

Министерство образования и науки РФ
Федеральное агентство по образованию
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(РГГМУ)

На правах рукописи

УДК 551.511.072



Харченко Евгения Владиславовна

Использование математических моделей переноса и рассеяния радионуклидов в атмосфере для управления рисками на стадии проектирования атомных электростанций

Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук, профессор,
Гаврилов Александр Сергеевич.

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук, профессор,
Вагер Борис Георгиевич.
Доктор технических наук, профессор
Воробьев Владимир Иванович.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Санкт-Петербургский научно-
исследовательский центр экологической
безопасности Российской академии наук

Защита состоится 24 марта 2016 г. в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д.212.197.01 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу:

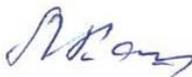
195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98, тел. (812) 633-01-82, 372-50-92

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Российского государственного гидрометеорологического университета по адресу:

195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.

Ваш отзыв на автореферат просим направлять по адресу 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98. Российский государственный гидрометеорологический университет, Диссертационный совет Д.212.197.01.

Автореферат разослан « 24 » февраля _____ 2016 г.



Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.ф.м.н., доцент

Л.В. КАШЛЕВА

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Несмотря на последствия радиационных аварий последних десятилетий (в первую очередь, аварий на Чернобыльской АЭС в 1986 г. и АЭС Фукусима Дайичи в 2011 г.), а также отказ ряда стран от программ развития ядерной энергетики, оказывается, что пока адекватной замены этого направления энергетики на альтернативные не наблюдается: в настоящее время в 30 странах мира насчитывается 195 действующих атомных электростанций (АЭС) с 438 энергоблоками, 71 энергоблок находится на стадии сооружения.

Наша страна извлекла серьезные уроки из аварии на Чернобыльской АЭС, полностью пересмотрев ранее существующие подходы в сторону новейших, имеющих высокий уровень безопасности, проектных решений АЭС.

Важнейшим этапом разработки такого рода проектных решений является исследование вероятностными методами потенциально возможных аварийных ситуаций Управление рисками в этом контексте – это выбор таких проектных решений, как в части расположения площадки АЭС, так и в части технологического оборудования, которые бы минимизировали негативные эффекты для населения при нормальной эксплуатации АЭС, а также при возможных отклонениях от нормальной эксплуатации и авариях.

Вероятностный анализ безопасности АЭС предполагает наряду с учетом частоты возникновения неисправностей, которые могут инициировать аварии, и оценку радиационных последствий этих аварий и соответствующего риска для населения. Радиационный риск для населения при авариях на АЭС определяется вероятностью и интенсивностью выбросов радиоактивных веществ в окружающую среду, их радионуклидным составом, физико-химической формой и условиями распространения, важнейшими из которых являются метеорологические условия рассеяния радионуклидов в атмосфере.

Согласно требованиям Международного Агентства по Атомной Энергии (МАГАТЭ) NS-G-3.2 (раздел 2) и российских НД (п. 5.4 НП-032-01) оценка радиационной обстановки при проектных и запроектных авариях на АЭС должна выполняться для наименее благоприятных метеорологических условий, характерных для района размещения АЭС.

Условия распространения и рассеяния аварийного выброса в атмосфере характеризуются так называемыми «факторами разбавления и осаждения», представляющими собой величины интеграла концентрации радионуклидов и интенсивности их осаждения на поверхность при единичной мощности аварийного выброса.

Для расчета факторов метеорологического разбавления примеси широкое распространение на практике в силу своей простоты и прозрачности получения результатов получила Гауссова модель атмосферной диффузии с формулами Смита-Хоскера и Бриггса для параметров атмосферной диффузии как функций расстояния от источника и категории устойчивости атмосферы по классификации

Пэскуилла – Гиффорда. Данная модель рекомендована для практического применения всеми международными организациями, включая Всемирную метеорологическую организацию (ВМО), Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ), Научный комитет по действию атомной радиации (НКДАР) ООН, Всемирную организацию здравоохранения (ВОЗ) для расстояний не более 30 км от источника.

Описание различных модификаций этой модели содержится в нормативных документах «Руководство МАГАТЭ по безопасности № 50-SG-S3», МХО ИАЭ НТД 38.220.56-84, в методических указаниях МПА-98. Алгоритмы такого рода модификаций реализованы в программных средствах (ПС) «ДОЗА_М» (НИЦ «Курчатовский институт»), «ВЫБРОС 3.1» (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»), «SULTAN» (АО «ВНИИАЭС»), «GENGAUS» («ГНЦ ИБФ»), а также в зарубежных программных средствах «GENII», «PACE», «COSIMA», «AIDA» и «BSAVVL version 2.3h» (Fennovoima (Финляндия)).

Прогноз радиационных последствий аварий на расстояниях более 30 км от АЭС в России осуществляется с использованием таких компьютерных систем, как ПС «НОСТРАДАМУС» (ИБРАЭ РАН) и ПК «RECASS NT» (НПО «Тайфун»), реализующих метод случайных смещений для моделирования атмосферной диффузии (метод Монте-Карло), когда поле концентрации радионуклидов представляется ансамблем отдельных диффундирующих частиц, которые переносятся полем регулярного ветра и испытывают случайные перемещения, имитирующие атмосферную турбулентность. Примером аналогичного зарубежного подхода является компьютерный пакет программ (КПП) «SILAM» (совместная разработка Финского метеорологического института (ФМИ) и Центра технических исследований Финляндии).

Тем не менее, что касается малых (до 30 км) расстояний от источника выброса, когда на начальное рассеяние облака радионуклидов значительное влияние оказывает застройка промышленной площадки, то здесь в методических подходах до последнего времени существовал явный пробел.

Общей целью работы являлась корректировка, уточнение и адаптация базовой модели МАГАТЭ для расчета параметров рассеяния кратковременных выбросов АЭС в атмосфере применительно к проблеме управления рисками на стадии проектирования новых АЭС.

Исходя из общей цели, в работе решались следующие задачи:

- адаптация и верификация численной модели атмосферного пограничного слоя для решения задачи восстановления его вертикальной структуры на основе доступной для климатологического анализа информации;
- обобщение методики МПА-98, реализующей отечественный норматив базовой модели МАГАТЭ, на случай учета влияния застройки промплощадки на рассеяние радионуклидов в зоне до 30 км от источника выброса;
- разработка метода статистической обработки расчетных характеристик разбавления / осаждения радионуклидов с целью получения

максимальных значений параметров рассеяния высокой процентной обеспеченности (до 99.5%) для продолжительности выбросов (утечек) до 48 часов;

- оценка погрешностей расчета максимальных значений факторов разбавления/осаждения на основе анализа чувствительности результатов расчета к погрешностям в исходных данных;

- разработка и аттестация программного средства для реализации в проектных работах новых методик расчета.

Методической основой диссертационного исследования послужили современные требования по безопасности АЭС, достижения в области физики атмосферного пограничного слоя и численного моделирования атмосферных процессов.

Методологической основой диссертационного исследования послужили труды российских и зарубежных ученых как в области обеспечения безопасности ядерных объектов (Ф. Пэскуилл, Ф. Гиффорд), так и в области физики атмосферного пограничного слоя (А.С. Монин, А.М. Яглом, Дж.А. Бузингер, Дж.К. Вингаард, Р.Дж. Лэм, С.Р. Ханна, Д.Л. Лайхтман, С.С. Зилитинкевич, Б.Г. Вагер, А.С. Гаврилов) и численного моделирования (Г.И. Марчук, Р. Роуч, А. Алоян).

Исходные данные для обработки включали сведения о структуре зданий и сооружений на промплощадках АЭС, сооружаемых по проекту АЭС-2006, накопленные ряды стандартных гидрометеорологических наблюдений, а также данных реанализа атмосферных процессов на стандартных изобарических поверхностях.

Научная новизна работы обусловлена следующим:

- впервые разработан и практически реализован метод восстановления вертикальной структуры атмосферного пограничного слоя над территорией проектируемой промышленной площадки АЭС с использованием лишь данных стандартных гидрометеорологических измерений на метеостанции и данных реанализа скорости ветра и температуры на стандартных изобарических поверхностях.

- впервые с использованием физически содержательной 3D-гидродинамической модели промышленной зоны разработана схема параметризации застройки в стандартной гауссовой модели применительно к расчету характеристик рассеяния радионуклидов газоаэрозольных аварийных выбросов в окрестности АЭС;

- впервые на основе рядов расчетных значений характеристик рассеяния радионуклидов в окрестности АЭС разработан и реализован статистический метод расчета максимальных значений факторов разбавления/осаждения высокой процентной обеспеченности (до 99.5%), закладываемых в проектные решения по безопасности АЭС.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

На основе разработанных и верифицированных алгоритмов расчета удается решать проектные задачи получения максимальных значений факторов разбавления/осаждения высокой процентной обеспеченности для вновь создаваемых АЭС на территориях, где отсутствуют накопленные данные о вертикальной структуре нижней тропосферы (градиентные измерения, содары, лидары), определяющие условия переноса и рассеяния примесей в атмосфере.

Проведенные исследования позволили обосновать радиационную безопасность ряда действующих (Кольская АЭС) и вновь проектируемых АЭС (Ленинградская АЭС-2, Белорусская АЭС, Балтийская АЭС). В ближайшее время планируется применение разработанных программных средств и полученных результатов при разработке проектов АЭС Пакш-2 (Венгрия), Эль-Дабаа (Египет), Нинь-Тхуан (Вьетнам).

Положения, выносимые на защиту:

– метод восстановления вертикальной структуры атмосферного пограничного слоя над территорией проектируемой промышленной площадки АЭС с использованием лишь данных стандартных гидрометеорологических измерений на метеостанции и данных реанализа скорости ветра и температуры на стандартных изобарических поверхностях;

– метод параметризации застройки в стандартной гауссовой модели МАГАТЭ применительно к расчету характеристик рассеяния радионуклидов в окрестности АЭС;

– метод, результаты и погрешности расчета максимальных значений факторов разбавления/осаждения высокой процентной обеспеченности (до 99.5%), закладываемых в проектные решения по безопасности АЭС.

Достоверность результатов определяется использованием современных методов численного моделирования атмосферных процессов, обоснованием точности получаемых результатов на основе многоступенчатого тестирования алгоритмов, а также результатами верификации на экспериментальном материале.

Достоверность работы подтверждена результатами экспертизы реализующих разработанные методы программных средств в НТЦ ЯРБ при Ростехнадзоре РФ, в частности:

- ПС "RiskZone v.1.0" (аттестационный паспорт № 368 от 18.03.2015 г.);

- ПС «ДОЗА 3.0» (аттестационный паспорт № 338 от 12.09.2013 г.).

Апробация результатов. Материалы диссертации докладывались на 15-ти российских и международных конференциях, в частности:

– Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Ядерная, радиационная безопасность и нераспространение» (ЯРБН-2010), (Новоуральск, Россия, 1 – 3.12.2010 г.);

– VII, VIII и IX международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (МНТК-7, 8 и 9) (Подольск, Россия, 17 - 20.05.2011 г., 28 – 31.05.2013 г., 19 – 22 мая 2015 г.);

- Научной конференции «50 лет общегосударственной радиометрической службе» (Обнинск, Россия, 31.05 – 2.06.2011 г.);
- VI международной научной конференции «Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон (ЭКОГИДРОМЕТ-2012)» (Санкт-Петербург, Россия, 2 - 4.07.2012 г.);
- Международной научной конференции «Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании» (Москва, Россия, 17 – 19.10.2012 г.);
- Международной конференции по радиоактивности и радиационной защите (ICRPP) (Мадрид, Испания, 28 - 29.03.2013 г.);
- V международной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов атомной отрасли «КОМАНДА 2013» (Санкт-Петербург, Россия, 3 – 7.06.2013 г.);
- 21-ом симпозиуме по пограничным слоям и турбулентности (AMS 21BLT) (Лидс, Великобритания, 9-13.06.2014 г.);
- IV международной научно-практической конференции "Академическая наука - проблемы и достижения" (Северный Чарльстон, США, 7-8.07.2014 г.);
- IV международной конференции «Современные концепции научных исследований» (Москва, Россия, 25.07.2014 г.);
- VII международной научно-практической конференции «Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке» (Москва, Россия, 29.07.2014 г.);
- X юбилейной российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях» (Москва, Россия, 22 – 25.09.2015 г.);
- Международном совещании «Реализация проектов АЭС нового поколения. Совершенствование реакторных установок. Обращение с РАО и ОЯТ. Техническое обслуживание и ремонт» (Загреб, Хорватия, 11 – 16.09.2012 г.).

Публикации. По теме диссертации имеется 17 публикаций, в том числе 3 работы – в рецензируемых журналах из Перечня ВАК, а также приравняемые к публикациям 2 авторских свидетельства на программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Личный вклад автора состоит в формулировке задач работы, разработке и практической реализации позиций, выносимых на защиту, тестировании и верификации расчетных моделей, а также апробации их применительно к различным объектам.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа изложена на 117 страницах, содержит 17 рисунков, 10 таблиц и список использованной литературы, включающий 78 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности темы диссертационной работы, описываются проблемы, ставятся задачи диссертационного исследования, обосновывается научная новизна полученных результатов, их практическая значимость и определяются положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу существующих моделей распространения газоаerosольных выбросов ОИАЭ в окружающей среде.

В разделе 1.1 рассматриваются критерии и требования к радиационной безопасности АЭС при авариях, установленные действующими международными и российскими нормативными документами, в том числе вероятностные критерии в терминологии радиационного риска для населения. Одним из факторов, определяющих уровень радиационного риска для населения при авариях на АЭС, являются условия распространения выброса, в том числе метеорологические условия (категория устойчивости атмосферы, скорость ветра, осадки), наличие застройки промплощадки, шероховатость подстилающей поверхности, рельеф местности и др.

Атмосфера представляет собой передаточное звено при переходе от технологических рисков к радиационным рискам для населения и, таким образом, важнейшим этапом анализа радиационного риска является расчет вероятности формирования наихудших метеорологических условий рассеяния аварийного выброса.

Важнейшим требованием нормативных документов к обоснованию радиационной безопасности населения при радиационной аварии на атомной станции является учет «наименее благоприятных условий рассеяния выброса, характерных для района размещения АЭС» при оценке доз и рисков для населения (п. 5.4 НП-032-01). В соответствии с подходом, принятым в разделе 4 Руководства МАГАТЭ № 50-SG-S3, разделе 2.1 Методических указаний МПА-98 и US NRC RG 1.145, для анализа радиационных последствий аварий в проектах новых АЭС используются результаты статистической обработки метеоданных района размещения станции.

Для аварий различного класса, приводящих к максимальным радиационным последствиям, осуществляется комплекс расчетов интеграла приземных концентраций радионуклидов и плотности их осадения на почву в различных направлениях на различных расстояниях от точки выброса за период не менее 6 лет с дискретностью 1-3 часа, в результате чего для каждой пространственной точки формируется выборка результатов расчета факторов разбавления/осаждения радиоактивных выбросов. Определяются максимальные на часовом интервале интегралы приземных концентраций и выпадения на почву обеспеченности 99,5 % для проектных аварий и обеспеченности 95 % для запроектных аварий, осредненные по временным интервалам 1, 8, 16 и 24 ч.

На заключительной стадии для наименее благоприятных условий рассеяния выброса рассчитываются дозы радиационного облучения критической группы населения по различным путям воздействия. В случае превышения нормативов и/или целевых дозовых критериев, установленных техническим заданием на АЭС, разрабатываются планы защитных мероприятий для населения, направленные на смягчение радиационных последствий при аварии на АЭС.

В разделе 1.2 приведен обзор существующих моделей переноса и рассеяния примесей в атмосфере.

Широкое распространение на практике в силу своей простоты и прозрачности результатов получила Гауссова модель атмосферной диффузии, рекомендованная к применению признанными международными организациями (ВМО, МАГАТЭ, НКДАР ООН, ВОЗ и др). По форме зависимости концентрации от пространственных координат гауссова модель является, вообще говоря, аналитическим решением полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии с постоянными коэффициентами (скорость ветра и коэффициент турбулентности) для постоянно-действующего приподнятого источника выбросов. Авторы модели (Пэскуилл, Гиффорд) для улучшения совпадения результатов расчетов с экспериментом заменили в этом решении входящие туда теоретические дисперсии рассеяния примеси в различных направлениях, на экспериментальные зависимости, структурированные для различных так называемых «категорий устойчивости Пэскуилла-Гиффорда». Ее преимущество перед другими моделями заключается в простоте, беспрецедентном объеме использованного экспериментального материала и апробирования практически во всех регионах мира.

Гауссова модель рекомендована для расчетов нормативными документами «Руководство МАГАТЭ по безопасности № 50-SG-S3», методикой МХО ИАЭ НТД 38.220.56-84, методическими указаниями МПА-98 и в настоящее время реализована в отечественных и зарубежных расчетных кодах «ДОЗА_М» (НИЦ «Курчатовский институт»), «ВЫБРОС 3.1» (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»), «SULTAN» (АО «ВНИИАЭС»), «GENGAUS» («ГНЦ ИБФ»), «GENII», «PASE», «COSIMA», «AIDA», «BSAVVL version 2.3h» (Fennovoima (Финляндия)) и др.

Тем не менее, методы расчета рассеяния примесей на базе аналитических решений уравнения турбулентной диффузии, в том числе и гауссова модель, применимы лишь для ряда упрощенных ситуаций, в частности, при рассеянии радионуклидов над относительно пологой местностью, без учета таких специфических условий переноса, как рассеяние примеси в произвольном образом конфигурированной застройке.

Нельзя сказать, что за прошедшие после разработки гауссовой модели почти шесть десятилетий не делались попытки смены парадигмы гауссовой модели. Здесь следует упомянуть такие достижения отечественной науки, как модель диффузии М.Е. Берлянда, на основе которой разработан нормативный документ ОНД-86 для расчета максимальных концентраций примеси при

решении практических природоохранных задач нормирования выбросов промышленных предприятий. Однако, эта модель вследствие множества своих собственных недостатков за последние полвека после ее создания, так и не вошла в перечень методик МАГАТЭ, рекомендованных к использованию.

Дальнейшее продвижение в плане совершенствования математических моделей переноса и рассеяния примеси, в том числе и от ядерных объектов, в последние десятилетия было ориентировано, в первую очередь, на лагранжевы модели дальнего переноса, что стало чрезвычайно актуальным после аварий на Чернобыльской АЭС и на АЭС Фукусима.

В настоящее время для анализа радиационных последствий аварий на больших расстояниях от АЭС широко применяются такие компьютерные системы с использованием лагранжева подхода, как ПС «НОСТРАДАМУС» (ИБРАЭ РАН) и ПК «RECCASS NT» (НПО «Тайфун»), КПП «SILAM» (Финляндия). Тем не менее, использование данных ПС при проектировании и на этапе выбора площадки АЭС не представляется возможным, поскольку указанными кодами выполняется расчет на основе конкретных исходных метеоданных, как правило, отсутствующих в этот момент в объеме, достаточном для оценки «наихудших условий рассеяния» высокой обеспеченности (95 и 99,5 %).

Применительно к малым расстояниям от источника выброса (до нескольких километров) в последние два десятилетия вполне успешно использовался программный комплекс Zone (Гаврилов А.С., 1992, 2000), реализующий лагранжеву стохастическую модель переноса радионуклидов совместно с 3D-гидродинамической моделью, учитывающей влияние застройки.

Опыт апробации такого рода «послегауссовых» моделей, показал, однако, что чем выше уровень физико-математического описания процессов переноса и диффузии примесей в тех или иных моделях, тем меньше возможностей их использования в инженерной практике, когда требуется проведение десятков тысяч расчетов для каждого варианта проектного решения с целью последующего обоснованного получения максимальных значений (процентильных оценок) высокого уровня обеспеченности (до 99.5%).

Указанное выше обстоятельство, а также высокий нормативный статус базовой модели МАГАТЭ, указывают на необходимость не полной ее замены, а лишь существенной ее модернизации с привлечением результатов расчетов по моделям более высокого физико-математического уровня описания процессов переноса и рассеяния радионуклидов.

Именно указанные причины и побудили автора настоящего диссертационного исследования поставить указанные выше цель и задачи.

Вторая глава посвящена описанию и верификации модели атмосферного пограничного слоя (АПС), применяемой для расчета статистических характеристик факторов разбавления / осаждения аварийных выбросов АЭС при отсутствии необходимого объема исходных метеоданных.

Для расчета характеристик рассеивающей способности атмосферы МПА-98 предусматривает использование следующих показателей:

- величины скорости и направления ветра в приземном слое,
- данные о температуре (до высот порядка нескольких сотен метров с вертикальным разрешением несколько метров) для последующей оценки градиента температуры, высоты слоя перемешивания, верхней и нижней границ температурных инверсий;
- вертикальные градиенты скорости ветра и температуры в приземном слое для расчета категорий устойчивости Пэквилла-Гиффорда.

Между тем, в достаточном для последующего статистического анализа количестве в настоящее время в приземном слое доступны данные так называемых «стандартных гидрометеорологических наблюдений», включающих лишь данные на одном уровне на метеостанциях. Таким образом, возникает проблема восстановления вертикальной структуры АПС по измерениям на одном уровне, дополненным некоторой доступной косвенной информацией, в качестве которой было предложено (Гаврилов А.С., Мханна А., 2006) использовать данные реанализа атмосферных процессов (архивы данных о температуре, влажности и скорости ветра на стандартных изобарических поверхностях).

В данной работе начатые ранее исследования были продолжены в части, в первую очередь, верификации численной модели атмосферного слоя применительно к поставленной задаче.

В качестве базовой использована упрощенная система уравнений АПС, предполагающая специальное выделение синоптического фона, который должен задаваться отдельно (из данных реанализа) и тем самым учитывать реальные физические процессы в атмосфере.

Что касается компонент скорости ветра, то в качестве фоновых значений этих величин могут быть выбраны значения скорости на верхней границе АПС $U_G, V_G(t)$. Если рассматривать АПС над достаточно однородной подстилающей поверхностью, когда членами, описывающими горизонтальную адвекцию и конвекцию можно пренебречь, уравнения для отклонений $u = U_1 - U_G, v = U_2 - V_G$ запишутся в форме:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_3} K \frac{\partial u}{\partial x_3} + 2\omega_z v \quad (1) \quad \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_3} K \frac{\partial v}{\partial x_3} - 2\omega_z u \quad (2)$$

В отличие от уравнений динамики (1) и (2), где в пределах АПС доминируют, как известно, силы трения, Кориолиса и барического градиента, выделение фона в уравнении теплопроводности оказывается не столь простым, поскольку в различных условиях там могут доминировать различные группы членов. В связи с этим запишем это уравнение следующим образом:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_3} K \frac{\partial \theta}{\partial x_3} + \Psi_\theta, \quad (3)$$

где функция $\Psi_{\theta}(x_1, x_2, x_3, t)$ - совокупность всех остальных членов исходного уравнения, не учитываемых в явной форме.

За исключением радиационных притоков, которыми в первом приближении можно пренебречь, все остальные компоненты Ψ_{θ} обусловлены в значительной степени процессами синоптического масштаба, которые охватывают по вертикали весь атмосферный пограничный слой в целом. Все вышесказанное дает основание в первом приближении пренебречь зависимостью Ψ_{θ} от координат и рассматривать ее лишь как функцию времени:

$$\Psi_{\theta}(t) \equiv \frac{d\tilde{\theta}}{dt} = \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial t}, \quad (4)$$

где осредненное значение потенциальной температуры $\tilde{\theta}(t)$ допустимо определять путем сглаживания рядов соответствующих наблюдений в приземном слое.

В этом случае уравнение (3) можно переписать в специальной форме для отклонений температуры от синоптического фона $\mathcal{G} = \theta - \tilde{\theta}$:

$$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_3} K \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial x_3}. \quad (5)$$

Для использования системы уравнений (1), (2) и (5) в расчетах требуется решить проблему ее замыкания (в данном случае, дать способ расчета коэффициентов турбулентного обмена K) и сформулировать краевые условия.

Для решения проблемы замыкания привлекается система уравнений для вторых одноточечных моментов турбулентных пульсаций (6 для компонентов тензора напряжений Рейнольдса и 3 для турбулентных потоков тепла), которая записывается в равновесном приближении таким образом, чтобы можно было получить аналитическое выражение для коэффициента турбулентности K , в которое входят только средняя кинетическая энергия турбулентности b^2 , σ_3^2 - дисперсия вертикальной компоненты турбулентной пульсации скорости и масштаб турбулентности l .

При этом оказывается достаточным систему (1), (2) и (5) дополнить известным уравнением баланса турбулентной энергии, приближенно полагать $\sigma_3^2 \approx \frac{2}{3} b^2$ (приближение изотропии), а величину l задавать с привлечением известной формулы Блэкедара (Blackadar А.К., 1962).

Для целей восстановления вертикальной структуры АПС решается задача Коши с заданием некоторых фиктивных начальных условий (формируемых на 0 часов каждых суток с использованием данных о температуре по наземной метеостанции и поверхностей 925 и 850 гПа реанализа). В качестве верхних граничных условий используются очевидные для отклонений от фона:

$\mathcal{G} = u = v = b^2 = 0$. Нижнее граничное условие для температуры задается на уровне метеобудки (2 м) по данным метеостанции, а скорость ветра – на уровне флюгера (10 м).

В заключение раздела представлены результаты исследований по тестированию алгоритмов и верификации описанной выше модели АПС.

Всего рассматривались 4 группы тестов. Первые две группы тестов базировались на сопоставлении с аналитическими решениями задачи о строении АПС, которые могут быть получены для постоянных по высоте коэффициентов турбулентного обмена.

Первая группа использует известное аналитическое решение задачи Экмана-Аккерблума - воспроизведение установившегося (стационарного) распределения компонентов вектора ветра в АПС при постоянном коэффициенте турбулентности.

Вторая группа тестов базируется на сопоставлении с известным аналитическим решением задачи о суточных колебаниях для уравнения (5).

Данные группы тестов ориентированы на проверку правильности численной схемы интегрирования уравнения (5). Результаты верификации по этим группам тестов показали, что величины относительных погрешностей для умеренных значений коэффициентов турбулентного обмена (1 и 10 м²/с) оказываются на уровне 1 % или менее. Однако при экстремальных значениях этих величин (50 м²/с) погрешность увеличивается до 3 - 4 %. Причиной этого являются ошибки аппроксимации, связанные с использованием неравномерной расчетной сетки по вертикальной координате.

Следующие две группы тестов ориентированы на верификацию численной модели АПС в целом и опираются, в первую очередь, на сопоставление расчетов категорий устойчивости Пэскуилла-Гиффорда, полученных по модели восстановления структуры АПС, с аналогичными величинами, полученными из структурных и градиентных измерений в специальных наблюдательных программах.

В качестве последних использовались следующие:

- 1) Данные микроструктурных измерений на метеомачте в Венгрии - за период 10 суток с 6 по 16 июля 1997 г. (264 случая).
- 2) Данные градиентных измерений метеостанции, расположенной на территории Кольской АЭС, - за период с 2000 по 2007 годы.

В качестве исходных данных реанализа использовались сформированные на период продолжительности экспериментов на основании свободно распространяемой информации NCEP (Национальный центр по охране окружающей среды США) в сетке географических координат 2.5⁰ x 2.5⁰, с интерполяцией данных в точку нахождения АЭС.

В первой экспериментальной программе сопоставлялись эмпирические и расчетные (с помощью модели восстановления АПС) значения динамической скорости и турбулентного потока тепла. Как оказалось, коэффициент корреляции

расчетных и измеренных значений первой характеристики составил 0.66, а второй - 0.56.

Расчетные и измеренные значения средних величин динамической скорости при этом практически совпадают (0.30 и 0.27 м/с), а их среднеквадратические разности - 0.14 м/с, так что относительная погрешность расчета этой величины для данного эксперимента составляет около 46 %.

Что касается непосредственно используемых в методике МПА-98 категорий устойчивости Пэскуилла-Гиффорда, то данные сравнительных расчетов показали, что предложенный метод в 80 % случаев обеспечивает полное совпадение категорий устойчивости, а в 90 % случаев дает совпадение с учетом попадания в соседние градации.

В третьей главе выполнено обобщение базовой модели МАГАТЭ расчета факторов разбавления аварийных выбросов для учета влияния застройки промплощадки АЭС на основе рекомендаций П4.6 ДВ-98.

Методика ДВ-98 предусматривает упрощенный вариант начального разбавления облака примеси за счет влияния зданий методом так называемого «виртуального источника», когда «выброс по прежнему считается точечным, но сдвинутым на такое расстояние R_0 против ветра, что расчетные концентрации примеси на оси «виртуальной» струи в геометрическом центре источника будут совпадать с реальной...». Основная проблема учета зданий при использовании МПА-98 состоит в построении методики расчета начального разбавления облака примеси в форме стандартных отклонений, для чего требуется привлечь трехмерную гидродинамическую модель обтекания зданий на масштабах промплощадки.

В основу построения алгоритмов расчета активности радионуклидов положена комбинация трехмерной гидротермодинамической модели атмосферного пограничного слоя (ГДМ - модель) и стохастической модели турбулентной диффузии частиц примеси в турбулентной потоке (метод Монте-Карло, МК - модель). Теория вопроса изложена в монографии и ряде других публикаций (Гаврилов А.С. и др., 2000, 2004, 2013). От аналогичных моделей, описанных в литературе и широко применяемых за рубежом для решения прикладных задач, реализованную комбинацию ГДМ+МК моделей отличает их внутренняя согласованность по отношению к расчету вторых односточечных моментов турбулентных пульсаций скорости и лагранжевых характеристик турбулентности. Это дает возможность весьма гибкого построения алгоритмов расчета процессов турбулентной диффузии практически для всех ситуаций, обычно осложняющих расчет загрязнения атмосферы.

На первом этапе, с помощью ГДМ-модели решается задача восстановления пространственной структуры атмосферы на основе любой доступной метеоинформации (метеостанции, посты наблюдения, синоптическая или аэрологическая информация, с возможностью усвоения данных, поступающих по каналам связи в реальном масштабе времени). Модели в этом

случае могут реализовываться в широком спектре вариантов (однородная и неоднородная поверхность, с учетом и без учета зданий), предполагая проведение предварительной настройки моделей на тот или иной тип задачи и имеющийся объем информации. В итоге, рассчитываются и сохраняются в памяти ЭВМ трехмерные поля компонент средней скорости ветра и характеристик турбулентности.

На втором этапе реализуется МК-модель. Для источника антропогенной примеси произвольной пространственно-временной структуры генерируется соответствующее его мощности и режиму работы число траекторий, вдоль которых для каждой из рассматриваемых частиц примеси рассчитывается случайное поле скорости в турбулентном потоке. При этом отслеживается положение частицы в каждый момент времени, моделируются эффекты их взаимодействия с подстилающей поверхностью и зданиями, а в случае необходимости - трансформация примеси за счет процессов вымывания осадками или радиоактивного распада.

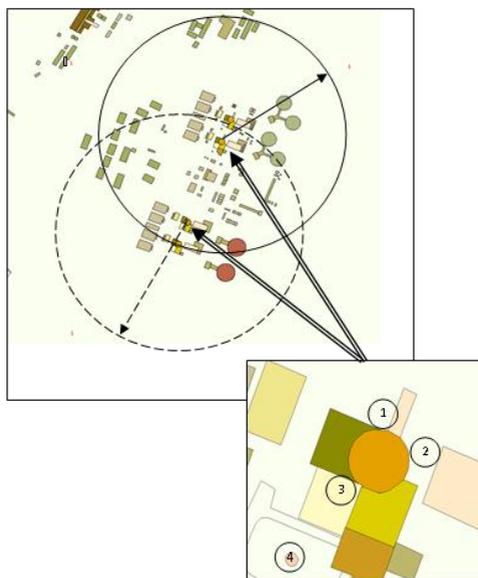


Рисунок 1 - Участок территории ЛАЭС-2. Сплошной линией выделена круговая область с радиусом $R=1000$ м с центром в точке расположения южного реакторного корпуса 1-й очереди ЛАЭС-2, а пунктиром – аналогичная круговая область с центром в точке расположения северного реакторного корпуса 2-й очереди. На врезке показано расположение источников выбросов для реакторов каждой очереди: 1, 2, 3 – кратковременные выбросы на высоте 30 м; 4 – непрерывный и кратковременный выброс на высоте 100 м (вентсистема)

Разработанный метод применен к расчету влияния градиентов на рассеяние радионуклидов в районе размещения Ленинградской атомной станции (ЛАЭС-2) в г. Сосновый Бор Ленинградской области.

На основании статистической обработки количества и координат частиц на заданном удалении R вдоль направления среднего ветра (рисунок 1) производился расчет стандартного отклонения облака частиц примеси $\Sigma_{y,z}(R)$, задающего поправку в гауссову модель турбулентной диффузии радионуклидов. В качестве источника кратковременного выброса рассматривался источник единичной мощности, размещаемый на высотах 30 и 100 м.

В разделе 3.4 третьей главы излагается методика статистической обработки расчетных значений факторов разбавления/осаждения. Проблема здесь состояла, в первую очередь, с необходимостью оценки максимальных значений этих величин с жестко фиксированными уровнями обеспеченности (95 и 99.5%), что переводило процедуру обработки в так называемый диапазон «редких событий» (рисунок 1). При этом был реализован успешный опыт решения подобных задач в прикладной климатологии (Кобышева Н.В., Наровлянский Г.Я., 1978), где сглаживание эмпирической функции распределения производится с использованием известного распределения Вейбула:

$$F(X) = 1 - \exp(-\alpha X^\beta), \quad (6)$$

где значения неизвестных коэффициентов α , β определяются методом наименьших квадратов по эмпирическим значениям функции распределения для каждого сектора ветра и каждого расстояния от источника.

Данная проблема усугублялась тем обстоятельством, что генерируемые в процессе расчетов ряды факторов разбавления/осаждения обладали свойством высокой связности (повторяющиеся значения) за счет, в первую очередь, дискретного характера описания устойчивости атмосферы в методике МПА-98 с использованием категорий устойчивости Пэскуилла-Гиффорда (врожденная особенность любой гауссовой модели).

Второй серьезной проблемой обработки является необходимость получения значений факторов разбавления/осаждения с некоторым временем осреднения, продолжительностью от нескольких часов до нескольких суток (продолжительность утечки радионуклидов аварийного выброса). Осредненные значения факторов оказываются при этом существенно меньше величин с часовым осреднением за счет, в первую очередь, вариаций направления ветра. Для осуществления подобного осреднения на базе исходного расчетного ряда значений факторов был сформирован ряд значений с соответствующим скользящим осреднением.

Для тестирования алгоритмов данного метода обработки был сформирован специальный ряд наблюдений с привлечением датчика случайных чисел с гауссовым распределением, искомые процентиля которого известны из теоретической статистики (том числе и в зависимости от окна сглаживания). Этот

ряд специальным образом округлялся с достижением той степени связности, который демонстрировали ряды расчетных значений факторов разбавления осаждения (примерно 90% повторяющихся значений). Пример сглаживания функции распределения такого рода с использованием (6) приведен на рисунке 2.

Результаты тестирования в зависимости от длины исходного ряда и времени осреднения представлены в Таблице 1.

Как можно видеть из представленных результатов, с увеличением общей длины ряда проявляется весьма медленная сходимость к теоретическому результату. Причиной этого является, как уже отмечалось выше, связность рядов с весьма замедленным возрастанием независимых значений с ростом N. При этом отличие в относительных ошибках для случаев N=20000 и N=50000 оказывается уже незначительным, причем относительные погрешности составляют около 2.5% для процентиля 95 % и 3.0 % для 99.5%. Погрешности расчета процентиля 99.5% монотонно возрастают при сглаживании в результате значительного (более быстрого, чем можно было ожидать вследствие центральной предельной теоремы) убывания стандартных отклонений, которое объясняется, как уже упоминалось выше, использованием скользящего осреднения связных рядов. Это означает, что представленные в Таблице 1 значения ошибок могут рассматриваться как их верхние (консервативные) оценки.

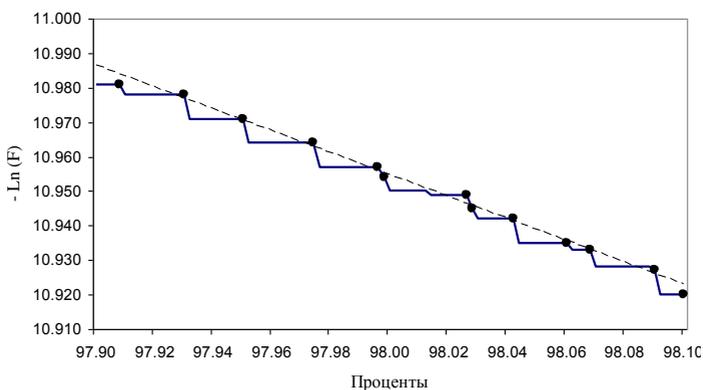


Рисунок 2 - Пример расчета фрагмента функции распределения фактора разбавления F в шкале $[-\ln(F), -\ln(-\ln(1-P))]$, где P – вероятность в долях единицы (оцифровка дана для P, %). Точками выделены «ступеньки» перехода от одного однородного поля значений к другому, а пунктирная линия – линейный тренд по этим точкам. Приведены реальные данные расчетов факторов разбавления по методике МПА-98 с использованием исходных данных градиентной мачты Кольской АЭС за период 2001-2002 гг. (длина ряда N=5000, шероховатость 0.1 м, холодный выброс на высоте 50 м, удаление – 1000 м от источника).

Проведенный анализ убедительно свидетельствует в пользу того, что оптимальной длиной исходного ряда является величина N около 50 тысяч, что соответствует примерно 6-ти летнему ряду ежечасных наблюдений (или 18 лет 8-ми срочных наблюдений на метеостанции).

Таблица 1 – Среднеквадратичные по 16 румбам значения относительных погрешностей расчетных значений процентилей (%) и группировки по румбам (σ - среднеквадратическое отклонение, K_s – полуширина окна сглаживания, E – погрешность группировки по румбам, %)

	N=5000		N=10000		N=20000		N=50000	
Без осреднения								
σ	1		1		1		1	
E	5.7		3.5		2.5		1.4	
K_s	Тест	95 %						
0	1	5.9	4	5.9	7	3.9	10	2.5
2	2	5.9	5	5.7	8	3.9	11	2.5
4	3	5.6	6	5.6	9	3.8	12	2.5
K_s	Тест	99.5 %						
0	13	15.1	16	9.1	19	5.5	22	3.0
2	14	14.6	17	8.3	20	4.5	23	3.2
4	15	14.6	18	8.3	21	4.7	24	3.2
Осреднение 8 ч								
σ_8	0.14		0.14		0.14		0.14	
E	5.05		3.4		2.34		1.33	
K_s	Тест	95 %						
0	25	6.3	28	6.1	31	3.8	34	2.1
2	26	6.3	29	6.1	32	3.8	35	2.0
4	27	6.4	30	6.2	33	3.8	36	2.0
K_s	Тест	99.5 %						
0	37	12.7	40	13.3	43	7.9	46	6.1
2	38	12.6	41	12.4	44	8.3	47	6.1
4	39	12.8	42	12.7	45	8.4	48	6.1
Осреднение 24 ч								
σ_{24}	5.7E-02		5.8E-02		5.7E-02		5.7E-02	
E	2.85		2.4		1.55		0.71	
K_s	Тест	95 %						
0	49	8.3	52	7.2	55	5.3	58	3.7
2	50	8.1	53	7.2	56	5.2	59	3.7
4	51	8.1	54	7.2	57	5.2	60	3.7
K_s	Тест	99.5 %						
0	61	17.7	64	14.7	67	14.5	70	13.4
2	62	17.7	65	14.0	68	14.5	71	13.3
4	63	17.6	66	14.0	69	14.4	72	13.3

На рисунках 2, 3 показаны примеры расчетов максимальных значений фактора разбавления с учетом и без учета застройки по 16 основным румбам ветра для источника в точке № 1 около южного реакторного корпуса первой очереди ЛАЭС-2 с осреднением 1 ч. Из сопоставления результатов расчетов факторов разбавления, рассчитанных с учетом и без учета застройки следует, что ее влияние приводит к значительному (более чем на порядок величины) росту значений фактора разбавления в непосредственной близости к источнику и к снижению этих величин на расстояниях более 3 км от источника почти в два раза.

Причиной такого поведения является увеличение интенсивности турбулентности над промзоной, вызванное влиянием застройки, в результате чего приземный максимум концентрации вне зависимости от характеристик устойчивости атмосферы смещается ближе к источнику выбросов.

Застройка способствует дополнительному рассеянию облака радионуклидов с соответствующим уменьшением уровней радиоактивного воздействия за пределами санитарно-защитной зоны АЭС.

Четвертая глава посвящена разработке и верификации специализированных программных средств (ПС) для расчета параметров рассеяния краткосрочных выбросов и доз для населения при авариях на АЭС.

Необходимость разработки такого рода ПС диктуется необходимостью внедрения изложенных в главах 2 и 3 научных разработок в реальную инженерную практику проектирования АЭС. Порядок внедрения подобных ПС в настоящее время жестко регламентирован нормативными документами Росатома РФ (ОПБ 88/97, РД-03-33-2008, РД-03-34-2000).

В разделе 4.1 представлена информация по ПС “RiskZone v.1.0”, в котором реализованы методические подходы и разработанные численные алгоритмы, изложенные в главах 2 и 3. Выходные данные данного ПС служат входными для ПС “ДОЗА 3.0”, предназначенного для расчета дозовых нагрузок на население и радиационного риска.

Программное средство “RiskZone v.1.0” предназначено для расчета максимальных факторов разбавления/осаждения примесей выбросов радиоактивных веществ при наименее благоприятных условиях рассеяния в атмосфере с определением максимальных значений факторов разбавления/осаждения заданной процентной обеспеченности на определенном временном интервале в зависимости от расстояния и направления выброса. Расчет проводится на основе обработки стандартных гидрометеорологических, либо натуральных градиентных наблюдений, либо синтезированных рядов стандартных гидрометнаблюдений и данных реанализа в соответствии с методикой, изложенной в главе 2.

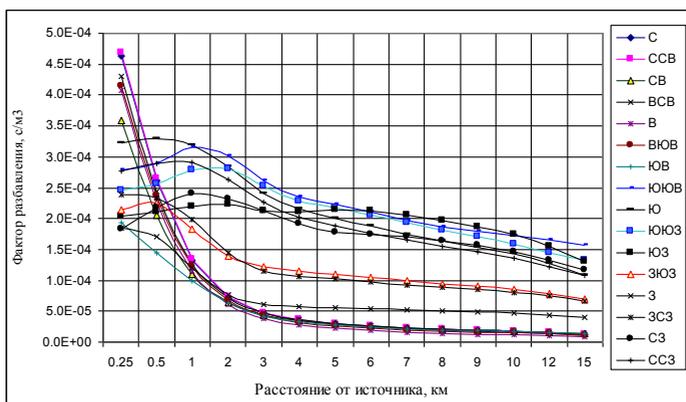
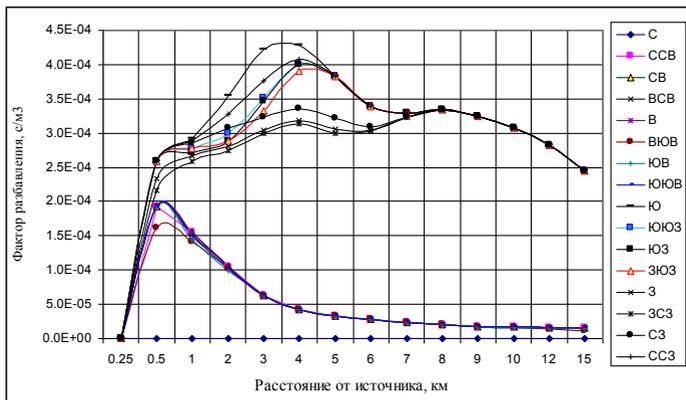


Рисунок 3 – Результаты расчета максимальных значений фактора разбавления обеспеченности 99,5 % с осреднением 1 ч по 16 основным румбам ветра для источника в точке №1 (высота 30 м) около южного реакторного корпуса первой очереди ЛАЭС-2 без учета (наверху) и с учетом застройки промзоны (внизу)

ПС используется при обосновании в составе проекта приемочных критериев радиационной безопасности для населения при авариях на АЭС и зонировании территории района размещения станции в начальный период аварии (до 10 суток).

ПС реализует методику и рекомендации к расчету факторов разбавления/осаждения аварийных выбросов в атмосфере МПА-98, основанную на данных о скорости ветра в приземном слое, процессах очищения атмосферы и предварительно рассчитанных значениях категорий устойчивости Пэсквилла-Гиффорда.

В разделе 4.1.3 кратко представлены результаты применения ПС “RiskZone v.1.0” к расчетам параметров рассеяния аварийных выбросов в районах размещения Ленинградской АЭС-2 и Балтийской АЭС.

В разделе 4.2 излагаются результаты исследования погрешностей расчета факторов разбавления/осаждения с использованием ПС “RiskZone v.1.0”.

Если не брать в расчет собственно неточности закладываемого в методику МПА-98 варианта гауссовой модели (не входило в нашу задачу), то общая погрешность расчета факторов разбавления/осаждения той или иной процентной обеспеченности (Φ) определяется следующими основными факторами:

- инструментальными ошибками в определении скорости ветра на высоте флюгера U ;
- погрешностями расчета категории устойчивости (далее номер K_p от 1 до 7);
- определением уровня шероховатости Z_0 ;
- длиной ряда наблюдений N .

Иначе говоря, справедлива запись:

$$\Phi = \Phi(U, K_p, Z_0, N), \quad (7)$$

или для вариаций:

$$\delta\Phi = \frac{\partial\Phi}{\partial U} \delta U + \frac{\partial\Phi}{\partial K_p} \delta K_p + \frac{\partial\Phi}{\partial Z_0} \delta Z_0 + \frac{\partial\Phi}{\partial N} \delta N \quad (8)$$

Для максимальной относительной погрешности будет в этом случае выполняться следующее неравенство:

$$\left| \frac{\delta\Phi}{\Phi} \right| \leq \left| \frac{\partial \ln \Phi}{\partial U} \delta U \right| + \left| \frac{\partial \ln \Phi}{\partial K_p} \delta K_p \right| + \left| \frac{\partial \ln \Phi}{\partial Z_0} \delta Z_0 \right| + \left| \frac{\partial \ln \Phi}{\partial N} \delta N \right| \quad (9)$$

Для оценки верхнего предела относительной погрешности необходимо, таким образом, в первую очередь оценить чувствительность искомой функции на различных расстояниях от источника к изменениям исходных параметров:

$$D_U = \left| \frac{\partial \ln \Phi}{\partial U} \delta U \right|, \quad D_K = \left| \frac{\partial \ln \Phi}{\partial K_p} \delta K_p \right|, \\ D_Z = \left| \frac{\partial \ln \Phi}{\partial Z_0} \delta Z_0 \right|, \quad D_N = \left| \frac{\partial \ln \Phi}{\partial N} \delta N \right| \quad (10)$$

Для этой цели использовались исходные данные контрольного варианта расчета применительно к проектируемой ЛАЭС-2. Рассчитывались значения фактора разбавления обеспеченности 99.5 % для двух расстояний от источника (1 и 15 км).

При этом для оценки D_U для каждого элемента ряда к значению скорости ветра (используемому непосредственно в формулах МПА-98) добавлялась сгенерированная датчиком гауссовых случайных чисел случайная добавка со стандартным отклонением δU (для точного расчета $\delta U=0$, а для расчета с ошибкой – принималось $\delta U = 0.5$ м), после чего D_U рассчитывалось как разность получаемых значений процентилей.

Для оценки D_K предварительно осуществлялась оценка относительной погрешности расчета процентилей δ_m с искусственным смещением категории устойчивости для каждого элемента ряда на $m = 1, 2, 3$ градаций с последующим использованием формулы:

$$D_K = \sum_1^3 P_m \delta_m, \quad (11)$$

где P_m - вероятности ошибочного определения категории устойчивости со сдвигом на m градаций, определенные ранее на основе верификации модели АПС (глава 2).

Для оценки D_Z последовательно осуществлялся расчет фактора разбавления с обеспеченностью 99.5 % для двух уровней шероховатости: фактического ($Z_0 = 0.2$ м) и смещенного на 0.1 м (относительная погрешность – 50 %).

Погрешность D_N задавалась на основе тестирования, результаты которого представлены в Таблице 1 для процентиля 99.5 %, получаемого без осреднения.

Оказывается, что для фактора разбавления в этом случае:

$$\left| \frac{\delta\Phi}{\Phi} \right| \leq 34 \% \text{ для удаления 1 км, } \left| \frac{\delta\Phi}{\Phi} \right| \leq 47 \% \text{ для удаления 15 км,}$$

а для фактора осаднения:

$$\left| \frac{\delta\Phi_S}{\Phi_S} \right| \leq 32 \% \text{ для удаления 1 км, } \left| \frac{\delta\Phi_S}{\Phi_S} \right| \leq 28 \% \text{ для удаления 15 км.}$$

Таким образом, проведенное исследование показало, что относительная погрешность факторов разбавления (осаднения) процентной обеспеченности 99.5 % во всех случаях не превосходит 47 % (32 %).

ПС “RiskZone v.1.0” успешно прошло экспертизу Совета по аттестации программных средств Научно-технического центра ядерной и радиационной безопасности при Ростехнадзоре РФ (аттестационный паспорт ПС № 368 от 18.03.2015 г.).

В разделе 4.3 представлена краткая информация по ПС «ДОЗА 3.0».

ПС «ДОЗА 3.0» предназначено для расчета среднегодовых индивидуальных доз облучения населения в районе размещения АЭС, обусловленных непрерывным газоаэрозольным выбросом и жидким сбросом в поверхностные воды с АЭС, и доз облучения населения за счет кратковременного аварийного выброса радиоактивных веществ в атмосферу. ПС применяется для обоснования радиационной безопасности проектируемых и действующих АЭС в режимах нормальной эксплуатации, отклонениях от нормальной эксплуатации, проектных и запроектных авариях.

ПС «ДОЗА 3.0» реализует методики НТД 38.220.56-84 и ДВ-98, позволяющие учесть прямые и косвенные пути воздействия возможного «загрязнения» окружающей среды на население. Методики реализуют аналитические соотношения для радиационных параметров, характеризующих загрязнение элементов окружающей среды и дозовые нагрузки на население:

- за счет внешнего облучения от радиоактивного облака и от радионуклидов, осевших на почву;
- за счет внутреннего облучения, обусловленного радионуклидами, поступившими в организм с вдыхаемым воздухом (ингаляционный путь) и в результате их миграции по пищевым/ биологическим цепочкам (пероральный путь). Критический путь загрязнения местной сельхозпродукции соответствует загрязнению растительности и сельхозкормов по стеблевому пути.

ПС «ДОЗА 3.0» рассчитывает эффективную дозу и эквивалентные дозы на отдельные органы и ткани человека в расчетных точках на различном расстоянии от источника радиоактивного выброса для каждого пути облучения.

Для оценки доз используются модели и параметры, рекомендованные НД для анализов радиологического воздействия АЭС на окружающую среду. Дозовые коэффициенты соответствуют данным публикаций МАГАТЭ (Safety Reports Series No.19, Safety Series №115) и МКРЗ (ICRP68, ICRP72) и НРБ-99/2009.

Расчет индивидуальных доз облучения проводится для критической группы населения. При радионуклидном составе выброса, характерном для проектных и запроектных аварий на АЭС за счет ингаляции критической группой оказываются дети в возрасте от 1 года до 2 лет, радиационное воздействие на которых максимально для радиационно-значимых радионуклидов согласно НРБ-99/2009.

ПС «ДОЗА 3.0» верифицировано и успешно прошло экспертизу Совета по аттестации программных средств Научно-технического центра ядерной и радиационной безопасности при Ростехнадзоре РФ (аттестационный паспорт № 338 от 12.09.2013 г.).

В заключении диссертации перечислены основные результаты проведенного исследования:

1. Адаптирована и верифицирована численная модель атмосферного пограничного слоя для решения задачи восстановления его вертикальной структуры на основе измерений на метеостанции и данных реанализа атмосферных процессов на стандартных изобарических поверхностях.
2. На основе обобщения методики МПА-98, реализующей отечественный норматив базовой модели МАГАТЭ, на случай учета влияния застройки промплощадки на рассеяние радионуклидов, показано, что ее влияние приводит к значительному (более чем на порядок величины) росту значений фактора разбавления в непосредственной близости к источнику и к снижению этих величин на расстояниях более 3 км от источника почти в два раза.
3. Разработан и реализован метод статистической обработки расчетных характеристик разбавления/осаждения радионуклидов, позволяющий получать максимальные значения этих величин высокой процентной обеспеченности (до 99.5%).
4. На основе анализа чувствительности результатов расчета факторов разбавления/осаждения радионуклидов к погрешностям в исходных показателях, что погрешности расчета их максимальных значений не превышают 50 %.

Публикации соискателя по теме диссертации

В изданиях из перечня ВАК

1. Гаврилов А.С., Мханна А., Харченко Е.В. Верификация модели атмосферного пограничного слоя применительно к задачам прогноза загрязнения атмосферы от очагов лесных пожаров. - Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – СПб: РГГМУ, 2013. - №32. С. 119-129.

2. Гаврилов А.С., Харченко Е.В., Донг Н.Ф., Хи Н.Д. Управление рисками при авариях на атомных электростанциях с использованием математических моделей переноса и рассеяния нуклидов в атмосфере. Естественные и технические науки. – 2015. - №3. С. 247-250.

3. Баранова М.Е., Гаврилов А.С., Харченко Е.В. Метод учета застройки в задаче переноса и рассеяния в атмосфере нуклидов от аварийных выбросов АЭС - Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – СПб: РГГМУ, 2015. - №40. С. 214-221.

В других изданиях

1. Гаврилов А.С., Безлепкин В.В., Карасева М.А., Фролов А.С., Харченко Е.В. Перспективный метод определения параметров рассеяния выбросов в атмосфере при оценке радиационных последствий аварий на АЭС. Ядерная и радиационная безопасность России. - М., ГК "Росатом", 2014. - Вып. 16. С. 117-128.

2. Карасева М.А., Фролов А.С., Харченко Е.В. Зонирование территории вокруг Балтийской АЭС. Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Ядерная, радиационная безопасность и нераспространение» (ЯРБН-2010). – Новоуральск: Новоуральский технологический институт НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 70–73.

3. Гаврилов А.С., Карасева М.А., Харченко Е.В. Обобщение методики МПА-98 на случай учета застройки и ее реализация применительно к исследованию условий радиоактивного загрязнения местности в окрестности проектируемой ЛАЭС-2. - Материалы VI международной научной конференции «Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон» (ЭКОГИДРОМЕТ-2012). – СПб: РГГМУ, 2012. – С. 67-68.

4. Гаврилов А.С., Карасева М.А., Лебедев Л.Э., Фролов А.С., Харченко Е.В. Современные подходы к определению параметров рассеяния выбросов в атмосфере при оценке радиационного воздействия АЭС на население и окружающую среду (на примере сооружаемой Балтийской АЭС). Научное издание. Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании. – Москва: ФГБОУ ВПО «МГСУ», 2012. – С. 175-180.

5. Bezlepkin V., Karaseva M., Frolov A., Kharchenko E., Lebedev L. Radiation safety of population in the region of NPP-2006/MIR-1200 site. International conference on radioactivity and radiation protection (ICRPP). World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET). – Madrid: WASET, 2013. – Issue 75 March 2013 Madrid. P. 1428-1430.

6. Gavrilov A.S., Bezlepkin V.V., Karaseva M.A., Frolov A.S., Kharchenko E.V. A perspective method for Pasquill-Gifford atmospheric stability classes calculation based on PBL-model. Proceedings of the 21st symposium on boundary layers and turbulence (AMS 21BLT). American meteorological society, 2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ams.confex.com/ams/21BLT/webprogram/Paper247596.html>.

7. Bezlepkin V., Frolov A., Kharchenko E., Lebedev L. Restriction of iodine release under severe accident conditions at NPP MIR.1200. International conference on radioactivity and radiation protection (ICRPP). – Madrid: WASET, 2013. – Issue 75 March 2013 Madrid. P. 1424-1427.

8. Gavrilov A.S., Kharchenko E.V., Ngo D.H., Nguen F.D. Radiation exposure risk assessment for population in case of accidents at NPP using planetary boundary layer model. –Proceedings of the IV International conference "Academic Science – problems and achievements". - North Charleston, USA, 2014. – Vol. 3. P. 197-200.

9. Gavrilov A.S., Kharchenko E.V. Method for the Pasquill-Gifford atmospheric stability classes calculation using a planetary boundary layer model. - IV международная научно-практическая конференция «Современные концепции научных исследований». Часть 4. Москва. 25 июля 2014. Физико-математические науки. Технические науки. – Москва, 2014. - С. 37-38.

10. Gavrilov A.S., Kharchenko E.V. The planetary boundary layer model providing data for NPP operation risk calculation. - Материалы VII международной научно-практической конференции «Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке». - Москва, 2014.

Авторские свидетельства на программы для ЭВМ

1. ПС “RiskZone v.1.0”. Авторы: Гаврилов А.С., Баранова М.Е., Карасева М.А., Фролов А.С., Харченко Е.В. Свидетельство о государственной регистрации № 2015611710 от 04.02.2015 г. Аттестационный паспорт № 368 от 18.03.2015 г.

2. ПС «ДОЗА 3.0» Авторы: Карасева М.А., Харченко Е.В., Фролов А.С., Майданова Н.Е., Апухтина Е.И. Свидетельство о государственной регистрации № 2014617969 от 07.08.2014 г. Аттестационный паспорт № 338 от 12.09.2013 г.