) = \chi v_* L k_n; \quad b(z) = v_*^2 c = 4,6625 v_*^2 b_n, \quad (1)$$

где L – масштаб приземного слоя атмосферы-масштаб Молина-Обухова; $z_n = z/L$ – высота; k_n – коэффициент турбулентной диффузии; b_n – энергия турбулентных пульсаций; u_n – скорость ветра – все безразмерные величины; v_* – динамическая скорость; $\chi = 0,4$ – постоянная Кармана ; c – постоянная.

Зависимости $u(z)$, $k(z)$ и $b(z)$ как функции высоты z в рамках модели приземного слоя атмосферы могут быть успешно найдены, если известны параметры приземного слоя v_* и L . Значения последних находим, используя методику градиентных наблюдений по измерениям на двух высотах скорости ветра и температуры, например, $z_1=40$ м и $z_2=10$ м.

Затем находим изменения скоростей $Du=u(z_1)-u(z_2)$ и температуры T , °К через потенциальную температуру $\theta = T(1000/P)^{0,29}$, $D\theta=\theta(z_1)-\theta(z_2)$, где P – атмосферное давление, мбар. Согласно модели приземного слоя, запишем для конкретного значения L соотношение:

$$(Du/Du_n)^2 = (g/T_0)L(D\theta/D\theta_n), \quad (2)$$

в котором скорость u_n и температура θ_n вычислены для различных высот z_n , а Du_n ; $D\theta_n$ – величины их разности. Поскольку Du ; $D\theta$ – измеряемые величины, а

Du_n и $D\theta_n$ зависят от масштаба Мони́на-Обухова L , то выражение (2) есть явно- неявная функция L .

Для нахождения L зададим некоторое значение L_{\max} и варьируя его, например, $L_i = DL \cdot i$, для $i=1,2,3,\dots,N$; вычисляем величину $DL=L_{\max}/N$ до тех пор, пока относительная погрешность

$$\varepsilon = \left(\frac{(Du/Du_n)^2 - (gL/T_0)(D\theta/D\theta_n)}{(Du/Du_n)^2} \right), \quad (3)$$

не будет минимальной (в пределе $\varepsilon \rightarrow 0$). Найденное значение L^* , при котором ε минимальна, и определит искомое значение L как $L^* = DL \cdot i^*$. Определив масштаб Мони́на-Обухова L и пересчитав $D\theta_n$ и Du_n при фиксированных z_1 и z_2 , находим новые значения v'_* и v''_* :

$$v'_* = \chi \frac{Du}{Du_n} \text{ или } v''_* = \chi \sqrt{\left(\frac{gL}{T_0}\right) \left(\frac{D\theta}{D\theta_n}\right)}, \quad (4)$$

в котором $v'_* \rightarrow v''_*$ при $\varepsilon \rightarrow 0$.

Поскольку параметр L может быть, как $L > 0$, так и $L < 0$ (при $L=0$ режим движения теряет турбулентный характер), то всевозможные вариации величины L_i должны проводиться по формуле: $L_i = DL \cdot (N+1-i)$, $i = 1,2,3,\dots,N, N+1, N+2,\dots,2N+1$. Последнее позволяет учесть различную стратификацию слоя атмосферы, задаваемую температурным режимом. После определения параметров L , v_* значения $u(z)$ и $k(z)$ находим по формулам (1).

Для определения зависимости метеопараметров атмосферы, таких как скорость приземного ветра $u(z)$ и коэффициент турбулентной диффузии $k(z)$, как функций высоты z над подстилающей поверхностью, были взяты значения параметров, измеренные на метеовышке, находящейся на расстоянии около 100 км от промплощадки АЭС «Касер-Амра». Собранные с двух высотных отметок метеоданные по температуре, давлению, скорости и направлению ветра усредня-

лись по четырем сезонам года и четырем шестичасовым суточным времени в 2:00, 8:00, 14:00, 20:00 часов.

При определенной в ходе расчета минимальной относительной погрешности $\varepsilon(i)$ были получены значения индекса i^* для дальнейшего вычисления значения масштаба Монино-Обухова L в каждое время суток. На рис. 1 эта зависимость приведена на 20:00 часов для зимнего периода, анализ которой показывает, что с ростом индекса i относительная погрешность $\varepsilon(i)$ стремится к минимуму в широкой области изменения i , уменьшаясь до нуля при некотором i^* , и определяя, таким образом, искомый масштаб Монино-Обухова $L_{i^*} = \Delta L \cdot i^*$.

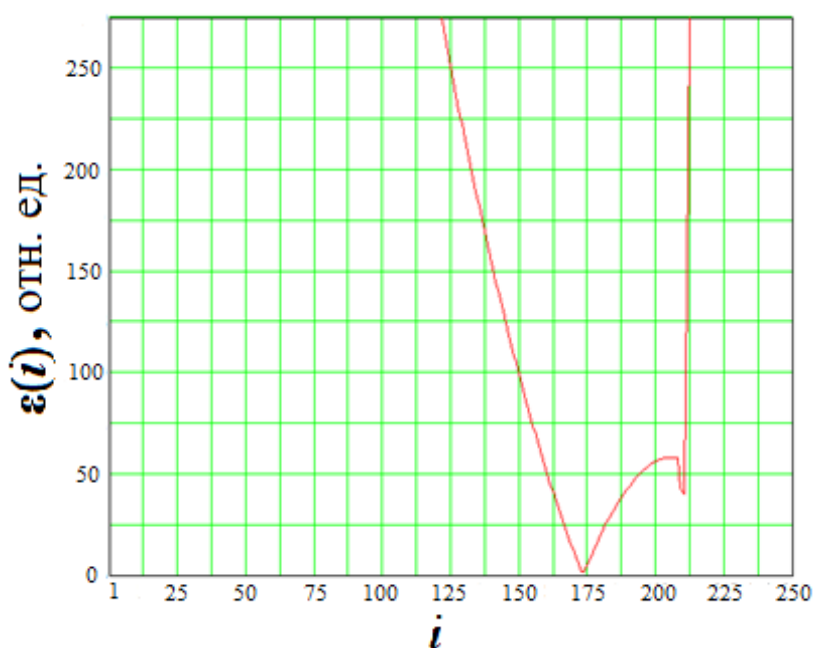


Рис. 1. Относительная погрешность $\varepsilon(i)$, зима, 20:00, $L = 17$

Подобный характер зависимости $\varepsilon(i)$ оказывается справедливым практически для всех сезонов. Анализ полученных в ходе расчета значений параметра Монино-Обухова L позволил сделать вывод, что характер состояния атмосферы в общем случае является устойчивым и $L > 0$, а область неустойчивости ($L < 0$) характерна для летнего и весеннего сезонов в вечернее время $\sim 20:00$.

Найденные значения L и ν_* , дали возможность рассчитать по формулам (1) значения скорости воздушного потока $u(z)$, коэффициента турбулентной

диффузии и энергии турбулентных пульсаций как функции высоты, как для устойчивого, так и неустойчивого состояний атмосферы.

Анализ этих зависимостей показал их существенное различие, как по абсолютной величине, так и по характеру их изменения с высотой. Например, при устойчивом состоянии скорость ветра растет с высотой z (рис. 2).

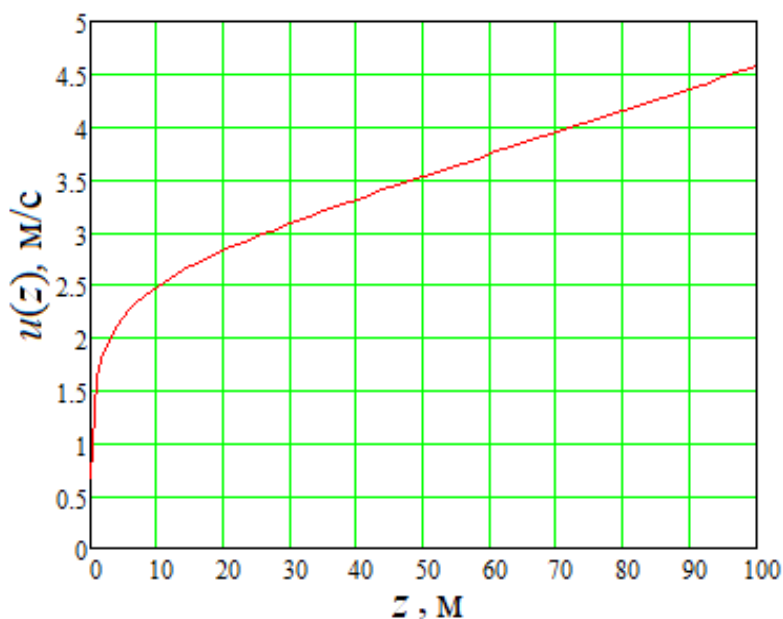


Рис. 2. Зависимость скорости воздушного потока приземного слоя атмосферы $u(z)$ зимой при устойчивом состоянии атмосферы $L = 17$ м; $v_* = 0,139$

На рис. 3 приведен коэффициент турбулентной диффузии при неустойчивом состоянии атмосферы (весна). Коэффициент турбулентной диффузии отличается на два порядка от устойчивого состояния атмосферы (зима), изменяя при этом характер роста с высотой z .

На рис. 4 приведена энергия турбулентных пульсаций при неустойчивом состоянии атмосферы (весна). Энергия турбулентных пульсаций изменяется не только по абсолютной величине при неустойчивом и устойчивом состояниях атмосферы, но и изменяет характер зависимости производной указанной величины, т.е. демонстрирует рост при неустойчивом состоянии атмосферы.

Характер полученных зависимостей скорости ветра $u(z)$ (см. рис.2) и коэффициента турбулентной диффузии $k(z)$ (см. рис. 3) как функций высоты z хо-

рошо согласуется с известными в литературе данными для разных состояний атмосферы.

Перенос радиоактивной примеси в атмосфере рассчитывали, используя данные (табл. 1), полагая при этом, что размывание примеси по оси Y (направление, перпендикулярное ветру) осуществляется по закону Гаусса.

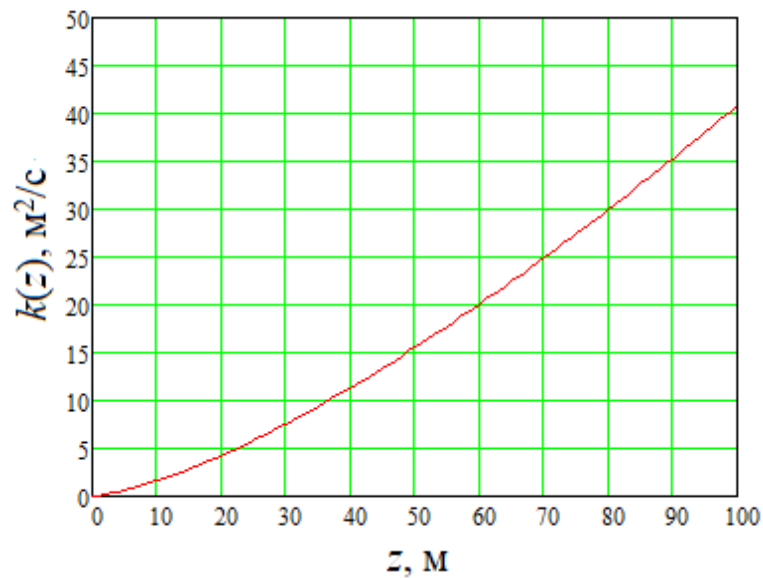


Рис. 3. Зависимость коэффициента турбулентной диффузии $k(z)$ при неустойчивом состоянии атмосферы (весна) $L = -5$ м; $v^* = 0,232$

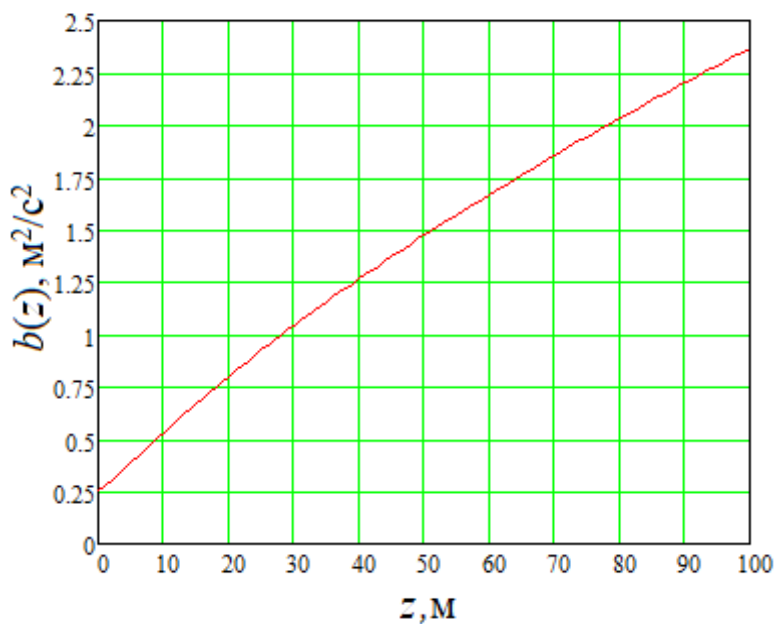


Рис. 4. Зависимость энергии турбулентных пульсаций $b(z)$ для неустойчивого состояния атмосферы (весна) $L = -5$ м; $v^* = 0,232$

Усредненные характеристики метеопараметров

Сезон года/ время	\bar{u} , м/с	\bar{k} , м ² /с	\bar{b} , м ² /с ²	L , м	ν_*
Зима, 20:00	3,057	0,684	0,041	17	0,139
Весна, 20:00	3,836	11,743	1,129	-5	0,232

Тогда объемную активность примеси $q(x, y, z)$ определяем, как:

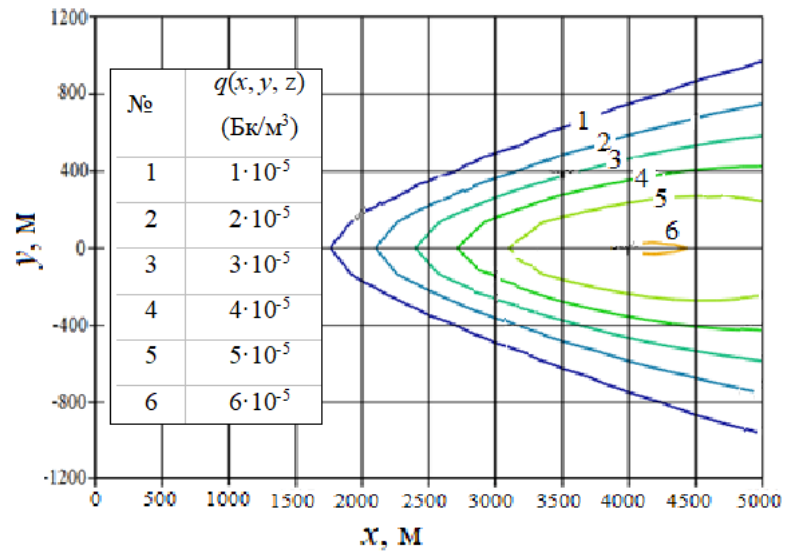
$$q(x, y, z) = \frac{S(x, z)}{\sqrt{2\pi}\sigma_y(x)} e^{-(y^2/2\sigma_y^2)}, \quad (5)$$

где $\sigma_y(x)$ – среднеквадратичное отклонение и $\sigma_y^2(x) = \bar{b}x^2/\bar{u}^2(1 + \alpha x\bar{b}/\bar{k}\bar{u})$; $S(x, z)$ – функция распределения активности, в плоскости x, z , которая зависит от мощности и эффективной высоты выброса, от постоянной вымывания и от гравитационной скорости осаждения примеси из атмосферы, от скорости сухого осаждения примеси на подстилающую поверхность и от параметра ее шероховатости.

Результаты расчетов указанных зависимостей $u(z)$, $k(z)$ и $b(z)$ как функций высоты над подстилающей поверхностью, а также их усредненные значения дают возможность получить осевые и поперечные распределения объемной активности в зависимости от состояния устойчивости приземного слоя атмосферы.

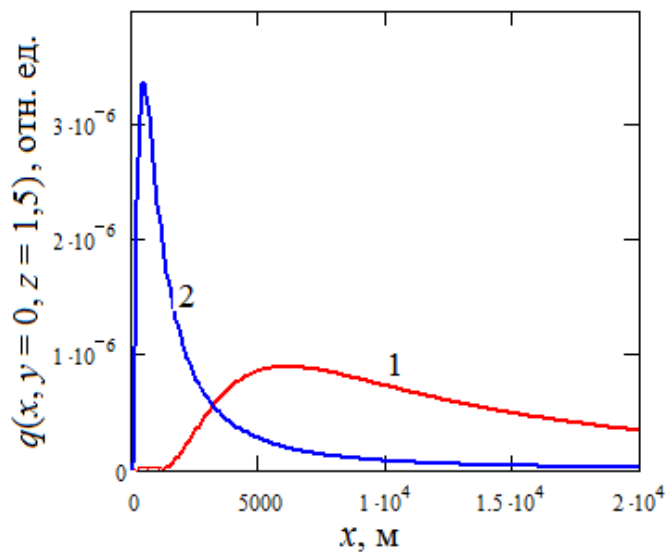
Эти расчеты наглядно показывают, какую важную роль может играть состояние устойчивости атмосферы при оценке площади радиоактивного загрязнения сельскохозяйственным угодьям и окружающей среде в целом. Характерной особенностью распределений примесей является очевидное гауссово уширение зависимости, представленной на рис. 5.

Рис. 5. Изолинии объемной активности газоаэрозольной примеси для устойчивого состояния атмосферы при $L=17$, $z=1,5$ м, $\bar{b} = 0,041$, высота выброса=100 м



На рис. 6 приведены результаты расчета осевого распределения радиоактивной примеси для устойчивого и неустойчивого состояний атмосферы.

Рис. 6. Осевые распределения выбросов объемной активности $q(x, y=0, z=1,5$ м) газоаэрозольной радиоактивной примеси при устойчивом состоянии атмосферы ($L=17$) (1) и при неустойчивом ($L=-5$) (2)



Из анализа распределений, приведенных на графике, следует, что максимум поверхностного загрязнения в зависимости от состояния устойчивости атмосферы располагается на различных расстояниях от источника выбросов, что обусловлено существенным различием в поведении скорости воздушного потока как функции высоты и коэффициента турбулентной диффузии.

Зависимость распределения примесей от состояния устойчивости атмосферы, позволяет найти оптимальные значения необходимого и достаточного числа датчиков АСКРО для любого состояния устойчивости атмосферы, кото-

рым характеризуется тот или иной регион, в котором размещается АЭС и, в частности, район строительства АЭС в Иордании.

В четвертой главе диссертации были использованы расчетные методы для решения задач радиационного мониторинга окружающей среды. В расчетах оценивается распределение мощности дозы внешнего облучения на поверхности вдоль направления движения радиоактивной примеси для радионуклида Кг-85 с единичной мощностью выброса и через венттрубу АЭС. Были получены результаты методом Монте-Карло и с помощью интегрального метода, основанного на учете рассеянного излучения с помощью факторов накопления точечного изотропного источника для бесконечной геометрии.

Расчетные оценки характеристик радиоактивной примеси, распространяющейся в атмосфере в результате выбросов АЭС требуют знания, как метеопараметров, так и состояния устойчивости атмосферы. Радиоактивная примесь характеризуется зависимостью объемной активности от координат, радионуклидным составом.

Для решения уравнения турбулентной диффузии, описывающего перенос примеси в приземном слое атмосферы, метеорологические параметры усреднялись по высоте, и использовались их средние значения \bar{b} , \bar{k} , \bar{u} для района строительства АЭС в Иордании (см. табл. 1).

Расчет указанных характеристик производился также интегральным методом для области распределения радиоактивной примеси в атмосфере в виде совокупности элементарных источников с соответствующими текущими координатами. Вклад в точечный детектор (x_0, y_0, z_0) определяется величиной мощности дозы D' как интеграл от совокупности точечных источников с активностью $q(x, y, z)$:

$$D'(x_0, y_0, z_0) = \frac{E\eta\mu_{ak}}{4\pi} \int_V B_E(E, \mu r) q(x, y, z) \frac{e^{-\mu r}}{r^2} dV, \quad (6)$$

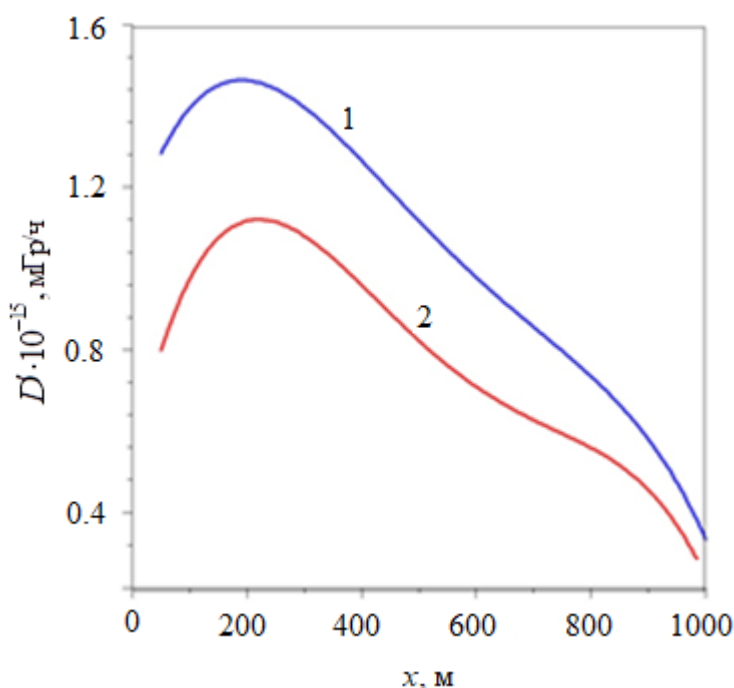
где, E – энергия фотонов; η – квантовый выход; $B_E(E, \mu r)$ – энергетический фактор накопления; μ , μ_a – коэффициенты ослабления и поглощенной энергии гамма-излучения, соответственно; V – объем источника; k – нормировочный коэффициент; r – расстояние между точечным источником и точечным детектором.

Погрешность расчетов определяется точностью представления функции распределения радиоактивной примеси (5) и значениями фактора накопления.

На больших расстояниях от источника, где основной вклад в мощность дозы дает нерассеянное излучение, оценку мощности дозы от радиоактивного загрязнения воздушного бассейна можно проводить гамма-методом, основанного на концепции лучевого равновесия.

На рис. 7 приведены распределения мощности дозы от объемного источника, моделирующего факел выброса мощностью 1 Бк/с с радионуклидом Кг-85 вдоль оси X для неустойчивого состояния (весенний сезон).

Рис. 7. Зависимость мощности дозы $D'(x_0, y_0, z_0)$ от расстояния x до источника для неустойчивого состояния атмосферы (весна) при расчете интегральным методом (1) и методом Монте-Карло (2)



Расчеты проводились с использованием интегрального метода и метода Монте-Карло. Область максимума распределений соответствует области высокой плотности радиоактивной примеси, возникающей в атмосфере на не-

больших расстояниях от источника, а с расстоянием, по мере распространения примеси мощность дозы падает.

Дозовые распределения формируются за счет двух конкурирующих эффектов – накоплением объемной активности в атмосфере и ее рассеиванием – сносом воздушным потоком и поперечным гауссовым уширением факела выбросов. В целом результаты расчетов удовлетворительно согласуются, но значительно лучше с ростом расстояний вдоль оси факела (~ 700 м).

Оценка мощности дозы с помощью гамма-метода в области малых расстояний от источника выброса, на которых происходит резкое изменение в распределении приземной активности и нарушаются условия лучевого равновесия, может привести к значительной погрешности в величине мощности дозы. В этом случае, расчеты показали, что на небольших (до 700 м) расстояниях происходит значительное расхождение результатов по сравнению с интегральным методом.

Рассеяние радиоактивной примеси с ростом расстояния приводит к ее более равномерному распределению в атмосфере, и оценку мощности дозы можно получить в рамках концепции лучевого равновесия. Значения мощности доз, полученные обоими методами, как при устойчивом, так и при неустойчивом состояниях атмосферы в области небольших x , например, в области максимума, различаются (до 30%), а на больших расстояниях расхождение результатов незначительно. Отметим, что одним из преимуществ приведенных методов оценки радиационных характеристик является возможность их непосредственного определения в режиме реального времени.

Основные выводы

1. Проведен анализ и обработка характеристик метеорологических данных для использования в расчетных программах переноса радиоактивной примеси от АЭС.
2. Адаптирована и верифицирована численная модель атмосферного погранич-

ного слоя для решения задачи восстановления его вертикальной структуры на основе измерений на метеостанции и данных анализа атмосферных процессов на стандартных изобарических поверхностях.

3. Рассчитаны параметры приземного слоя атмосферы (масштаб Мони́на-Обухова и динамическая скорость), определяющие состояния устойчивости атмосферы по четырем сезонам года и четырем шестичасовым суточным отрезкам времени для планируемой АЭС в Иордании.
4. Рассчитаны и обработаны метеопараметры атмосферы: продольная скорость воздушного потока, коэффициент турбулентной диффузии и энергия турбулентных пульсаций в рамках модели приземного слоя атмосферы для получения функции распределения примеси в атмосфере.
5. Определены оптимальные количество датчиков АСКРО для всех состояний устойчивости атмосферы района строительства АЭС в Иордании, а также разработанные методы и программные средства были использованы в расчетах для 3 и 4 блоков АЭС «Бушер» (Иран).
6. Получены дозовые характеристики от выбросов радиоактивных примеси АЭС с помощью интегрального метода и метода Монте-Карло и показано хорошее согласие результатов особенно на больших расстояниях от точки выбросов.

Список основных публикаций по теме диссертации

1. А.П. Елохин, А.И. Ксенофонтов, Е.А. Алалем, П.И. Федоров. Анализ основных характеристик района размещения проектируемой АЭС в Иордании. – Глобальная ядерная безопасность, 2016, № 2(19), с. 7–15.
2. Е.А. Алалем, А.П. Елохин, А.И. Ксенофонтов, П.И. Федоров. Метеорологические характеристики района АЭС в Иордании. – Глобальная ядерная безопасность, 2017, № 3(24), с. 19–34.

3. А.П. Елохин, А.И. Ксенофонов, Е.А. Алалем. Метеорологические характеристики района АЭС «Бушер» в Иране. – Глобальная ядерная безопасность, 2017, № 4 (25), с. 23–47.
4. A.P.Elokhin, E.A.Alalem, A.I. Ksenofontov. Meteorological Conditions of the Bushehr NPP Area, Iran. International Journal of Engineering and Technology (UAE) 2227-524X, 2018, Vol. 7, № 4.
5. А.П. Елохин, А.И. Ксенофонов, Е.А. Алалем, С.Н. Федорченко. Метод экспресс-оценки средней энергии спектра γ -излучения радионуклидов в условиях радиационных аварий в помещениях спецкорпуса АЭС . – Глобальная ядерная безопасность, 2018, № 2 (27), с. 7–15.
6. А.И. Ксенофонов, А.П. Елохин, Е.А. Алалем. Применение расчетных методов для анализа характеристик γ -излучения радиоактивного облака при выбросах АЭС. Глобальная ядерная безопасность, 2018, № 3 (28).
7. А.П. Елохин, А.И. Ксенофонов, Е.А. Алалем, П.И. Федоров. Анализ основных характеристик района размещения проектируемой АЭС в Иордании. – В сб.: Материалы XII Международной научно-практической конференции «Безопасность ядерной энергетики» ВИТИ НИЯУ МИФИ, 1–3 июня 2016 г., г. Волгодонск, 2016, (<http://nps.viti-mephi.ru/ru/arhiv-konferencii>).
8. Е.А. Алалем, А.П. Елохин, А.И. Ксенофонов, П.И. Федоров. Метеорологические характеристики района АЭС в Иордании. – В сб.: Материалы VII Международной молодежной научной школа-конференции «Современные проблемы физики и технологий» НИЯУ МИФИ, 16-21 апреля 2018 г.- Москва, 2018, с. 185.
9. А.П. Елохин, А.И. Ксенофонов, Е.А. Алалем, С.Н. Федорченко. Метод экспресс-оценки средней энергии спектра излучения радионуклидов в условиях радиационных аварий в помещениях спецкорпуса АЭС. – В сб.: Материалы II Международной научной конференции «Техногенные си-

стемы и экологический риск» ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 19-20 апреля 2018 г. - Обнинск, 2018, с. 44 –45.

10. А.И. Ксенофонтов, А.П. Елохин, Е.А. Алалем. Применение расчетных методов для анализа характеристик излучения радиоактивного облака при выбросах АЭС. – В сб.: Материалы II Международной научной конференции «Техногенные системы и экологический риск» ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 19-20 апреля 2018 г. - Обнинск, 2018, с. 53 – 54.
11. А.П. Елохин, А.И. Ксенофонтов, Е.А. Алалем, С.Н. Федорченко. Метод экспресс-оценки средней энергии спектра излучения радионуклидов в условиях радиационных аварий в помещениях спецкорпуса АЭС. – В сб.: Материалы XIV Международной научно-практической конференции «Безопасность ядерной энергетики» 30 мая-1 июня 2018 г. – Волгодонск, 2018, (<http://nps.viti-mephi.ru/ru/arhiv-konferencii>).
12. А.И. Ксенофонтов, А.П. Елохин, Е.А. Алалем. Применение расчетных методов для анализа характеристик излучения радиоактивного облака при выбросах АЭС. – В сб.: Материалы XIV Международной научно-практической конференции «Безопасность ядерной энергетики» 30 мая – 1 июня 2018 г. – Волгодонск, 2018 (<http://nps.viti-mephi.ru/ru/arhiv-konferencii>).