

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*

**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

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

**НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ –**  
доктор физико-математических наук,  
профессор ГАВРИЛОВ А.С.

Санкт-Петербург

2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>РАЗДЕЛ 1 МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГАЗОАЭРОЗОЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ АЭС В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ.....</b>	<b>11</b>
1.1 Критерии и требования к радиационной безопасности АЭС при авариях.....	11
1.1.1 Постановка вопроса.....	11
1.1.2 Системный детерминистский анализ .....	11
1.1.3 Вероятностная оценка безопасности .....	12
1.1.4 Методы детерминистического и вероятностного анализа .....	14
1.1.5 Целевые вероятностные критерии безопасности новых энергоблоков АЭС....	15
1.1.6 Основные принципы управления рисками при авариях на этапе проектирования АЭС .....	15
1.2 Обзор моделей переноса и рассеяния радионуклидов в атмосфере .....	17
1.2.1 Гауссова модель .....	19
1.2.2 Лагранжевы стохастические модели.....	25
1.3 Реализация моделей переноса и рассеяния радионуклидов в программных кодах .....	27
1.3.1 ПС для расчета распространения радионуклидов в ближней зоне.....	27
1.3.2 Реализация моделей дальнего переноса в ПС .....	28
1.4 Выводы .....	36
<b>РАЗДЕЛ 2 МОДЕЛЬ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ .....</b>	<b>37</b>
2.1 Исходные уравнения .....	38
2.2 Система уравнений суточных колебаний .....	39
2.3 Метод замыкания системы уравнений суточных колебаний .....	41
2.4 Краевые условия.....	46
2.5 Численная схема .....	48
2.6 Верификация модели АПС.....	50
2.7 Вывод.....	60

<b>РАЗДЕЛ 3 ОБОБЩЕНИЕ БАЗОВОЙ МОДЕЛИ МАГАТЭ РАСЧЕТА ФАКТОРОВ РАЗБАВЛЕНИЯ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ ДЛЯ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ЗАСТРОЙКИ ПРОМПЛОЩАДКИ АЭС.....</b>	<b>61</b>
3.1 Общие формулы расчета факторов разбавления/осаждения выбросов в МПА-98 .....	61
3.2 Обобщение методики МПА-98 на случай учета застройки.....	66
3.3 Результаты исследования влияния застройки промплощадки на рассеяние кратковременных выбросов Ленинградской АЭС-2.....	69
3.4 Статистическая обработка расчетных значений факторов разбавления и осаждения.....	75
3.5 Выводы .....	81
<b>РАЗДЕЛ 4 РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ РАССЕЯНИЯ ВЫБРОСОВ И ДОЗ ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ ПРИ АВАРИЯХ НА АЭС.....</b>	<b>82</b>
4.1 Разработка и верификация ПС “RiskZone v.1.0” для расчета факторов разбавления/осаждения аварийных выбросов АЭС.....	82
4.1.1 Назначение ПС “RiskZone v.1.0” .....	83
4.1.2 Модули ПС “RiskZone v.1.0” .....	84
4.2 Погрешность результатов расчета ПС “RiskZone v.1.0” .....	88
4.3 ПС «ДОЗА 3.0» для расчета доз для населения от газоаэрозольных выбросов АЭС.....	91
4.3.1 Назначение ПС «ДОЗА 3.0».....	91
4.3.2 Модули ПС «ДОЗА 3.0» .....	93
4.3.3 Методика расчета .....	93
4.3.4 Верификация и применение ПС «ДОЗА 3.0» для расчета дозовых нагрузок на население в случае запроектной аварии на Балтийской АЭС и Ленинградской АЭС-2.....	103
4.3.5 Оценка рисков.....	105
4.3.6 Выводы .....	107
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>108</b>
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....</b>	<b>109</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>110</b>

## ВВЕДЕНИЕ

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) [1] и российских НД (п. 5.4 НП-032-01 [2]) 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» [3], МХО ИАЭ НТД 38.220.56-84 [4, 5], в методических указаниях МПА-98 [6]. Алгоритмы такого рода модификаций реализованы в программных средствах (ПС) «ДОЗА\_М» (НИЦ «Курчатовский институт») [7], «ВЫБРОС 3.1» (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ») [8], «SULTAN» (АО «ВНИИАЭС») [9], «GENGAUS» («ГНЦ ИБФ»), а также в зарубежных программных средствах «GENII» [10], «PACE», «COSIMA», «AIDA» [11] 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) [12] и ПК «RECASS NT» (НПО «Тайфун») [13], 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) [14, 15].

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.

**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 (Пэскуилл, 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 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 удастся 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 предварительных отчетов по обоснованию безопасности (ПООБ) 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 ПС № 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 приравниваемые 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.

## РАЗДЕЛ 1 МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГАЗОАЭРОЗОЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ АЭС В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

### 1.1 Критерии и требования к радиационной безопасности АЭС при авариях

#### 1.1.1 Постановка вопроса

Согласно ОСПОРБ 99/2010 [16] атомная электростанция (АЭС) - радиационный объект (РО) 1-й категории по потенциальной радиационной опасности. Аварийные планы защиты населения в случае ядерной или радиационной аварии на АЭС разрабатываются в составе проекта с учетом требований действующих СНиП 2.01.51 – 90 (инженерно-технические мероприятия гражданской обороны) [17] для объектов 1 категории радиационной опасности. Аварийные планы включают обеспечение готовности проведения защитных мероприятий в зоне возможного разрушения станции и сильного радиоактивного загрязнения территории.

Важнейшим этапом разработки такого рода проектных решений является исследование потенциально возможных аварийных ситуаций. Аварийная ситуация (авария) характеризуется исходным событием, путями развития и последствиями. Ниже рассмотрены различные подходы к анализу путей развития аварий: *вероятностный* и *детерминистский*. В процессе такого анализа для различных исходных событий рассматриваются возможные зависимые и независимые отказы устройств безопасности, ошибки персонала с целью проследить сценарий развития аварий и определить достаточность или необходимость принятия дополнительных организационно-технических мер для приведения АЭС в конечное безопасное состояние.

#### 1.1.2 Системный детерминистский анализ

Под детерминистским подходом к проектированию АЭС и анализу ее безопасности понимается подход, базирующийся на системе правил и требований, сформулированных на основе опыта проектирования и эксплуатации АЭС, закрепленных в нормативной документации. В сложившейся практике проектирования важнейшим элементом детерминистского подхода является *принцип единичного отказа*, в соответствии с которым разрабатывается перечень проектных аварий.

Анализ системы на соответствие принципу единичного отказа начинается с определения полного перечня исходных событий, рассматриваемых при обосновании безопасности АЭС. В качестве исходного события должно рассматриваться любое, но только единичное нарушение: отказ в системах, внешнее воздействие, ошибочное действие персонала. Возникновение дополнительного исходного события во время протекания аварийной ситуации до окончательного выполнения системами безопасности своих функций не должно учитываться. В то же время, все зависимые от исходного события нарушения на АЭС являются составной частью рассматриваемого исходного события. Согласно действующим НД (ОПБ 88/97 [18]) наряду с исходным событием при анализе аварийной ситуации должен рассматриваться независимый от исходного события дополнительный отказ активного устройства безопасности или пассивного устройства, имеющего механические движущиеся части.

Системное рассмотрение аварий позволяет выявить критические пути их развития (например, по наименьшему числу отказов, приводящих к неблагоприятным последствиям), уяснить и проанализировать взаимосвязь различных систем, участвующих в обеспечении безопасности, роль и значение персонала в осуществлении защитных мер, выявить возможные отказы по общей причине, «глубину» обеспечения безопасности АЭС. Выделение важных систем и компонентов, наиболее значимых ошибок имеет большое значение для совершенствования проекта и для подготовки персонала.

### **1.1.3 Вероятностная оценка безопасности**

Детерминистский подход способен охватить многие вопросы анализа и обоснования безопасности АЭС. В то же время остается ряд принципиальных затруднений.

Во-первых, стремление выделить критические пути развития аварий в рамках детерминистского системного анализа приводит к необходимости сопоставления путей, характеризующихся различным количеством отказов активных устройств, пассивных устройств, ошибок персонала, т. е. к необходимости количественного сравнения при отсутствии единой меры осуществимости (меры возможности) аварий. Даже два однотипных устройства, имеющих одинаковое назначение, могут существенно

различаться по частоте отказов вследствие особенностей конструкции, технологии изготовления, условий эксплуатации.

Во-вторых, в рамках детерминистского анализа возможно рассмотрение только полностью зависимых систем (устройств), когда отказ одной системы неизбежно приводит к отказу другой. В то же время имеют место ситуации, когда несколько однотипных устройств могут отказать по общей причине, а могут и не отказать, т. е. когда зависимые отказы являются случайными событиями.

Перечисленные обстоятельства с неизбежностью требуют привлечения вероятностных методов, где вероятность выступает единой мерой возможности осуществления различных событий.

Вероятностная оценка безопасности представляет собой системный анализ причин возникновения, всевозможных путей развития и последствий аварий на АЭС с использованием широкого спектра физических, теплотехнических методов, методов анализа прочности конструкций, механики разрушения и ряда других, дополненных анализом надежности средств обеспечения безопасности и вероятностной оценкой развития событий. Последствия аварий для окружающей среды определяются выбросом радиоактивных продуктов за пределы АЭС и вероятностью реализации различных метеорологических условий распространения выброса.

Вероятностный анализ безопасности (ВАБ) объекта использования атомной энергии (ОИАЭ) на основе методов деревьев отказов и деревьев событий выполняется в 3 этапа:

ВАБ уровня 1 (ВАБ-1) включает проведение анализа аварийных процессов, которые могут привести к повреждению объектов, содержащих ядерное топливо и радиоактивные вещества, в частности, к плавлению (разрушению) активной зоны реактора, основных причин разрушения и частоты их возникновения [19].

ВАБ уровня 2 (ВАБ-2) предусматривает анализ состояний с повреждением станции, моделирование системы локализации, определение состава и объема выбросов радиоактивных веществ в окружающую среду, оценку частоты событий [20]. Определяются возможные виды отказа защитной оболочки (ЗО) и время его возникновения после разрушения зоны. Рассматриваются процессы выделения радиоактивных продуктов из топлива, распространения их в пределах ЗО и выхода за предусмотренные границы локализации. Результатом анализа является вероятностное

распределение выбросов с различным количеством радиоактивных продуктов в окружающую среду.

В процессе выполнения ВАБ уровня 3 (ВАБ-3) анализируется распространение радионуклидов в окружающей среде, их рассеяние в атмосфере и радиационное воздействие на население (рассчитываются дозы облучения), оцениваются комплексные показатели безопасности.

#### **1.1.4 Методы детерминистического и вероятностного анализа**

В общем случае рекомендовано, чтобы детерминистский анализ для целей проектирования был консервативным [21]. Анализ запроектных аварий (ЗПА), как правило, менее консервативен, чем анализ проектных аварий (ПА) (п. 1.2.16 [18]). С помощью ВАБ должны быть выявлены все значимые вкладчики в риск от АЭС и дана оценка тому, хорошо ли сбалансирована конфигурация станционных систем, отсутствуют ли непропорционально большие вкладчики в риск, удовлетворяет ли проект основным вероятностным критериям безопасности.

Таким образом, вероятностная оценка безопасности предполагает наряду с оценкой последствий аварий определение частоты их возникновения и, соответственно, некоторой характеристики, учитывающей оба указанных фактора. В качестве такой характеристики используется риск.

##### Радиационный риск

**Риск от АЭС** - это мера потенциальной опасности атомной станции, выраженная вероятностным распределением последствий потенциально возможных аварий на АЭС или некоторым параметром указанного распределения.

Согласно НРБ 99/2009 **радиационный риск** – вероятность возникновения у человека или его потомства какого-либо вредного эффекта в результате облучения [22]. Нормативные документы регламентируют требования к планированию защитных мер для населения при авариях на АЭС, связанных с радиационными последствиями, и оценке радиационного риска для населения при нормальной эксплуатации (НЭ), возможных нарушениях НЭ и авариях [22 – 24].

Радиационный риск для населения при авариях на АЭС определяют следующие основные факторы:

- интенсивность выбросов радиоактивных веществ в окружающую среду, радионуклидный состав выбросов и физико-химическая форма радионуклидов,
- условия распространения выброса (высота источника, метеорологические условия, застройка промплощадки, шероховатость и рельеф местности и др.),
- вероятности воздействия радионуклидов на население в результате облучения.

При проведении ВАБ количественный показатель - не единственный результат. ВАБ необходим для сопоставления уровней безопасности различных АЭС, а также ядерной и неядерной технологий. Первоочередная задача ВАБ - на основе системного количественного анализа причин и последствий аварий выявить слабые места проекта; разработать систему технических, организационных и эргономических мероприятий повышения безопасности в разумно достижимых пределах; расставить приоритеты в проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

### **1.1.5 Целевые вероятностные критерии безопасности новых энергоблоков АЭС**

В соответствии с действующими международными рекомендациями [25] для новых энергоблоков суммарная по всем аварийным последовательностям частота тяжелого повреждения активной зоны не должна превышать  $10^{-6}$  1/реактор в год (согласно п. 4.2.2 ОПБ 88/97 -  $10^{-5}$  1/реактор в год [18]).

В целях исключения необходимости эвакуации населения за пределами зоны планирования защитных мероприятий, устанавливаемой в соответствии с нормативными требованиями к размещению АЭС, следует стремиться к тому, чтобы оцененное значение вероятности установленного этими требованиями предельного аварийного выброса не превышало  $10^{-7}$  1/реактор в год (п. 1.2.17 ОПБ-88/97 [18]).

### **1.1.6 Основные принципы управления рисками при авариях на этапе проектирования АЭС**

При нарушениях НЭ и авариях на энергоблоке величины выбросов радиоактивных веществ в окружающую среду зависят от следующих факторов:

- степени повреждения топливных элементов,
- степени повреждения контура теплоносителя,

- эффективности систем локализации.

Для конкретного перечня исходных событий (деревьев отказов) проектировщиками на основе различных моделей технологических процессов анализируются сценарии развития аварий (деревья событий), выполняется расчет вероятностей реализации конечных аварийных состояний и оцениваются суммарные выбросы радиационно значимых радионуклидов в атмосферу. Выбросы группируются по категориям аварийных выбросов. Для дальнейшей оценки дозовых нагрузок на население в проекте АЭС выделяются сценарии аварий, приводящие к максимальным радиационным последствиям для населения.

Применительно к ландшафту и метеоусловиям района размещения промышленной площадки АЭС разработчиками математических моделей адаптируются или разрабатываются вновь численные модели переноса, рассеяния и трансформации радионуклидов в атмосфере.

Согласно рекомендациям МАГАТЭ (раздел 2 [1]) и российских НД (п. 5.4 НП-032-01 [2]) оценка радиационной обстановки для проектных и запроектных аварий на АЭС должна выполняться для наименее благоприятных метеорологических условий, характерных для района размещения АЭС.

Для аварий различного класса, приводящих к максимальным радиационным последствиям, осуществляется комплекс расчетов интеграла приземных концентраций радионуклидов и плотности их осаждения 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.

В качестве «**наихудших условий рассеяния выброса**» в соответствии с подходом, принятым в разделе 4 [3], разделе 2.1 [6] и [26], для анализа радиационных последствий аварий в проектах новых АЭС используются результаты статистической обработки метеоданных района размещения станции, 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 в атмосфере рассчитываются дозы радиационного облучения критической



группы населения по различным путям воздействия. В случае превышения нормативов и целевых дозовых критериев, установленных техническим заданием на АЭС, разрабатываются дополнительные проектные решения для смягчения радиационных последствий при аварии на АЭС.

Атмосфера представляет собой передаточное звено при переходе от технологических рисков к радиационным рискам для населения (Рисунок 1-1), и таким образом, важнейшим этапом анализа радиационного риска является расчет вероятности формирования наихудших метеорологических условий рассеяния аварийного выброса.

## **1.2 Обзор моделей переноса и рассеяния радионуклидов в атмосфере**

В последние десятилетия достигнут весьма значительный прогресс в области математического моделирования сложных технических и природных объектов в целом и в охране окружающей среды в частности.

Ниже на Рисунке 1-2 представлена приблизительная классификация используемых в мировой практике математических моделей расчета переноса и рассеяния примесей в атмосфере [27].

Если не касаться такой специфической области, как эмпирико-статистическое моделирование, с помощью которого оказывается затруднительным воспроизведение пространственных полей скорости ветра и температуры, из всего имеющегося перечня подходов для решения задачи рассеяния радионуклидов в атмосфере наилучшими являются 3D-модели, основанные на привлечении полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии и модели на основе лагранжевого описания.



Рисунок 1-1 - Атмосфера – передаточное звено от технологических рисков к радиационным рискам для населения

### 1.2.1 Гауссова модель

Полуэмпирическое уравнение турбулентной диффузии – следствие закона сохранения массы некоторой газообразной примеси со средней объемной концентрацией  $\bar{q}(x_1, x_2, x_3)$  в турбулентной атмосфере с заданными полями компонентов вектора средней скорости ветра  $\bar{u}_\alpha(x_1, x_2, x_3, t)$ :

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{q} \bar{u}_\alpha}{\partial x_\alpha} = - \frac{\partial \overline{q' u'_\alpha}}{\partial x_\alpha} + F, \quad (1.1)$$

где второй член в левой части описывает упорядоченный перенос примеси, а правая часть – процесс турбулентной диффузии, функция  $F$  – включает все прочие процессы, происходящие с примесью в атмосфере (в том числе выброс источника). Уравнение (1.1) записано в системе декартовых координат  $(x_1, x_2, x_3)$ , черта сверху – знак осреднения, штрих – турбулентная флуктуация, а по повторяющемуся греческому индексу предполагается суммирование.

Полученное уравнение содержит неизвестную величину – вектор турбулентного потока примеси с компонентами  $\overline{u'_\alpha q'}$ . Иначе говоря, осредненное уравнение переноса оказывается незамкнутым.

К числу наиболее распространенных способов замыкания такого рода осредненных уравнений относится представление неизвестных турбулентных потоков с использованием концепции коэффициентов турбулентного обмена (так называемая «К-теория»). Основу ее составляют, как известно, существующие аналогии между турбулентным и молекулярным переносом импульса, тепла и примеси.

В отличие от последнего, где коэффициенты переноса представляют собой скалярные величины, определяемые свойствами соответствующих газов или жидкостей, коэффициенты турбулентного обмена имеют тензорную природу, варьируют в широких пределах и зависят от особенностей протекания того или иного процесса.



Рисунок 1-2 – Общая схема классификации методов математического моделирования распространения примесей в атмосфере (по [27])

В рамках данного приближения для вектора потока принимается следующее соотношение:

$$\overline{u'_i q'} = -K_{\alpha\beta} \frac{\partial \bar{q}}{\partial x_\beta}, \quad (1.2)$$

где  $K_{\alpha\beta}$  – тензор коэффициента турбулентного обмена для соответствующей примеси. Уравнение (1.1), переписанное с учетом (1.2) в форме

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{q} \bar{u}_\alpha}{\partial x_\alpha} = \frac{\partial}{\partial x_\alpha} k_{\alpha\beta} \frac{\partial \bar{q}}{\partial x_\beta} + F, \quad (1.3)$$

известно в литературе как «полуэмпирическое уравнение турбулентной диффузии».

Термин «полуэмпирическое» означает, что в отличие от фундаментального уравнения сохранения массы типа (1.1), данное уравнение получено с использованием гипотезы (1.2), которая может оказаться справедливой не во всех случаях, а уравнение (1.3), следовательно, не всегда будет точным следствием законов сохранения. Оно также является незамкнутым, поскольку в общем случае компоненты  $K_{ij}$  – неизвестны.

Полагая в (1.3) величину концентрации примеси равной константе и, соответственно,  $F=0$ , это уравнение может быть переписано в форме так называемого «уравнения несжимаемости»:

$$\frac{\partial \bar{u}_\alpha}{\partial x_\alpha} = 0 \quad (1.4)$$

Проводя дифференцирование второго члена в правой части (1.3) и учитывая (1.4), уравнение (1.1) может быть переписано в несколько иной форме, известной в научной литературе как «градиентная» форма полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии:

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \bar{u}_\alpha \frac{\partial \bar{q}}{\partial x_\alpha} = \frac{\partial}{\partial x_\alpha} k_{\alpha\beta} \frac{\partial \bar{q}}{\partial x_\beta} + F. \quad (1.5)$$

В последние десятилетия делалось множество попыток построить те или иные модели расчета компонент тензора  $K_{ij}$  [28], однако успех здесь был достигнут лишь для некоторых упрощенных ситуаций, таких, например, как задача о переносе и рассеянии примесей в условиях однородного по горизонтали атмосферного

пограничного слоя, когда для тензора  $K_{ij}$ , исходя из условий симметрии, справедлива следующая запись:

$$K_{ij} = \begin{pmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{pmatrix}, \quad (1.6)$$

где для специальной системы декартовых координат  $(x, y, z)$  с осью  $x$ , направленной вдоль приземного ветра,  $y$  – в поперечном ветру направлении, а  $z$  – вертикально вверх, компоненты  $K_x, K_y, K_z$  представляют собой коэффициенты турбулентной диффузии для соответствующих направлений.

Если рассмотреть стационарный источник выбросов загрязняющих веществ в атмосферу мощностью  $Q$ , расположенный в точке с координатами  $(0, 0, h)$ , то в потоке воздуха с модулем скорости ветра  $U(z)$  в описанной выше специальной системе координат уравнение (3) переписывается в следующем виде:

$$\frac{\partial U\bar{q}}{\partial x} + \frac{\partial W\bar{q}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial \bar{q}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial \bar{q}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial \bar{q}}{\partial z} + Q\delta(0,0,z-h), \quad (1.7)$$

где  $\delta$  – функция Дирака. Существенно, что в горизонтально-однородном пограничном слое компоненты средней скорости ветра не зависят от горизонтальных координат, при этом из (1.4) следует:

$$\frac{\partial W}{\partial z} = 0. \quad (1.8)$$

Учитывая, что подстилающая поверхность в общем случае является непроницаемой для потока воздуха, и, следовательно,  $W(0) = 0$ , из последнего соотношения вытекает, что величина средней вертикальной скорости во всем слое воздуха будет равна нулю:  $W(z) = 0$ .

Уравнение (1.7) может быть еще более упрощено. Наиболее распространенным в практике является предположение о том, что упорядоченный перенос примеси вдоль направления ветра много больше, чем турбулентный:

$$U\bar{q} \gg \left| K_x \frac{\partial \bar{q}}{\partial x} \right|, \quad (1.9)$$

справедливое, вообще говоря, для условий достаточно большой скорости ветра ( $U > 2$  м/с). Если теперь ввести в рассмотрение область за пределами расположения источника выбросов ( $x > 0$ ), то (1.7) может быть переписано в следующей простой форме, которая повсеместно используется в приложениях:

$$\frac{\partial U\bar{q}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial \bar{q}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial \bar{q}}{\partial z}. \quad (1.10)$$

В качестве граничных условий для интегрирования данного уравнения используются следующие:

- при  $x > 0 \int_0^{\infty} dz \int_0^{\infty} U\bar{q} dy = Q$ ,
- при  $y \rightarrow \pm\infty \bar{q} \rightarrow 0$ ,
- при  $z \rightarrow \infty \bar{q} \rightarrow 0$ ,
- при  $z=0 \frac{\partial \bar{q}}{\partial z} = 0$  («условие отражения»).

Уравнение (1.10) с вышеприведенными граничными условиями при постоянных коэффициентах  $U$ ,  $K_y$ ,  $K_z$  имеет аналитическое решение:

$$\bar{q}(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[ \exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right], \quad (1.11)$$

где  $\sigma_y^2 = 2K_y x/U$ ,  $\sigma_z^2 = 2K_z x/U$  – дисперсии поперечного и вертикального рассеяния факела примеси ( $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  соответственно, стандартные отклонения).

Уже первые эксперименты в атмосфере по изучению распространения примесей от приподнятых точечных источников показали, что в отличие от получаемых из (1.11) асимптотик поведения стандартных отклонений поперечного и вертикального рассеяния примеси в форме  $\sigma_y \sim \sigma_z \sim x^{1/2}$ , на практике оказывается, что  $\sigma_y \sim \sigma_z \sim x$ . Анализ показал, что данный эффект является следствием гипотезы (1.2) и, таким образом, оказывается «родовым» признаком полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии. По мере расширения факела примеси при удалении от источника в процесс рассеяния втягиваются турбулентные вихри все увеличивающихся размеров. Это приводит, по существу, к увеличению с ростом  $x$  коэффициентов турбулентного обмена  $K_y$ ,  $K_z$ , что переводит их из статуса «характеристик среды» в статус «характеристик процесса».

К числу исторически первой системной корректировки применения уравнения (1.3) для решения практических задач относится построение гауссовой модели Пэскуилла – Гиффорда – Бриггса (ПГБ-модели), основанной на использовании формулы (1.11), но с полной заменой теоретических функций  $\sigma_y \sim \sigma_z(x)$  на экспериментальные [29, 30]. Форма этих функций зависит от характеристик

устойчивости атмосферы, задаваемых категориями устойчивости атмосферы: А, В, С (неустойчивая), D (нейтральная), Е, F (устойчивая). Позднее для описания ситуаций очень сильной устойчивости атмосферы была введена дополнительная категория – G.

Гауссова ПГБ-модель атмосферной диффузии нашла широкое распространение на практике в силу своей простоты и прозрачности получения результатов [3 - 6]. За последние десятилетия она многократно модифицировалась применительно к различным регионам и сферам деятельности человека. 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) и др. Ее преимущество перед другими моделями заключается в простоте, беспрецедентном объеме использованного экспериментального материала и апробированности практически во всех регионах мира. Фактически гауссова модель в области ее применимости стала эталонной при сравнительных расчетах по другим моделям диффузии примеси.

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, широко используемые в природоохранной практике многих стран методы расчета загрязнения атмосферы на базе тех или иных аналитических решений уравнений турбулентной диффузии применимы лишь для некоторых упрощенных ситуаций. Они не позволяют точно решать задачи расчета переноса и рассеяния радионуклидов в условиях сложным образом пространственно структурированной промплощадки и источников выбросов АЭС.

Методы численного интегрирования этого уравнения хотя и получили довольно большое распространение в научных исследованиях [31], по-существу,



также не позволяют решать задачи о переносе и рассеянии примеси в районе размещения АЭС, поскольку требуют задания в этом случае всех девяти компонент тензора коэффициента турбулентной диффузии.

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 [32] 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.

### 1.2.2 Лагранжевы стохастические модели

Любые виды антропогенных примесей в атмосфере (газы, твердые или жидкие частицы - аэрозоли), перемещаются в пространстве преимущественно за счет скорости ветра, задаваемой некоторым вектором. В зависимости от того, привязывается ли этот вектор к частице атмосферы или к фиксированной точке пространства различают, соответственно, так называемую "лагранжеву" скорость  $\vec{V}(\vec{x}_0, t)$  (компоненты  $V_1, V_2, V_3$ ) или "эйлерову" -  $\vec{u}(\vec{x}, t)$  (компоненты  $u_1, u_2, u_3$ ), причем  $\vec{x}_0$  в первом случае представляет собой начальную координату данной частицы.

Соотношение между  $\vec{u}$  и  $\vec{V}$  вполне очевидно: скорость частицы  $\vec{V}$  - это скорость  $\vec{u}$  в точке нахождения этой частицы  $\vec{X}$ :

$$\vec{V}(\vec{x}_0, t) = \vec{u}(\vec{x}, t) = \vec{u}(\vec{X}(x_0, t), t). \quad (1.12)$$

Поскольку скорость частицы  $\vec{V}$  есть приращение координаты  $\vec{X}$  в единицу времени, последняя величина должна определяться из следующего дифференциального уравнения:

$$\frac{d\vec{X}}{dt} = \vec{u}(\vec{X}(x_0, t), t), \quad (1.13)$$

которое требуется интегрировать с начальным условием  $\vec{X}(x_0, t_0) = \vec{x}_0$ .

При этом задача расчета концентрации примеси формулируется следующим образом: зная начальные координаты каждой частицы примеси из некоторой их совокупности путем последовательного интегрирования уравнения (1.13) по времени рассчитать их координаты в конечный момент времени. Именно это уравнение определяет поле эйлеровой скорости  $\vec{u}(\vec{x}, t)$ . Начальные координаты частиц задаются, исходя из пространственной конфигурации и временного режима работы каждого источника.

Как отмечалось в [27], несмотря на кажущуюся простоту основного принципа, закладываемого в расчет переноса примеси в атмосфере в моделях этого типа, практическая его реализация оказывается чрезвычайно сложной и неоднозначной. Прежде всего, возникают принципиальные трудности в связи с необходимостью задания векторного поля скорости  $\vec{u}(\vec{x}, t)$ , которое вследствие эффектов турбулентности в атмосфере следует рассматривать в математическом смысле как случайное.

Поскольку поле  $\vec{u}(\vec{x}, t)$  должно удовлетворять уравнениям динамики атмосферы, а его статистические характеристики - согласованы с наблюдениями, конструирование случайного поля скорости для конкретных метеорологических условий оказывается очень непростой задачей. Основные пути ее решения были сформулированы в работах [33 – 35] и завершились созданием общей технологии решения задач переноса и рассеяния примеси в условиях сложно-конфигурированной местности, реализованной в форме экологического программного комплекса «Zone» [36, 37] и известной в литературе как модель «ГДМ+МК».

Задача расчета поля концентрации распадается здесь на две части. Первоначально интегрируется полная система осредненных уравнений

гидродинамики атмосферы (уравнений Рейнольдса) вместе с дополнительными уравнениями для шести независимых компонент тензора напряжений Рейнольдса  $R_{ij} = \langle u_i' u_j' \rangle$ , где угловые скобки - знак осреднения.

Система уравнений динамики интегрируется численно с использованием явных численных схем [38] в равномерной расчетной сетке, размер шага которой выбирается в пределах 1-5 метра в зависимости от решаемой задачи. Здания стилизуются в форме параллелепипедов заданной высоты, причем алгоритм интегрирования позволяет корректно ставить граничные условия на стенах и крышах зданий, а узлы сетки внутри зданий при этом из расчета исключаются.

Задача решается методом установления, причем для области пространства  $2000 \times 2000 \text{ м}^2$  и высотой до 100 м с шагом по пространству 4 м по горизонтали и 2 м по вертикали оказывается достаточным осуществить моделирование на 10 - 15 минут физического времени процесса.

После получения, таким образом, трехмерных полей компонент скорости ветра и характеристик турбулентности далее реализуется стохастическая задача расчета траекторий частиц примеси от источника произвольной формы, число которых выбирается таким образом, чтобы погрешность расчета не превосходила некоторую заданную величину. В процессе расчета подсчитывается число частиц примеси в каждом квадрате сеточной области и, таким образом, рассчитывается трехмерное поле объемной концентрации.

### **1.3 Реализация моделей переноса и рассеяния радионуклидов в программных кодах**

#### **1.3.1 ПС для расчета распространения радионуклидов в ближней зоне**

Определяющим фактором, формирующим дозовые нагрузки на население при авариях на АЭС, является рассеяние факела выброса (фактор разбавления), зависящее от метеорологических параметров (устойчивость атмосферы, скорость ветра, осадки), топографических параметров (тип подстилающей поверхности, рельеф) района размещения АЭС и высоты выброса.

Для расчета зависимости кратковременного метеорологического фактора разбавления  $\chi$  при проектировании традиционно используется гауссова модель

рассеяния примеси в атмосфере с формулами Смита-Хоскера и Бриггса для параметров диффузии как функций расстояния от источника выброса и категорий устойчивости атмосферы по классификации Пэскуилла [3, 39]. Гауссова модель рассеяния примеси лежит в основе нормативных методик консервативной оценки приземных концентраций и осаждения радионуклидов на почву в ближней зоне (до 50 км от источника) при кратковременных газоаэрозольных выбросах АЭС [3 - 6].

На основе расчетных соотношений, представленных в методиках [3 - 6], в настоящее время в России разработаны и широко применяются на практике следующие программные коды.

- «ДОЗА\_М» (НИЦ «Курчатовский институт») [7],
- «ВЫБРОС 3.1» (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ») [8],
- «SULTAN» (АО «ВНИИАЭС») [9],
- «GENGAUS» («ГНЦ ИБФ»).

Гауссова модель рассеяния реализована также в следующих зарубежных кодах:

- «GENII» [10],
- «PASE», «COSIMA», «AIDA» - применяются при экспертных оценках МАГАТЭ проектов новых АЭС [11],
- «BSAVVL version 2.3h» (Fennovoima (Финляндия)) и др.

### **1.3.2 Реализация моделей дальнего переноса в ПС**

Для целей управления произошедшей аварией следует применять методы и модели оценки ситуации в реальном масштабе времени, учитывающие действительную траекторию распространения облака аварийного выброса и конфигурацию формируемого следа выпадений, период года (с точки зрения момента вегетации растений) и другие факторы влияния.

В основу моделей дальнего переноса положено описание атмосферной турбулентности с использованием лагранжева подхода. Алгоритм расчетов предусматривает интегрирование для каждой частицы примеси из некоторой совокупности стохастического уравнения (1.13). Искомое поле примеси определяется в этом случае путем статистической обработки получаемых в результате расчета случайных координат частиц.

Алгоритмическая простота уравнения (1.13) дает возможность построения с помощью современных быстродействующих компьютеров физически-содержательных математических моделей переноса и рассеяния примеси от источников выброса любой пространственно-временной структуры и при наличии сложной конфигурации границ области, что выгодно отличает данный подход от прочих (в частности, от методики МПА-98 [6]).

Для анализа радиационных последствий аварий на больших расстояниях от АЭС в России широко применяются такие компьютерные системы, как ПС «НОСТРАДАМУС» (ПС аттестовано в Ростехнадзоре РФ) и ПК «RECASS NT». Примером аналогичного зарубежного кода является компьютерный пакет программ (КПП) «SILAM».

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) [12] и ПК «RECASS NT» (НПО «Тайфун») [13], КПП «SILAM» (совместная разработка Финского метеорологического института (ФМИ) и Центра технических исследований Финляндии) [14, 15]. 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 %).

ПС «НОСТРАДАМУС» (ИБРАЭ РАН). Модель распространения примесей в атмосфере, реализованная в ПС «НОСТРАДАМУС» [12], представлена в Приложении 18 Приказа Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации по экологическому, техническому и атомному надзору № 465 8 июня 2010 г. «Об утверждении Положения о повышении точности прогностических оценок радиационных характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на персонал и население» [40]. Модель основана на том, что распространение примеси в атмосфере описывается полуэмпирическим уравнением адвекции-диффузии.

Граничные условия задаются следующие:

- На нулевой высоте (при  $z = 0$ ) задается поток примеси на подстилающую поверхность за счет сухого осаждения;
- На верхней границе расчетной области  $z = Z$  предполагается отсутствие потока
- На боковых (вертикальных) границах расчетной области предполагается условие  $\frac{\partial \bar{q}}{\partial \bar{n}} = 0$ , где  $\bar{n}$  - направление нормали к боковой границе.

Боковые границы располагаются далеко от центра струи, и характер граничных условий не влияет на решение.

Скорость ветра и коэффициенты диффузии считаются заданными функциями координат и времени.

Уравнение адвекции-диффузии с неоднородным полем скорости ветра при не изотропной турбулентности (без учета вымывания и цепочек превращений) решается методом статистических испытаний (метод Монте-Карло).

Если в выбросе присутствуют аэрозоли с разными скоростями гравитационного оседания, то пробные частицы делятся на группы, каждая из которых имеет свою гравитационную скорость оседания.

Разбиение на группы по гравитационному осаждению требует знания распределения аэрозольных частиц в выбросе по размерам. Способ усреднения размеров в каждой группе (если группа имеет достаточно широкий разброс размеров) зависит от поставленной задачи.

Для крупных частиц (диаметр  $d > 50$  мкм) осаждение на поверхность определяется в основном гравитацией. Для более мелких частиц сухое осаждение определяется турбулентным диффузионным потоком на поверхность, и скорость сухого осаждения зависит от метеорологических условий, от характера поверхности, химических свойств аэрозольных частиц и поверхности.

В отсутствие информации о распределении размеров параметры групп по гравитационному оседанию и сухому осаждению задаются пользователем. Так, в соответствии с рекомендациями [4, 6, 41] принимается, что аэрозольные частицы, возникающие при разрушении активной зоны реактора при тяжелой аварии, будут иметь размеры микронного диапазона. Гравитационным оседанием таких частиц можно пренебречь, скорость сухого осаждения берется порядка

0,8 см/с для всех радионуклидов, кроме изотопов йода, для которых она принимается 2 см/с и 0,01 см/сек для молекулярной и органической форм соответственно.

ПТК «RECASS NT» (НПО «Тайфун»). ПТК «RECASS NT» — программно-технический комплекс Федерального информационно-технического центра Росгидромета (ФИАЦ Росгидромета) для поддержки принятия решений в условиях загрязнения природной среды при радиационных и химических авариях, а также при выбросах вулканического пепла и продуктов горения лесных и торфяных пожаров [13].

Основу ПТК «RECASS NT» составляет система анализа и прогноза загрязнения окружающей среды, которая обеспечивает:

- непрерывное ведение базы текущих и прогностических данных о состоянии атмосферы и поверхностных вод, их загрязнении,
- моделирование распространения аварийных и природных загрязнений в атмосфере, их выпадений на поверхность земли и переносе поверхностными водами,
- расчет ожидаемых доз для населения и выработку рекомендаций по контрмерам для защиты населения при радиационных авариях и выбросах токсических веществ,
- подготовку в заданном формате отчетных форм и справок с прогнозом аварийного загрязнения, рекомендациями по контрмерам и рассылку их заинтересованным организациям и ведомствам.

Места установки системы «RECASS NT» - ФИАЦ Росгидромета, СКЦ ГК «Росатом», КЦ ОАО «Концерн «Росэнергоатом», все действующие российские АЭС, объекты УХО, ГУ МЧС России по Курской и по Волгоградской областям, 8 УГМС и ЦГМС Росгидромета, Северо-западный филиал НПО "Тайфун", РЦРКМ Минприроды Республики Беларусь.

Программное обеспечение системы «RECASS NT» построено по модульному принципу и включает:

- интегрированную базу данных;
- функциональные подсистемы – контроля, прогноза и анализа, оценки;
- телекоммуникационную подсистему;

- клиентскую часть системы.

Интегрированная база данных (БД) системы «RECASS NT» состоит из трех основных частей:

- оперативной БД (ОБД). В ОБД хранится постоянно обновляющаяся информация: данные постов метеорологических наблюдений, систем мониторинга, т.е. первичные данные и объективизированные данные - поля анализа и прогноза метеорологических величин, поступающие в виде сеток из специализированных прогностических центров по Глобальной Сети Телесвязи (ГСТ) ВМО;

- базы системных данных (БСД), в которую входят электронные карты, данные по рельефу, административному делению и другая информация, используемая как в ходе расчетов, так и при отображении и анализе результатов;

- БД результатов расчетов (БРР). В БРР в специальном виде хранятся результаты расчетов системы, выполненных «RECASS NT».

Модели атмосферного переноса системы «RECASS NT» позволяют моделировать загрязнение атмосферы и подстилающей поверхности аварийными выбросами и включают:

- Моделирование параметров приземного и пограничного слоев атмосферы, а также прилегающей свободной атмосферы (блок «Метеопроектор»),

- Моделирование процесса переноса и рассеяния примеси в атмосфере (блок «Диффузия»), которое осуществляется тремя моделями:

- локальная – экспресс-оценка (перенос до 10 – 30 км),
- мезомасштабная (перенос до 100 км),
- региональная (перенос ~1000 км и более).

Результаты моделирования включают:

- траектории переноса примеси,
- поля концентраций,
- трансграничный вынос,
- поля выпадений.

На Рисунке 1-3 в качестве примера расчета атмосферного модуля ПТК «RECASS NT» в ходе оперативной работы при реальной радиационной аварии приведены результаты моделирования распространения радионуклидов во время аварии на АЭС Фукусима в 2011 г.



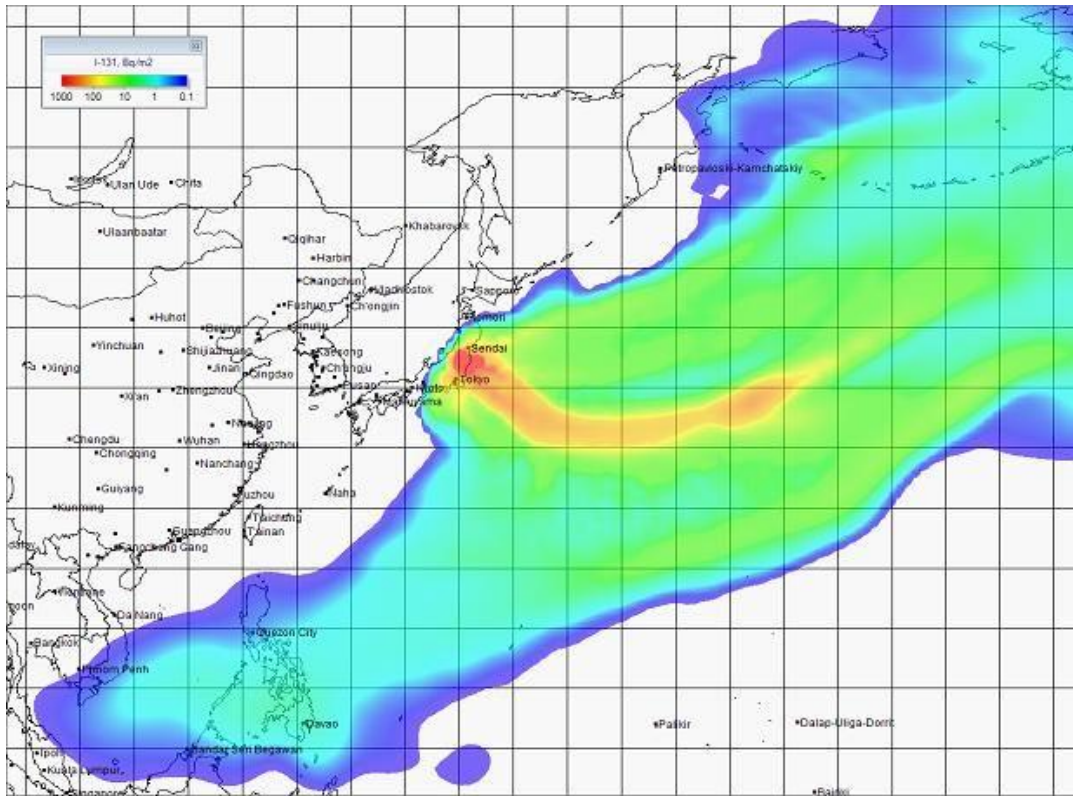


Рисунок 1-3 - Моделирование распространения I-131 во время аварии на АЭС Фукусима (зона 5000 км, выпадения за период с 15 по 30 марта 2011 г.)

Модуль расчета доз и выработки рекомендаций по защитным мероприятиям позволяет прогнозировать дозы:

- внешнего облучения от радиоактивного облака и радиоактивных выпадений,
- внутреннего облучения, обусловленные ингаляцией радиоактивных веществ во время прохождения радиоактивного облака,
- токсикологического воздействия химических веществ, обусловленные ингаляцией веществ во время прохождения облака.

На основании расчета доз на карте местности отображаются:

- территории с различными уровнями воздействия радиоактивных или опасных химических веществ на население,
- зоны, в которых рекомендуется применить защитные мероприятия.

По разработанной форме представляются рекомендации по мерам защиты населения и оптимальным срокам их применения для населенных пунктов, находящихся в зоне защитных мероприятий.

### КПП «SILAM» (ФМИ)

КПП «SILAM» представляет собой современный инструмент моделирования распространения в атмосфере газовых примесей, пыли, радионуклидов, аэрозолей различных размеров и природных аллергенов [14, 15].

КПП «SILAM» широко используется для исследования влияния лесных пожаров, извержений вулканов, а также иных природных и техногенных катастроф на загрязнение атмосферы. Расчетная схема основана на модели Лагранжа-Эйлера и может быть задана следующим образом [42]:

$$\langle c(r,t) \rangle = \iint p(r,t;r',t')S(r',t')dr'dt', \quad (1.14)$$

где  $\langle c(r,t) \rangle$  - средняя концентрация загрязняющего вещества в точке с координатой  $r$ , в момент времени  $t$ ;  $S(r',t')$  - определяет источник выброса,  $p(r,t;r',t')$  - функция вероятности перехода от точки и времени  $(r',t')$  к точке и времени  $(r,t)$ .

Распространение продуктов горения от природных пожаров, в числе прочих факторов, определяется динамикой состояния атмосферы в рассматриваемый промежуток времени. Поэтому для моделирования задач подобного типа важной составляющей являются архивные или прогнозные метеорологические данные, описывающие динамику воздушных масс. Численные модели прогноза погоды и архивные данные наблюдений доступны в хранилищах Европейского центра ETEX [15], HIRLAM [43] и ECMWF [44]. Общедоступными являются также метеорологические данные, размещенные на сервере National Weather Source (США, компьютерная модель GFS [45]).

Большинство европейских метеорологических служб в качестве базовой модели использует расчет прогноза погоды, выполненный для всего Северного полушария на суперкомпьютерах Met Office в Великобритании (компьютерная модель UKMET). Результаты расчетов упаковываются в двоичные GRIB-файлы. Формат сжатых файлов GRIB (GRIdded Binnary) используется в настоящее время в геофизике и метеорологии для обмена данными между метеослужбами большинства государств мира. Исходные данные для расчета прогноза собираются к 00 и 12 часов по Всемирному координированному времени (UTC) [46, 47].

GRIB-файл представляет собой массив значений метеорологических параметров в узлах регулярной сетки, т.е. в определенных точках пространства.

Эти данные могут иметь различное разрешение по широте и долготе. Часто используется широтно-долготная сетка с шагом  $0,56^\circ$  по широте и  $0,83^\circ$  по долготе. Моделирование позволяет получать прогноз погоды на ближайшие 144 ч с временным шагом 6 ч [47]. Модель GFS имеет пространственное разрешение  $0,5^\circ$  по широте и  $0,5^\circ$  по долготе на 144 ч с тем же временным шагом [46].

Альтернативным источником прогноза погоды является NOGAPS – прогноз погоды для ВМФ США. Со второй половины 2012 г. стали доступными данные глобальной компьютерной модели GEM (Канада). Модель GEM имеет пространственное разрешение  $0,6^\circ$  по широте и  $0,6^\circ$  по долготе на 144 ч, временной шаг – 3 ч [46].

Метеорологические данные в файлах формата GRIB содержат информацию об атмосферном давлении на поверхности, скорости ветра на высоте 10 м над землей, порывах ветра, температуре воздуха, относительной влажности, точке росы на высоте 2 м над землей, общем количестве осадков, общем облачном покрытии, глубине снежного покрова, значении потенциальной энергии конвекции (CAPE) на уровне земли, возможности ливней и града [48].

Другими важными составляющими для моделирования в системе «SILAM» являются характеристики источников эмиссии загрязняющих веществ, к которым относятся их координаты, мощность и период действия.

ПТК «SILAM» позволяет моделировать распространение значительного количества химических веществ и их смесей с различными типами взаимодействий между ними, в том числе перенос и осаждение радионуклидов [14].

Применительно к малым расстояниям от источника выброса (до нескольких километров) в последние два десятилетия вполне успешно использовался программный комплекс «Zone» [36, 37], реализующий лагранжеву стохастическую модель переноса радионуклидов совместно с 3D гидродинамической моделью, учитывающей влияние застройки.

Опыт апробации такого рода «последегуассовых» 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 сформулированные выше цель и задачи.

#### **1.4 Выводы**

Общими недостатками методик, основанных на гауссовой модели рассеяния радиоактивных выбросов в атмосфере, являются следующие:

- данные методики дают оценку максимальных дозовых нагрузок на население при наиболее неблагоприятных условиях рассеяния аварийного выброса без учета вероятности их реализации, что приводит к необоснованному консерватизму в анализе последствий аварий при проектировании АЭС;
- не позволяют учесть влияние застройки промплощадки на характеристики рассеяния примеси.

При всех достоинствах программных кодов, построенных на базе лагранжева подхода к описанию атмосферной турбулентности, общим их недостатком является неприменимость к прогнозированию наихудших метеорологических условий, характерных для района размещения АЭС, которые приводят в случае аварии к максимальным дозовым нагрузкам для населения. Коды «НОСТРАДАМУС», «RECASS NT», «SILAM» используются для оценки распространения радионуклидов в окружающей среде в результате аварии, на момент которой метеорологические условия известны, что не позволяет выполнить исследование распространения радионуклидов в окружающей среде при «наихудших условиях рассеяния» в соответствии с п.5.4 НП-032-01.

## РАЗДЕЛ 2 МОДЕЛЬ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Для расчета характеристик рассеивающей способности атмосферы МПА-98[6] предусматривает использование следующих показателей:

- значения скорости 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 для расчета категорий устойчивости Пэскуилла-Гиффорда.

В достаточном для последующего статистического анализа количестве в настоящее время в приземном слое доступны данные так называемых «стандартных гидрометеорологических наблюдений», включающих лишь информацию на одном уровне на метеостанциях (температура и влажность - на высоте 2 м, скорость и направление ветра – 10 м) и напрямую непригодных для изучения вертикальной структуры АПС.

Кроме того, для получения надежных процентильных оценок факторов разбавления и осаждения краткосрочных радиоактивных выбросов необходимы ряды ежечасных исходных метеоданных за период 5 – 7 лет, которые на стадии выбора площадки АЭС, а часто – и на стадии проектирования, обычно отсутствуют.

Таким образом, возникает проблема восстановления вертикальной структуры АПС по измерениям на одном уровне, дополненным некоторой доступной косвенной информацией, в качестве которой было предложено [49, 50] 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.

## 2.1 Исходные уравнения

Для решения указанных выше проблем в настоящей работе предлагается метод восстановления вертикальной структуры АПС по рядам наблюдений на одном уровне с привлечением численной модели, описывающей суточные колебания [49, 50]. Данный метод позволяет использовать для расчета характеристик АПС стандартную гидрометеорологическую информацию, позволяя оценить категории устойчивости Пэскуилла-Гиффорда на основе синтеза информации о среднесуточных значениях скорости ветра и температуры на стандартных изобарических поверхностях 925, 850 и 700 гПа, получаемых по данным реанализа атмосферных процессов, с данными стандартных гидрометеорологических измерений скорости ветра и температуры на метеостанции с использованием численной модели АПС.

Метод может использоваться для восстановления отсутствующих исходных данных градиентных измерений для последующих расчетов категорий устойчивости Пэскуилла-Гиффорда и факторов разбавления/осаждения для любой точки земного шара, в которой имеется метеостанция.

Модели АПС ориентированы, как правило, на описание процессов в атмосфере на горизонтальных масштабах в десятки и сотни километров с высотой рассматриваемой области не более 2 км. Столь выраженная анизотропия горизонтальных и вертикальных масштабов позволяет воспользоваться целым рядом упрощений в исходной системе уравнений гидротермодинамики атмосферы, главным из которых является предположение о возможности использования вместо полного уравнения гидродинамики для вертикальной компоненты скорости ветра его упрощенного аналога – уравнения статики атмосферы.

Общая система уравнений АПС в декартовой системе координат (ось  $x_1$  направлена на восток, ось  $x_2$  – на север, ось  $x_3$  – вертикально вверх) для осредненных значений горизонтальных ( $U_1, U_2$ ) компонент скорости и потенциальной температуры ( $\theta$ ) при этом записывается следующим образом [28, 51]:

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} + U_\alpha \frac{\partial U_1}{\partial x_\alpha} = 2\omega_z(U_2 - V_G) + \frac{\partial}{\partial x_3} K \frac{\partial U_1}{\partial x_3} + \Delta_L^2 U_1 \quad , \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial U_2}{\partial t} + U_\alpha \frac{\partial U_2}{\partial x_\alpha} = 2\omega_z(U_G - U_1) + \frac{\partial}{\partial x_3} K \frac{\partial U_2}{\partial x_3} + \Delta_L^2 U_2, \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + U_\alpha \frac{\partial \theta}{\partial x_\alpha} = \frac{\partial}{\partial x_3} K \frac{\partial \theta}{\partial x_3} + \varepsilon_\theta + \varepsilon_Q + \Delta_L^2 \theta. \quad (2.3)$$

По повторяющемуся индексу здесь предполагается суммирование,

$$U_G = -\frac{1}{2\omega_z \rho} \frac{\partial P}{\partial x_1}, \quad V_G = \frac{1}{2\omega_z \rho} \frac{\partial P}{\partial x_2} \quad (2.4)$$

– компоненты геострофического ветра, причем  $\omega_z = \omega \sin \varphi$  ( $\omega$  – угловая скорость вращения Земли,  $\varphi$  – широта,  $\rho$  – плотность воздуха),  $K = K_{TURB} + \nu$  – суммарный (турбулентный и молекулярный) коэффициент вертикальной диффузии. В связи с тем, что в реальной атмосфере в условиях невырожденной турбулентности  $K_{TURB} \gg \nu$ , в дальнейшем эта величина для простоты будет именоваться «коэффициент турбулентного обмена», с учетом, однако, того обстоятельства, что коэффициент молекулярной диффузии  $\nu$  представляет собой нижний предел этой величины (в условиях вырожденной турбулентности). Далее,

$$\Delta_L^2(\cdot) = \frac{\partial}{\partial x_1} K_L \frac{\partial}{\partial x_1}(\cdot) + \frac{\partial}{\partial x_2} K_L \frac{\partial}{\partial x_2}(\cdot)$$

– оператор горизонтального макротурбулентного перемешивания ( $K_L$  – коэффициент турбулентного перемешивания по горизонтали).

Члены  $\varepsilon_\theta$  и  $\varepsilon_Q$  в уравнении (2.3) представляют собой, соответственно, суммарный радиационный приток тепла в атмосфере (за счет поглощения коротковолновой и длинноволновой радиации) и приток тепла за счет фазовых переходов.

## 2.2 Система уравнений суточных колебаний

Изложенная выше общая модель АПС описывает всю совокупность процессов в атмосферном пограничном слое. Ее применение на практике осложняется как трудностями формулировки краевых условий, так и проблемами параметризации притоков тепла. Как показали многочисленные исследования (например, [52]), привлечение разного рода уточненных схем описания физических процессов (уравнения теплового баланса подстилающей поверхности, высокоточных алгоритмов расчета радиационных притоков тепла и т. д.), приводит, в итоге, к

необходимости задания весьма большого числа плохо известных характеристик атмосферы, почвы или растительности. Погрешности задания всех этих дополнительных свойств среды способствуют увеличению суммарных ошибок расчета, что во многом нивелирует положительный эффект подобных уточнений.

В работах [49, 50] предложена упрощенная система уравнений АПС, предполагающая специальное выделение синоптического фона, который должен задаваться отдельно (из более общей модели или измерений) и тем самым учитывать реальные физические процессы в атмосфере. Метод восстановления вертикальной структуры АПС базируется на том предположении, что суточные колебания температуры воздуха, вызванные колебаниями инсоляции, являются ответственными за формирование вертикальных градиентов температуры в приземном слое и, как следствие, определяют вертикальную структуру атмосферной турбулентности, скорости и направления ветра.

В качестве фоновых значений компонент скорости ветра 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:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_3} K \frac{\partial u}{\partial x_3} + 2\omega_z v \quad (2.5) \quad , \quad \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_3} K \frac{\partial v}{\partial x_3} - 2\omega_z u \quad (2.6)$$

В отличие от уравнений динамики (2.1) и (2.2), где в пределах АПС доминируют, как известно, силы трения, Кориолиса и барического градиента [50], остающиеся также и в уравнениях (2.5) и (2.6), выделение фона в уравнении теплопроводности (3.3) оказывается не столь простым, поскольку в различных условиях там могут доминировать различные группы членов. В связи с этим перепишем уравнение (2.3) следующим образом:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_3} K \frac{\partial \theta}{\partial x_3} + \Psi_\theta \quad (2.7)$$

где функция  $\Psi_\theta(x_1, x_2, x_3, t)$  - совокупность всех остальных членов уравнения (2.3), не учитываемых в явной форме в (2.7).

За исключением радиационных ( $\varepsilon_\theta$ ), все остальные компоненты  $\Psi_\theta$  обусловлены в значительной степени процессами синоптического масштаба,



которые охватывают по вертикали весь атмосферный пограничный слой в целом. Что касается величины  $\varepsilon_\theta$ , то, как показали специальные исследования [52], ее вертикальный профиль имеет целый ряд характерных особенностей, причем максимальные по модулю значения достигаются в непосредственной близости к подстилающей поверхности (за счет интенсивного длинноволнового излучения вследствие значительных локальных градиентов температуры). Если выбрать нижнюю границу области расчета совпадающей с высотой измерения температуры на уровне несколько метров (например, на высоте метеобудки  $Z_B = 2$  м), то влияние радиационных притоков тепла на формирование вертикальной структуры поля температуры уже не будет столь существенным.

Все вышесказанное дает основание в первом приближении пренебречь зависимостью  $\Psi_\theta$  от координат и рассматривать ее лишь как функцию времени:

$$\Psi_\theta(t) \equiv \frac{d\tilde{\theta}}{dt} = \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial t}, \quad (2.8)$$

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

В этом случае уравнение (2.7) можно переписать в специальной форме для отклонений температуры от синоптического фона  $\vartheta = \theta - \tilde{\theta}$ :

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_3} K \frac{\partial \vartheta}{\partial x_3}. \quad (2.9)$$

Для использования системы уравнений (2.5), (2.6) и (2.9) в расчетах требуется решить проблему ее замыкания (в данном случае, дать способ расчета коэффициентов турбулентного обмена  $K$ ) и сформулировать краевые условия.

### 2.3 Метод замыкания системы уравнений суточных колебаний

Достаточно содержательное описание существующих методов замыкания системы уравнений турбулентного обмена (параметризации турбулентного обмена), предложенных за последние полвека, содержится в многочисленных монографиях (например, [28, 29, 52]). Несмотря на то, что этому вопросу уделяли огромное внимание на протяжении многих десятилетий, до сих пор отсутствует какая-либо общепринятая модель параметризации атмосферной турбулентности, претендующая на некоторый «стандартный» характер.

Используемая в данной работе схема замыкания уравнений (2.5), (2.6) и (2.9) опирается на привлечение дополнительных уравнений для вторых одноточечных моментов турбулентных пульсаций на развитый в [51, 53] подход, хорошо апробированный и верифицированный применительно к расчету структуры АПС.

В его основе лежит дополнительная система уравнений для шести независимых компонент тензора турбулентных напряжений  $R_{ij} = \langle u'_i u'_j \rangle$  ( $i, j=1,2,3$ ) и трех уравнений для компонент турбулентного потока температуры  $H_i = \langle \theta' u'_i \rangle$  ( $i=1,2,3$ ), где штрих означает турбулентную флуктуацию соответствующей величины. При этом уравнения для диагональных компонент  $\sigma_i^2 = R_{ii}$  (составляющих энергии удельной кинетической энергии турбулентности  $b^2 = 1/2 \sum_{i=1}^3 \sigma_i^2$ ) рассматриваются в полной форме (с учетом нестационарных и диффузионных членов), а для недиагональных компонент  $R_{ij}$  (турбулентных напряжений Рейнольдса) и потоков  $H_i$  – в упрощенной форме, в так называемом «равновесном» приближении.

Общая система дифференциальных уравнений для упомянутых вторых моментов  $R_{ij}$  и  $H_i$  записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{dR_{ij}}{dt} = & -R_{i\alpha} \frac{\partial U_j}{\partial x_\alpha} - R_{j\mu} \frac{\partial U_i}{\partial x_\mu} + \left\langle \frac{p'}{\rho} \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \right\rangle + \beta_i H_j + \beta_j H_i - 2\nu \left\langle \frac{\partial u'_i}{\partial x_\alpha} \frac{\partial u'_j}{\partial x_\mu} \right\rangle + \\ & (I) \qquad (II) \qquad (III) \qquad (IV) \\ & + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left( -\langle u'_i u'_j u'_\alpha \rangle + p' u'_j \delta_{j\alpha} + p' u'_i \delta_{i\alpha} \right) + \nu \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_\alpha} \end{aligned} \quad (2.10)$$

(V)

$$\begin{aligned} \frac{dH_i}{dt} = & -R_{i\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial x_\alpha} - H_\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_\mu} + \left\langle \frac{\theta'}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x_i} \right\rangle + \beta_i \sigma_T^2 - (\nu + \chi) \left\langle \frac{\partial \theta'}{\partial x_\alpha} \frac{\partial u'_i}{\partial x_\mu} \right\rangle, \\ & (I) \qquad (II) \qquad (III) \qquad (IV) \\ & + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left( -\langle u'_i \theta' u'_\alpha \rangle + \chi u'_i \frac{\partial \theta'}{\partial x_\alpha} + \nu \theta' \frac{\partial u'_i}{\partial x_\alpha} \right) + \chi \frac{\partial H_i}{\partial x_\alpha} \end{aligned} \quad (2.11)$$

(V)

Здесь угловые скобки – признак осреднения,  $\beta_i=(0,0,g/T)$  - параметр плавучести, по греческим индексам  $\alpha, \mu = 1, 2, 3$  - предполагается суммирование,  $\nu, \chi$  - молекулярные коэффициенты турбулентной вязкости и температуропроводности соответственно,  $\delta_{ij}$  - единичный тензор.

В этих уравнениях (I) – генерация соответствующих моментов за счет динамического фактора, (III) – за счет термического фактора (фактора плавучести), (II) – так называемые члены с пульсациями давления, (IV) – диссипация, а (V) – суммарная (турбулентная и молекулярная) диффузия.

Система уравнений (2.10), (2.11) является незамкнутой, поскольку группы членов (II), (IV), (V) остаются неизвестными. В монографии [29] дан общий обзор аппроксимации такого рода членов, из которых далее будем использовать наиболее простые и устоявшиеся.

Для членов (II), описывающих диссипацию, используем гипотезу локальной изотропии, тогда в соответствии с выводами А.Н. Колмогорова [28] справедливо:

$$2\nu \left\langle \frac{\partial u'_i}{\partial x_\alpha} \frac{\partial u'_j}{\partial x_\mu} \right\rangle = \frac{2C}{3} \frac{b^3}{l} \delta_{ij}, \quad (\nu + \chi) \left\langle \frac{\partial \theta'}{\partial x_\alpha} \frac{\partial u'_i}{\partial x_\mu} \right\rangle = 0 \quad (2.12)$$

где  $l$  - характерный линейный масштаб турбулентных пульсаций.

Для членов (II) в (2.10) применим известную гипотезу Ротта [28], с дополнительным слагаемым, отражающим анизотропию, вносимую горизонтальной подстилающей поверхностью:

$$\left\langle \frac{p'}{\rho} \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \right\rangle = -C_1 \frac{b}{l} (R_{ij} - \frac{2}{3} b^2 \delta_{ij}) - C_2 \frac{b}{l} \sigma_{33} (k_i k_j - \frac{1}{3} \delta_{ij}), \quad (2.13)$$

где  $k = (0,0,1)$  - единичный вектор, направленный вертикально вверх.

Для члена (II) в уравнении (2.11) воспользуемся упрощенным вариантом гипотезы Дж. Ламли [29], учитывающим только изотропирующее влияние пульсаций давления и сходной в своей основе с гипотезой Ротта:

$$\left\langle \frac{\theta'}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x_i} \right\rangle = -C_3 \frac{b}{l} H_i. \quad (2.14)$$

Величины  $C_1, C_2, C_3$  в (2.12) - (2.14) - суть эмпирические константы, способ определения которых будет указан далее.

Что касается диффузионных членов (V) в уравнениях (2.10), (2.11), то здесь будут использованы радикальные упрощения: в уравнениях для диагональных компонентов тензора напряжений  $\sigma_i^2=R_{ii}$  будет использована градиентная гипотеза - линейная связь вертикального турбулентного потока  $\sigma_i^2$  с вертикальным градиентом этой величины через коэффициент турбулентности  $K$ , а в остальных уравнениях этими величинами, так же как и членами в их левых частях, будет пренебрегаться (так называемое «квазиравновесное приближение»).

В итоге, для горизонтально-однородного нестационарного АПС система (2.10), (2.11) для пяти независимых компонентов тензора напряжений Рейнольдса и двух компонентов вектора потока температуры (кроме  $R_{12}$  и  $H_3$  в которых нет необходимости) принимает следующую форму:

$$\frac{\partial \sigma_1^2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\sigma_1^2}{\partial z} - 2R_{13} \frac{\partial U}{\partial z} - C_1 \frac{b}{l} (\sigma_1^2 - \frac{2}{3} b^2) + \frac{1}{3} C_2 \frac{b}{l} \sigma_{33} - \frac{2}{3} C \frac{b^3}{l}, \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial \sigma_2^2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\sigma_2^2}{\partial z} - 2R_{23} \frac{\partial V}{\partial z} - C_1 \frac{b}{l} (\sigma_2^2 - \frac{2}{3} b^2) + \frac{1}{3} C_2 \frac{b}{l} \sigma_{33} - \frac{2}{3} C \frac{b^3}{l}, \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial \sigma_3^2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\sigma_3^2}{\partial z} + 2\beta H_3 - C_1 \frac{b}{l} (\sigma_3^2 - \frac{2}{3} b^2) - \frac{2}{3} C_2 \frac{b}{l} \sigma_{33} - \frac{2}{3} C \frac{b^3}{l}, \quad (2.17)$$

$$-\sigma_3^2 \frac{\partial U}{\partial z} - C_1 \frac{b}{l} R_{13} + \beta H_1 = 0, \quad (2.18) \quad -\sigma_3^2 \frac{\partial V}{\partial z} - C_1 \frac{b}{l} R_{23} + \beta H_2 = 0, \quad (2.19)$$

$$-R_{13} \frac{\partial \theta}{\partial z} - H_3 \frac{\partial U}{\partial z} - C_3 \frac{b}{l} H_1 = 0, \quad (2.20) \quad -R_{23} \frac{\partial \theta}{\partial z} - H_3 \frac{\partial V}{\partial z} - C_3 \frac{b}{l} H_2 = 0. \quad (2.21)$$

Подставляя  $H_1$  из (2.20) в (2.18) и  $H_2$  из (2.21) в (2.19), легко получить выражения  $R_{13}$  и  $R_{23}$  через соответствующие градиенты компонент скорости  $U$  и  $V$  с коэффициентом

$$K = \frac{l\sigma_3^2}{C_1 b} \left( 1 + 2 \frac{\beta H_3 l}{C_3 b \sigma_3^2} \right), \quad R_{13} = -K \frac{\partial U}{\partial z}, \quad R_{23} = -K \frac{\partial V}{\partial z}, \quad (2.22)$$

который и представляет собой искомый коэффициент турбулентного обмена.

Для расчета величины  $K$  по (2.22) необходимы только  $\sigma_3$ ,  $b$  и масштаб турбулентности  $l$ . В этом случае из всей системы уравнений (2.15) - (2.17) достаточно ограничиться интегрированием (2.17), а также уравнением баланса

кинетической энергии турбулентности для  $b^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sigma_i^2$ , которое легко может быть

получено путем суммирования (2.15) - (2.17) и деления результата на 2:

$$\frac{\partial b^2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial b^2}{\partial z} + K \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] + \beta H_3 - C \frac{b^3}{l}. \quad (2.23)$$

Для задания масштаба турбулентности  $l$  будем опираться на хорошо зарекомендовавшую себя формулу Блэкедара [54]:

$$l = \frac{\kappa z}{1 + \frac{\kappa z}{l_H}}, \quad l_H = \frac{\int_0^{\infty} b z dz}{\int_0^{\infty} b dz}, \quad (2.24)$$

которая обеспечивает асимптотически правильное поведение этой величины при  $z \rightarrow 0$  и  $z \rightarrow \infty$ .

Впервые описанный выше подход был реализован применительно к приземному слою в работе [53] (с некоторыми расширениями). Ось  $x$  выбранной декартовой системы координат для приземного слоя направляется по приземному ветру, при этом из условий симметрии следует  $V = R_{23} = H_2 = 0$ . В работе [53] было показано, что расчетные значения универсальной функции теории подобия Моница-Обухова:

$$\varphi_U(\zeta) \equiv \frac{\kappa z}{U_*} \frac{\partial U}{\partial z}, \quad \zeta = \frac{z}{L_{MO}}, \quad L_{MO} = -\frac{U_*^3}{\beta \kappa H_3}, \quad U_*^2 = -R_{13},$$

рассчитанные на основе предложенной модели неплохо согласуются с имеющимися экспериментальными данными. Там же был указан и способ расчета входящих в модель эмпирических констант. Для этого следует уравнения (2.23), (2.16), (2.17) и (2.18) записать при условии  $z \rightarrow 0$ , когда все члены в их левых частях, а также члены с турбулентными потоками тепла, становятся пренебрежимо малыми по сравнению с другими членами правых частей. В итоге может быть записана следующая система алгебраических уравнений относительно искомых констант:

$$C b_n^3 = 1, \quad C_1 b_n = \sigma_n^2, \quad C_1 (3\sigma_n^2 - 2b_n^2) + 2C_2 \sigma_n^2 + 2C b_n^2 = 0, \quad (2.25)$$

где  $\sigma_n = \sigma_3 / U_*$ ,  $b_n = b / U_*$  - безразмерные значения стандартного отклонения флуктуаций вертикальной скорости и корня из кинетической энергии турбулентности хорошо известны из многочисленных экспериментов в приземном слое [28] ( $\sigma_n = 1.2$ ,  $b_n = 2.2$ ), относительную погрешность которых можно оценить не более чем в 10 %. Проводя необходимые вычисления несложно, таким образом, получить:

$$C = 0.09 \pm 0.02, C_1 = 0.6 \pm 0.05, C_2 = 0.9 \pm 0.15. \quad (2.26)$$

## 2.4 Краевые условия

Уравнения (2.5), (2.7), (2.9), (2.17) и (2.23) следует интегрировать по времени, начиная с некоторого момента времени  $t_0$  (задача Коши для уравнений параболического типа математической физики) с заданием некоторых фиктивных начальных условий, поскольку фактические сведения о реальной вертикальной структуре АПС отсутствуют.

Для компонент скорости ветра в этом качестве привлекались функции  $u^{ST}$ ,  $v^{ST}(x_3)$ , удовлетворяющие стационарному решению уравнений (2.5), (2.6) с заданием в качестве геострофических компонент скорости ветра  $U_G$ ,  $V_G$  фактических среднесуточных значений компонент скорости ветра по данным реанализа на текущую дату.

В качестве начальных условий для фоновой температуры используется кусочно-линейный ее профиль, получаемый по соответствующим величинам среднесуточной температуры по данным реанализа на текущую дату на уровнях 925, 850, 700 гПа, а также по значению приземной температуры по данным метеостанции  $T_\alpha = T(t_0, Z_\alpha)$ , где  $Z_\alpha = 2$  м – высота метеобудки (совпадает с нижним уровнем расчетной сетки  $Z_1$ ).

Момент времени  $t_0$  выбирается таким образом, чтобы интенсивность всех обменных процессов (в частности, величины коэффициента турбулентности) была минимальной (для этого достаточно принять  $t_0 = 1$  час ночи). Это позволяет минимизировать влияние фиктивных начальных условий на развитие последующих процессов при решении задачи Коши.

В связи с тем, что скорость и направление ветра на метеостанции измеряются на так называемой «высоте флюгера»  $Z_U = 10$  м, что превосходит по высоте нижний уровень расчетной сетки  $Z_I$ , то область интегрирования уравнений динамики разбивалась на две подобласти:  $[Z_U, Z_H]$  и  $[Z_I, Z_U]$ , где  $Z_H$  - высота расчетной области. В первой подобласти в качестве граничных условий для компонент горизонтальной скорости ветра привлекались известные из данных реанализа компоненты геострофического ветра  $U_G, V_G$  (на уровне  $Z_H$ ) и компоненты приземного ветра  $U_A, V_A$  (для уровня высоты флюгера  $Z_U$ ). Во второй подобласти на ее верхней границе  $Z_U$  также задавались значения  $U_A, V_A$ , что обеспечивало «склеивку» решений на границе двух подобластей, а на уровне  $Z_I$  привлекалось логарифмическое приближение для модуля скорости ветра:

$$G(z) = \frac{U_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{Z_0}\right), \quad (2.27)$$

где  $z_0$  - уровень шероховатости подстилающей поверхности, а  $\kappa \cong 0.40$  - постоянная Кармана.

Для задания суточных колебаний температуры на нижнем уровне  $\vartheta(t, Z_1) = \theta(t, Z_1) - \bar{\theta}(t, Z_1)$ , где  $\bar{\theta}(t, Z_1)$  - изменения во времени фоновой температуры, требовалось предварительно рассчитать эту функцию исходя из измеряемых за сутки значений температуры на уровне метеобудки. Была принята наиболее простая модель такого рода фона: модель линейного тренда, когда можно положить:  $\bar{\theta}(t, Z_1) = A + Bt$ , причем неизвестные значения коэффициентов  $A$  и  $B$  рассчитываются методом наименьших квадратов.

В том случае, когда в качестве исходных рядов наблюдений в приземном слое использовались не ежечасные данные, а данные получаемые в так называемые «синоптические сроки» (каждые 3 часа), исходные значения  $U(t_k, Z_u)$  и  $\theta(t_k, Z_1)$  в сроки наблюдений  $t_k$  интерполировались в набор ежечасных данных с использованием стандартной процедуры сплайновой интерполяции [55].

Для задания нижних граничных условий применительно к уравнениям (2.17) и (2.23) использовались указанные ранее предельные соотношения (2.25):

$$\sigma_3^2(t, Z_1) = \sigma_n^2 U_*^2, \quad b^2(t, Z_1) = b_n^2 U_*^2. \quad (2.28)$$

В качестве верхних граничных условий принимались условия равенства нулю всех отклонений от фона, энергии турбулентности и ее компоненты:

$$u = v = \vartheta = b^2 = \sigma_3^2 = 0. \quad (2.29)$$

## 2.5 Численная схема

Для численного интегрирования уравнений (2.6), (2.7), (2.10), (2.18) и (2.24) использовалась неравномерная (со сгущением у поверхности) степенная расчетная сетка по вертикали  $Z_k$  и эквидистантная сетка  $t_n$  по времени, с заданием постоянного шага по времени  $\tau$ :

$$Z_k = Z_1 \left[ \frac{Z_1 + dh(i-1)}{Z_1} \right]^\mu, \quad dh = \frac{Z_1}{N-1} \left[ \left( \frac{Z_H}{Z_1} \right)^\mu - 1 \right], \quad (2.30)$$

$$t_n = (n-1)\tau,$$

где  $k = 1, \dots, N$  - номер узла по вертикали,  $Z_H$  - высота расчетной области,  $n$  - номер шага по времени,  $\mu > 0$  - показатель степени (параметр степенной сетки). Высота нижнего уровня задается совпадающей со стандартной высотой психрометрической будки ( $Z_1 = 2$  м). Все остальные параметры расчетной области:  $\mu$ ,  $Z_H$ ,  $N$ ,  $\tau$  подбираются в процессе тестирования таким образом, чтобы обеспечить минимум ошибки.

Для численного интегрирования уравнений динамики (2.6), (2.7) удобно ввести комплексную переменную  $F = u + iv$ , где  $i = \sqrt{-1}$  мнимая единица, после чего эти уравнения можно переписать в форме одного уравнения для функции  $F$ :

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial F}{\partial z} - 2\omega_z i F, \quad (2.31)$$

которое далее интегрируется с использованием известного неявного метода прогонки [55]. Для этой цели перепишем это уравнение в конечно-разностной форме:

$$\frac{1}{\tau} (F_k^{n+1} - F_k^n) = \left[ \frac{K_{k+1} + K_k}{(Z_{k+1} - Z_k)} (F_{k+1}^{n+1} - F_k^{n+1}) - \frac{K_k + K_{k-1}}{(Z_k - Z_{k-1})} (F_k^{n+1} - F_{k-1}^{n+1}) \right] \frac{1}{(Z_{k+1} - Z_{k-1})} - 2\omega_z i F_k^{n+1}$$

$$(2.32)$$



После группировки членов, это уравнение может быть приведено к системе N-2 линейных алгебраических уравнений со следующей трехдиагональной матрицей:

$$A_k F_{k+1}^{n+1} - B_k F_k^{n+1} + C_k F_{k-1}^{n+1} = -D_k, \quad k = 2, \dots, N-1, \quad (2.33)$$

которую нужно обращать для последующего определения искомой функции  $F_k^{n+1}$  ( $k=2, N-1$ ) на каждом  $n+1$  шаге по значениям этой величины на шаге  $n$ . Значения функции  $F_k^{n+1}$  на нижнем и верхнем уровнях задаются из граничных условий. Легко получить, что:

$$\begin{aligned} A_k &= \frac{K_{k+1} + K_k}{(Z_{k+1} - Z_{k-1})(Z_{k+1} - Z_k)}, & C_k &= \frac{K_k + K_{k-1}}{(Z_{k+1} - Z_{k-1})(Z_k - Z_{k-1})}, \\ B_k &= \frac{1}{\tau} + A_k + C_k + 2\omega_z i, & D_k &= \frac{F_k^n}{\tau}. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Для получения решения системы уравнений (2.33) как раз и используется метод прогонки, суть которого состоит в представлении искомой функции с помощью следующего рекуррентного соотношения:

$$F_k^{n+1} = P_k F_{k+1}^{n+1} + Q_k, \quad k = 1, \dots, N-1, \quad (2.35)$$

где  $P_k, Q_k$  ( $k=1, N$ ) – так называемые прогоночные коэффициенты. Записывая (2.34) последовательно для  $k$  и  $k-1$  и подставляя их в (2.33), после приведения результата к форме (2.35) можно получить такие же рекуррентные формулы и для расчета прогоночных коэффициентов:

$$P_k = \frac{A_k}{B_k - C_k P_{k-1}}, \quad Q_k = \frac{D_k + C_k Q_{k-1}}{B_k - C_k P_{k-1}}, \quad k = 2, \dots, N-1. \quad (2.36)$$

Формула (2.36) применяется первоначально для области  $[Z_U, Z_H]$ , а затем - для  $[Z_L, Z_U]$ . При этом для узла расчетной сетки  $k_U$ , соответствующего по высоте  $Z_U$ , значения прогоночных коэффициентов задаются следующим образом:

$$P_{k_U} = 0, \quad Q_{k_U} = U_A - U_G + i(V_A - V_G), \quad (2.37)$$

и формулы (2.37) и (2.36) применяются в сеточной области  $[k_U, N]$ .

Для нижней сеточной области  $[1, k_U]$  требуется задать  $P_1, Q_1$ , для чего привлекаются соотношения, вытекающие из логарифмического приближения (2.27):

$$P_1 = \frac{1}{1+A}(1+i), \quad Q_1 = -(U_G + iV_G) \frac{A}{1+A}, \quad A = \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)}{\ln\left(\frac{Z_1}{Z_0}\right)}.$$

Уравнения (2.10), (2.18) и (2.24) имеют сходную структуру и в общем виде могут быть представлены в форме:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial \psi}{\partial z} + M_\psi \psi + \Omega_\psi, \quad (2.38)$$

где  $\psi = \vartheta, b^2, \sigma_3^2$ , а коэффициент  $M_\psi$  и свободный член  $\Omega_\psi$  не содержат производных от этих величин. Это уравнение далее точно так же приводится к конечно-разностному виду, как и (2.25):

$$\frac{1}{\tau}(\psi_k^{n+1} - \psi_k^n) = \left[ \frac{K_{k+1} + K_k}{(Z_{k+1} - Z_k)} (\psi_{k+1}^{n+1} - \psi_k^{n+1}) - \frac{K_k + K_{k-1}}{(Z_k - Z_{k-1})} (\psi_k^{n+1} - \psi_{k-1}^{n+1}) \right] \frac{1}{(Z_{k+1} - Z_{k-1})} + M_\psi^n \psi_k^{n+1} + \Omega_{\psi k}^n$$

где расчет  $M_\psi$ ,  $\Omega_\psi$  осуществляется по значениям всех полученных значений функций на шаге  $n$ , причем общая форма диагональной матрицы (2.34), а также выражения для  $A_k$ ,  $C_k$  по (2.35) остаются неизменными, а значения  $B_k$ ,  $D_k$  принимают вид:

$$B_k = \frac{1}{\tau} + A_k + C_k - M_k^n, \quad D_k = \frac{\psi_k^n}{\tau},$$

причем расчет всех функций на шаге  $n+1$  осуществляется по аналогичной (3.36) формуле:

$$\psi_k^{n+1} = P_k^\psi \psi_{k+1}^{n+1} + Q_k^\psi, \quad k = 1, \dots, N-1, \quad (2.39)$$

где прогоночные коэффициенты рассчитываются по формулам (2.36), для всех искомым функций на верхнем уровне  $\psi_N^{n+1} = 0$  в соответствие с используемыми верхними граничными условиями (2.30), а значения коэффициентов  $P_k^\psi$  задаются на основе нижних граничных условий (2.29):

$$P_1^\theta = \vartheta(t, Z_1) = \theta(t, Z_1) - \bar{\theta}(t, Z_1) \quad P_1^\sigma = \sigma_n^2 U_*^2, \quad P_1^B = b_n^2 U_*^2. \quad (2.40)$$

## 2.6 Верификация модели АПС

Ниже 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 [56] - воспроизведение установившегося (стационарного) распределения компонентов вектора ветра в АПС, имеющего следующий вид:

$$U(z) = G[1 - \exp(-az) \cos(az)], \quad V(z) = G \exp(-az) \sin(az), \quad (2.41)$$

где ось 'x' направлена по направлению геострофического ветра с модулем  $G$ , величина  $a = \sqrt{\frac{\omega_z}{K}}$ ,  $\omega_z = \frac{2\pi}{T_C} \sin(\varphi)$ ,  $T_C = 24$  ч, а  $\varphi$  - широта.

Данная группа тестов ориентирована на проверку правильности численной схемы интегрирования уравнений динамики (2.32) – (2.36).

Вторая группа тестов базируется на сопоставлении с известным аналитическим решением задачи о суточных колебаниях для уравнения (2.9) [56]. Такое решение может быть получено путем задания нижнего граничного условия для отклонений температуры в приземном слое в форме косинусоиды:

$$\mathcal{G}(t, Z_1) = A_m \cos(\omega t),$$

где  $A_m$  - амплитуда суточных колебаний, а  $\omega = 2\pi / T_C$ ,  $T_C = 24$  ч, и время отсчитывается от истинного полдня, когда при  $t = 0$  достигается максимальная температура. При дополнительном условии при  $z \rightarrow \infty$   $\mathcal{G} \rightarrow 0$  и условии периодичности  $\mathcal{G}(t, Z_1) = \mathcal{G}(t + T_C, Z_1)$  решение задачи записывается следующим образом:

$$\mathcal{G}(t, Z_1) = A_m \exp(-mz) \cos(\omega t - mz), \quad m = \sqrt{\frac{\omega}{2K}}. \quad (2.42)$$

Первые две группы тестов ориентированы на проверку правильности численной схемы интегрирования уравнения (2.9). Результаты верификации по этим группам тестов показали, что величины относительных погрешностей для умеренных значений коэффициентов турбулентного обмена (1 и 10 м<sup>2</sup>/с) оказываются на уровне 1 % или менее. Однако при экстремальных значениях этих величин (50 м<sup>2</sup>/с) погрешность увеличивается до 3 - 4 %. Причиной этого являются аппроксимационные ошибки, связанные с использованием неравномерной сетки.

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. (данные предоставлены Департаментом метеорологии Университета Лоранда в Будапеште (Eotvos Lorand University, Budapest) и включают 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  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ , с интерполяцией данных в точку нахождения промплощадки АЭС.

Наличие микроструктурных измерений в первом эксперименте означает, что помимо средних значений скорости ветра и температуры в нем измерялись также пульсации скорости ветра и температуры, что позволило, в итоге, непосредственно экспериментально определить величины  $U_*^2 = -\langle U'W' \rangle$  и  $H = \langle \theta'W' \rangle$ , где скобки означают осреднение за 1 час,  $U'$  - турбулентные пульсации продольной скорости ветра,  $W'$  - вертикальной скорости, а  $\theta'$  - температуры,  $\rho$  - плотность воздуха,  $C_p$  - теплоемкость при постоянном давлении.

С использованием этих данных рассчитывались экспериментальные значения масштаба длины в теории подобия Монина-Обухова:

$$L_{MO}^E = -\frac{U_*^3}{\beta \kappa H}, \quad (2.43)$$

которому, в свою очередь, с использованием рисунка 2-1 может быть поставлена в соответствие категория устойчивости Пэскуилла-Гиффорда [28]. Результаты оцифровки представленной на рисунке 2-1 номограммы сведены в таблицу 2-1,

которая задает диапазоны изменения величины, обратной значению масштаба Монина-Обухова ( $1/L_{MO}$ ) для каждой категории. В эксперименте сопоставлялись эмпирические и расчетные (с помощью модели восстановления АПС) значения динамической скорости и турбулентного потока тепла.

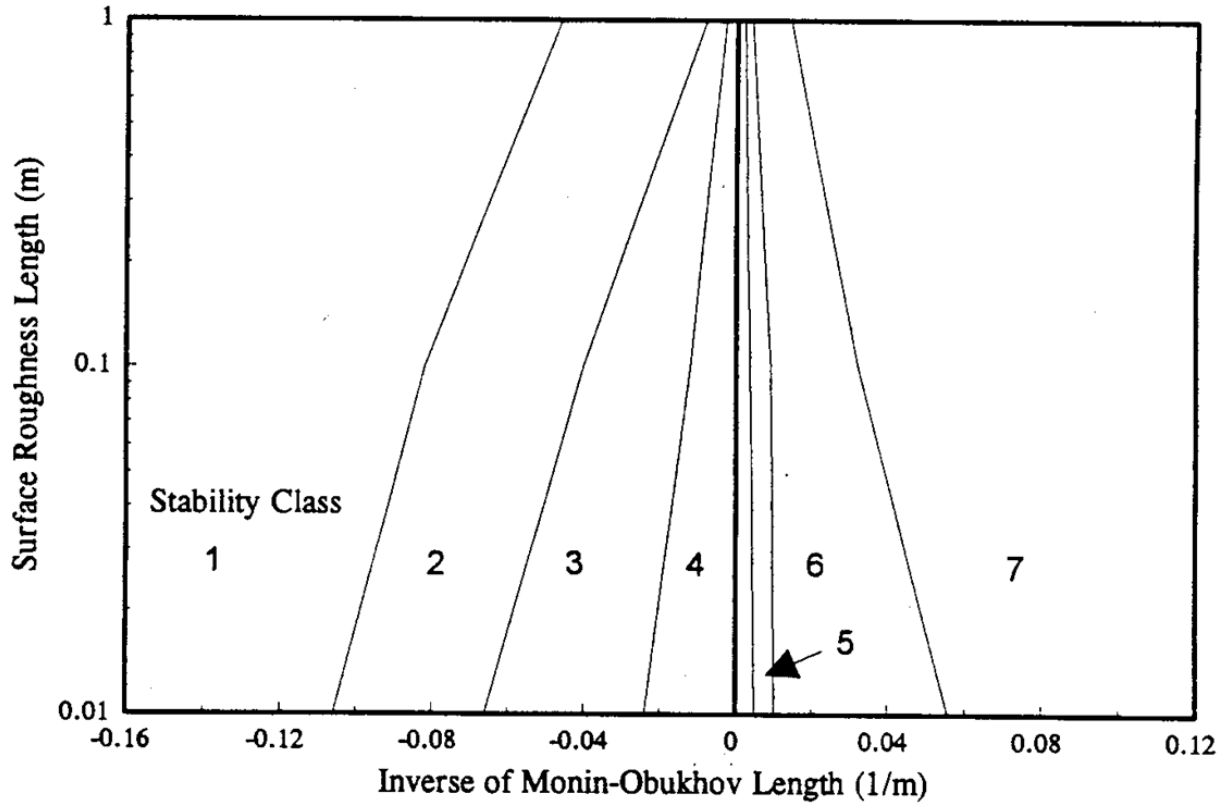


Рисунок 2-1 - Номограмма для определения категории устойчивости Пэскуилла-Гиффорда в зависимости от величины  $1/L_{MO}$  (1/м, шкала абсцисс) и уровня шероховатости подстилающей поверхности  $z_0$  (м), рекомендованная в публикации [28] на основе исследований [57]

Таблица 2-1 - Соответствие категорий устойчивости диапазонам параметра устойчивости

		А		В		С		D		Е		F		G	
<b>Метод 1, <math>L_{MO}</math>, м</b>															
	от	до	от	до	от	до	$ L_{MO}  > 100$		от	до	от	до	от	до	
	-10	0	-40	-10	-100	-40			10	100	1	10	0	1	
<b>Метод 2, <math>1/L_{MO}</math>, 1/м</b>															
$z_0$ (м)	Менее	от	до	от	до	от	До	от	до	от	до	Более			
0.01	-0.107	-0.107	-0.066	-0.066	-0.025	-0.025	0.004	0.004	0.009	0.009	0.055	0.055			
0.02	-0.099	-0.099	-0.058	-0.058	-0.021	-0.021	0.004	0.004	0.009	0.009	0.048	0.048			
0.03	-0.095	-0.095	-0.054	-0.054	-0.019	-0.019	0.004	0.004	0.009	0.009	0.044	0.044			
0.04	-0.091	-0.091	-0.051	-0.051	-0.018	-0.018	0.004	0.004	0.009	0.009	0.041	0.041			
0.05	-0.089	-0.089	-0.048	-0.048	-0.016	-0.016	0.004	0.004	0.009	0.009	0.039	0.039			
0.06	-0.087	-0.087	-0.046	-0.046	-0.016	-0.016	0.004	0.004	0.009	0.009	0.037	0.037			
0.07	-0.086	-0.086	-0.044	-0.044	-0.015	-0.015	0.004	0.004	0.009	0.009	0.035	0.035			
0.08	-0.084	-0.084	-0.043	-0.043	-0.014	-0.014	0.004	0.004	0.009	0.009	0.034	0.034			
0.09	-0.083	-0.083	-0.041	-0.041	-0.013	-0.013	0.004	0.004	0.009	0.009	0.033	0.033			
0.10	-0.082	-0.082	-0.040	-0.040	-0.012	-0.012	0.004	0.004	0.009	0.009	0.031	0.031			
0.20	-0.071	-0.071	-0.030	-0.030	-0.009	-0.009	0.003	0.003	0.007	0.007	0.027	0.027			
0.30	-0.064	-0.064	-0.025	-0.025	-0.008	-0.008	0.003	0.003	0.007	0.007	0.024	0.024			
0.40	-0.060	-0.060	-0.021	-0.021	-0.006	-0.006	0.003	0.003	0.006	0.006	0.022	0.022			
0.50	-0.057	-0.057	-0.018	-0.018	-0.005	-0.005	0.003	0.003	0.006	0.006	0.020	0.020			
0.60	-0.054	-0.054	-0.015	-0.015	-0.004	-0.004	0.003	0.003	0.005	0.005	0.019	0.019			
0.70	-0.051	-0.051	-0.013	-0.013	-0.004	-0.004	0.003	0.003	0.005	0.005	0.017	0.017			
0.80	-0.049	-0.049	-0.011	-0.011	-0.003	-0.003	0.003	0.003	0.005	0.005	0.017	0.017			
0.90	-0.047	-0.047	-0.009	-0.009	-0.003	-0.003	0.003	0.003	0.005	0.005	0.016	0.016			
1.00	-0.046	-0.046	-0.007	-0.007	-0.002	-0.002	0.002	0.002	0.004	0.004	0.015	0.015			

В используемом эксперименте датчики располагались на стандартной телевизионной мачте высотой 117 м (рисунок 2-2) в местечке Хейгхатсал (Hegyhátsál) на широте  $46^{\circ}57'21$  N и долготе  $16^{\circ}39'08$  E на западе Венгрии в окружении сельхозугодий и отдельных небольших по площади лесных участков, так что подстилающую поверхность здесь можно рассматривать как весьма горизонтально однородную с уровнем шероховатости около 0.2 м. Измерительные устройства расположены на выносных штангах длиной 4.4 м на высотах, соответственно, 10, 48, 82 и 115 м над подстилающей поверхностью.



Рисунок 2-2 - Общий вид наблюдательной метеомачты в Hegyhátsál (слева) и выносные штанги с аппаратурой (справа)

Развернутая на мачте система наблюдений включает помимо метеорологических датчиков также и газоанализаторы на углекислый газ, функционирует с сентября 1994 г., хорошо известна в Европе, входит в международную сеть наблюдений FluxNet, которая имеет публичный веб-сайт <http://fluxnet.ornl.gov>, так что данные исследований выполняются здесь на высочайшем мировом уровне и доступны (по договоренности) также и другим исследователям. В частности, одна из программ наблюдений здесь финансируется совместно Венгерской метеослужбой и Институтом ядерных исследований Венгерской академии наук.

Скорость и направление ветра измеряются здесь, соответственно, приборами Vaisala WAA15A и WAV15A, турбулентные флуктуации Vaisala WINDCAP® Ultrasonic Wind Sensor WMT700, а температура и влажность воздуха - Vaisala HMP35D (рисунок 2-3).



Рисунок 2-3 - Общий вид приборов для измерения скорости и направления ветра: Vaisala WAA15A (слева), Vaisala WMT700 (в центре) и температуры-влажности Vaisala HMP35D (справа)

В сопроводительной документации на эти приборы представлены следующие их основные характеристики:

1. Vaisala WAA15A. Диапазон измерения скорости ветра от 0,5 до 60 м/с. Погрешность  $\pm(0,4+0,035V)$  м/с.
2. Vaisala WMT700. Диапазон измерения скорости ветра от 0.01 до 40 м/с. Погрешность  $\pm 0.2$  м/с, разрешение 0.01 м/с. Погрешность измерения направления ветра  $\pm 2\%$ , разрешение - 1", пороговое значение для измерения направления - 0.1 м/с. Период опроса датчиков - 0.25 с.
3. Vaisala HMP35D. Диапазон измерения температуры от  $-20$  до  $+30^{\circ}\text{C}$ . Погрешность: 0.08  $^{\circ}\text{C}$ . Период опроса датчиков - 0.2 с.

Предоставленные данные измерений включали средние значения скорости ветра и температуры на уровнях 10 и 48 м, а также ковариации турбулентных флуктуаций скорости ветра и температуры  $U_*^2 = -\langle U'W' \rangle$  и  $H = \rho C_p \langle \theta'W' \rangle$ , где скобки означают осреднение за 1 час,  $U'$  - турбулентные пульсации продольной скорости ветра,  $W'$  - вертикальной скорости, а  $\theta'$  - температуры.

Выполнено сравнение эмпирических и расчетных (с помощью модели восстановления АПС) значений 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 %.

Более детальная информация по результатам сопоставления рассчитанных с использованием модели АПС и измеренных в результате микроструктурных измерений на метеомачте в Венгрии значений динамической скорости и температуры, представлена в форме корреляционных графиков на рисунках 5.3 - 5.4.

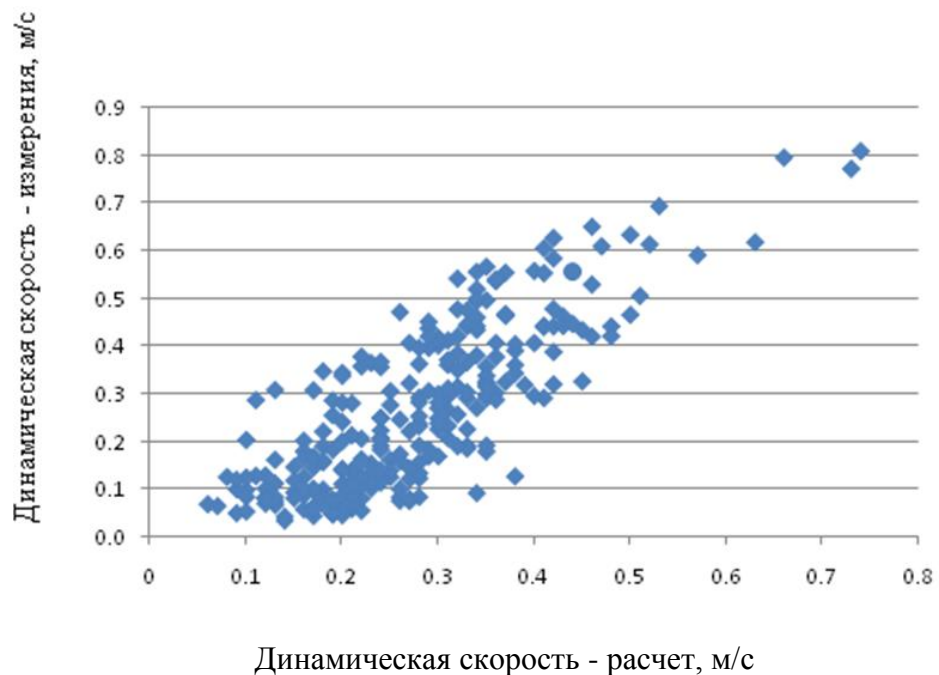


Рисунок 2-4 – Результаты сопоставления расчетных и измеренных значений динамической скорости

Расчет категорий устойчивости Пэскуилла-Гиффорда на основании описанной выше методики оценки этих величин по масштабу длины в теории подобия Монина-Обухова, определяемого как по данным измерений, так по результатам расчетов, показал, что полное совпадение категорий наблюдается в 80 % случаев, а в 90 % случаев обеспечивается совпадение с учетом попадания в соседние градации.



Рисунок 2-5 - Результаты сопоставления расчетных и измеренных значений вертикального турбулентного потока тепла

В дополнение к описанным выше измерениям, для верификации привлекались также и данные наблюдений на градиентной мачте на территории АЭС Пакш в Венгрии.

При этом был проведен расчет статистики повторяемости категорий устойчивости Пэскуилла-Гиффорда по выборке исходных данных за 2012 – 2013 гг. как на основе полноценных градиентных измерений (на уровнях 2 и 20 м), так и на основе аналогичных рядов по архиву наблюдений, восстановленных с помощью модели АПС, представленной выше в разделах 2.1 – 2.5, на основе данных метеостанции Пакш и данных реанализа. Результаты сопоставления полученных распределений приведены на рисунке 2-6.

Как видно из рисунка, совпадение расчетов по градиентным данным и по восстановленным оказывается весьма хорошим, что дает основание применения представленного выше метода восстановления АПС к расчетам факторов разбавления / осаждения аварийных выбросов АЭС Пакш-2.

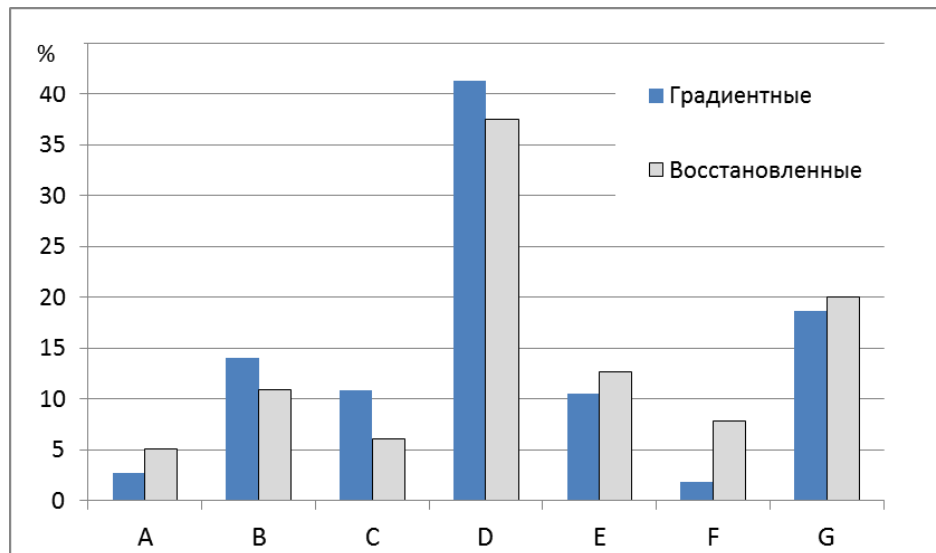


Рисунок 2-6 – Сопоставление гистограмм повторяемости категорий устойчивости Пэскуилла-Гиффорда, рассчитанных по градиентным измерениям и восстановленным по модели АПС данным за период 2012 - 2013 гг.

На рисунке 2-7 представлены результаты сопоставления расчетных значений категории устойчивости с использованием архива данных градиентных измерений на Кольской АЭС за период с 2000 по 2007 гг. (градиентные измерения температуры, полученные с использованием автоматической метеостанции АМС-1, расположенной на территории Кольской АЭС, а также данные наблюдений метеостанции Мурманского УГМС, расположенной в нескольких километрах от станции).

Фактические категории устойчивости Паскуилла - Гиффорда оценивались здесь по данным градиентных измерений, а для расчета по модели АПС привлекались 4-хсрочные наблюдения на метеостанции. Вероятность совпадения с точностью до соседней градации составляет 69 %, что можно признать вполне приемлемым результатом с учетом места расположения этой станции за полярным кругом.

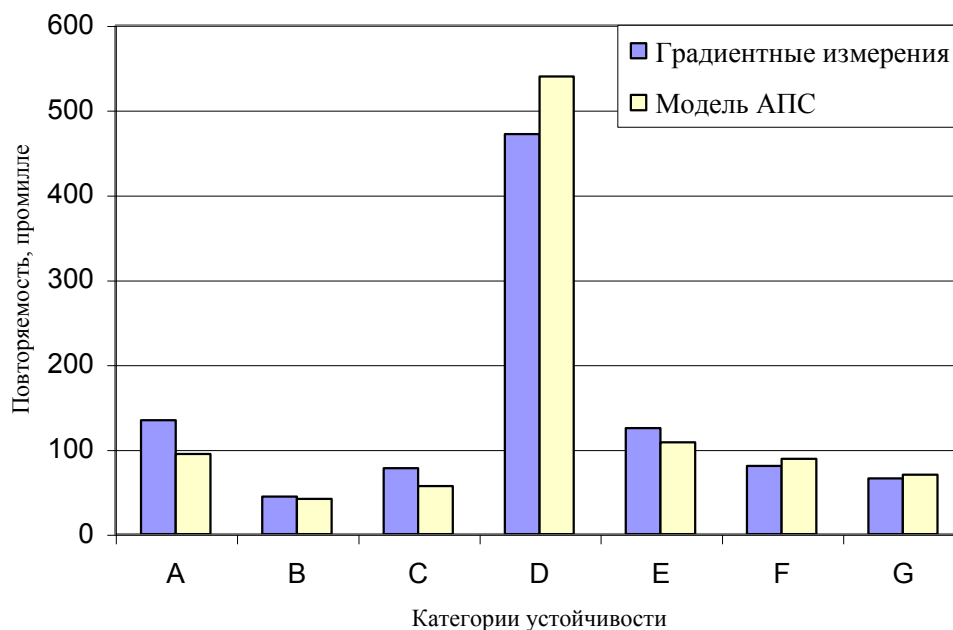


Рисунок 2-7 - Пример сопоставления повторяемостей расчетных значений категорий устойчивости атмосферы с использованием двух методов за период 2000-2006 гг. применительно к Кольской АЭС.

## 2.7 Вывод

Модель суточных колебаний метеопараметров в приземном слое атмосферы удовлетворительно воспроизводит вертикальную структуру АПС на основе рядов измерений на одном уровне и применима для расчета распределения по категориям устойчивости атмосферы для последующей оценки радиационных последствий аварий на АЭС.

### **РАЗДЕЛ 3 ОБОБЩЕНИЕ БАЗОВОЙ МОДЕЛИ МАГАТЭ РАСЧЕТА ФАКТОРОВ РАЗБАВЛЕНИЯ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ ДЛЯ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ЗАСТРОЙКИ ПРОМПЛОЩАДКИ АЭС**

#### **3.1 Общие формулы расчета факторов разбавления/осаждения выбросов в МПА-98**

Методика МПА-98 [6] основана на варианте гауссовой модели переноса и рассеяния облака радионуклидов, образовавшегося в результате кратковременного выброса радиоактивных веществ, учитывает сухое и влажное осаждение примесей, восстанавливает цепочки радиоактивного распада радионуклидов и дает возможность, в итоге, рассчитать биологические дозы облучения населения.

МПА-98 применяется для:

- анализа последствий разовых выбросов при планово-предупредительных работах, связанных, например, с дезактивацией основного оборудования и помещений, или в других похожих штатных ситуациях, предусмотренных регламентом работы, при которых производятся разовые выбросы радиоактивных веществ в атмосферу;
- оценки радиационной обстановки на местности, которая может сложиться при проектных авариях;
- проектирования защитных сооружений и установок, достаточных для ограничения проектных выбросов уровнями, при которых аварийными планами не предусматривается проведение каких-либо защитных мероприятий, или если таковые установлены, то не превышение пределов доз для любых проектных аварий;
- обоснования размера и конфигурации санитарно-защитной зоны вокруг предприятия;
- обоснования размеров и конфигурации зон аварийного планирования для аварийных выбросов, не сопровождающихся большими выбросами тепла и объема газо-воздушной смеси, которые могут привести к подъему облака выброса за пределы пограничного слоя атмосферы;

- для решения иных задач обоснования безопасности воздействия на окружающую среду проектируемых или реконструируемых предприятий (на стадии разработки ОВОС).

Область применения МПА-98 отличается тем, что для нее сценарием событий момент осуществления выброса не планируется. При оценке возможных последствий таких выбросов необходимо ориентироваться на наихудшие условия их рассеяния в атмосфере и миграции в окружающей среде, т.е. на экстремальные (из совокупности возможных) условия формирования ожидаемых дозовых нагрузок на население. Методические указания МПА-98 не предназначены также для решения задач управления произошедшей аварией. Для этой цели обычно используются численные модели, которые реализованы в кодах, рассмотренных в разделе 1.3.2.

Используется специальная система декартовых координат, где ось  $x$  направлена вдоль вектора ветра на уровне геометрической высоты источника выброса, ось  $y$  - в поперечном направлении, а ось  $z$  - вертикально вверх.

Для оценки радиационных последствий прохождения облака выброса в точке  $x$  по ветру необходимо знать временной интеграл концентрации радионуклидов в этой точке  $C_{v,r}(x)$  (Бк·с/м<sup>3</sup>). Его находят, интегрируя мгновенную объемную активность примеси по времени  $t$ :

$$C_{v,r}(x) = \int_0^{\infty} Q_{o,r} G'_{o,r}(x,t) dt = Q_{o,r} \cdot G_{o,r}(x), \quad (3.1)$$

где

$$G'_{o,r}(x,t) = \frac{2F_r(x)}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{(x-Ut)^2}{2\sigma_x^2}\right] \exp\left[-\frac{h(x)^2}{2\sigma_z^2}\right], \quad (3.2)$$

$$G_{o,r}(x) = \int_0^{\infty} G'_{o,r}(x,t) dt = \frac{F_r(x)}{\pi \sigma_y \sigma_z U} \exp\left[-\frac{h_{эфф}^2(x)}{2\sigma_z^2}\right], \quad (3.3)$$

$Q_{o,r}$  – величина мгновенного выброса радионуклида  $r$ , Бк,

$G'_{o,r}(x,t)$  – фактор разбавления мгновенного выброса в атмосфере, м<sup>-3</sup>,

$G_{o,r}(x,t)$  – временной интеграл от мгновенного фактора разбавления (с/м<sup>3</sup>) (далее «фактор разбавления»), с/м<sup>3</sup>,

$h(x)$  - высота центра облака выброса над поверхностью земли на расстоянии  $x$  от точки выброса, м,

$h_{эфф}(x)$  - эффективная высота источника выбросов, м,

$U$  - скорость ветра на высоте выброса, м/с,

$F_r(x)$  – фактор истощения радиоактивного облака для радионуклида  $r$  на расстоянии  $x$  по ветру (безразмерная величина, описывающая изменение интегрального количества выброшенного радионуклида  $r$  с расстоянием от места выброса, уменьшающегося за счет радиоактивного распада, сухого осаждения и вымывания его из облака осадками),

$\sigma_x = \sigma_y$  и  $\sigma_z$ , – зависящие от расстояния дисперсии облака выброса в направлении движения облака по ветру  $x$ , в горизонтальном направлении поперек ветра  $y$  и в вертикальном направлении  $z$ .

Формула (3.3) дает максимально возможные в данных условиях значения интеграла концентрации на расстоянии  $x$  от места выброса (на оси траектории движения облака выброса).

В методике МПА-98 используется аппроксимация формул Смита-Хоскера ( $\sigma_z$ ) и Бриггса ( $\sigma_y$ ), согласно которой обе эти функции могут быть рассчитаны по следующей общей формуле:

$$\sigma(x, z_0, P) = \frac{x}{\sqrt{a(z_0, P) + b(z_0, P)x}}, \quad (3.4)$$

где  $z_0$  - параметр шероховатости подстилающей поверхности, задаваемый таблично для различных типов поверхностей, а  $P$  – параметр устойчивости Смита.

Выражения для вычисления функций  $a$ ,  $b(z_0, P)$  имеют следующий вид:

$$a(z_0, P) = a_0 \cdot a_1(P) \cdot (z_0)^{a_2(P)},$$

$$a_1(P) = P^{\alpha_1 + \alpha_2 P + \alpha_3 P^2},$$

$$a_2(P) = \beta_1 + \beta_2 P + \beta_3 P^2,$$

$$b(z_0, P) = 10^{b_1(P) + b_2(P) \lg(z_0) + b_3 \lg^2(z_0)},$$

$$b_1(P) = \gamma_1 + \gamma_2 P + \gamma_3 P^2,$$

$$b_2(P) = \delta_1 + \delta_2 P + \delta_3 P^2, \quad (3.5)$$

где численные значения всех входящих коэффициентов, также как и  $z_0$ , задаются таблично (отдельно для  $\sigma_z$  и  $\sigma_y$ ).

В связи с тем, что имеющиеся методики расчета характеристик устойчивости атмосферы ориентированы на вычисление категорий устойчивости Паскуилла-Гиффорда, в МПА-98 предлагается использование таблицы взаимосвязи параметра  $P$  и такого рода категорий устойчивости, а при расчетах  $\sigma_z$  в методике используется ограничение:  $\sigma_z^{max} < \sigma_z^{max}$ , причем  $\sigma_z^{max}$  также заданы таблично.

Для вычисления эффективной высоты источника в случае перегретого выброса  $\Delta T > 0$  (относительно температуры воздуха) в МПА-98 предложено использовать приведенные ниже формулы для расчета «эффективной высоты подъема струи»  $h_{эфф}(x)$ , справедливые для  $U > 0$ .

Для категорий устойчивости А - С:

$$h_{эфф}(x) = h + \left[ \frac{3}{2US\beta^2} \left\{ M_0(A_t^2 + B_t) + F_0 \frac{(A_t - B_t)}{S} \right\} + \left( \frac{R_0}{\beta} \right)^3 \right]^{1/3} - \frac{R_0}{\beta} - \Delta h \quad (3.6)$$

Для категории устойчивости D:

$$h_{эфф}(x) = \left[ \frac{3}{2U(\beta f)^2} \left\{ fM_0 + F_0 - [fM_0 + F_0(1 + ft)] \exp(-ft) \right\} + \left( \frac{R_0}{\beta} \right)^3 \right]^{1/3} + h - \frac{R_0}{\beta} + \Delta h \quad (3.7)$$

Для категорий устойчивости E - F:

$$h_{эфф}(x) = \left[ \frac{3}{2U(\beta S)^2} \left\{ SM_0 + F_0 - [SM_0(Si - Co) - F_0(Si + Co)] A_t \right\} + \left( \frac{R_0}{\beta} \right)^3 \right]^{1/3} + h - \frac{R_0}{\beta} + \Delta h, \quad (3.8)$$

где:

$$A_t = \exp(-St), \quad B_t = 0.5[1 - \exp(-2St)], \quad Si = \sin(St), \quad Co = \cos(St).$$

Причем здесь:

$$F_0 = \frac{g}{T_a} \Delta T W_0 R_0^2 \quad - \text{начальный поток плавучести } (g \approx 9,8 \text{ м/с}^2 \text{ - ускорение}$$

свободного падения),

$T_a$  - средняя температура воздуха,

$M_0 = W_0^2 R_0^2$  - начальный поток момента,

$R_0$  - радиус отверстия источника,

$\Delta T$  - перегрев,

$W_0$  - начальная скорость газовой смеси,



$\beta = g/T \approx 1/30 \text{ м}/(\text{с}^2 \cdot \text{К})$  – геофизическая константа,

$$f = 0.710^{-2},$$

$$S = \frac{g}{T} \left( \frac{\partial T}{\partial z} + \gamma_a \right) > 0 \quad - \quad \text{нормированный градиент потенциальной}$$

температуры ( $\gamma_a = 9,8 \cdot 10^{-3}$  град/м - сухоадиабатический градиент).

При этом вводится поправка на динамическое влияние трубы:

$$\begin{aligned} \Delta h &= 0, & W_0/U &\geq 1.5 \\ \Delta h &= 6(1.5 - W_0/U)R_0, & W_0/U &< 1.5 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Интенсивность вымывания на землю примеси, содержащейся в облаке, во время выпадения осадков, зависит не от приземной концентрации, а от ее интегрального содержания в столбе воздуха, "промываемого" осадками на всем пути движения капель (или снежинок) через толщу облака выброса. Поэтому для учета этого фактора требуется знание не приземной концентрации примеси, а интеграла по вертикальному профилю ее распределения в облаке:

$$G_{o,r}^z(x) = \int_0^{\infty} G_r(x, z) dz = \frac{F_r(x)}{\sqrt{2\pi\sigma_y}U}, \quad (3.10)$$

где  $G_r(x, z)$  – разовый фактор разбавления концентрации на высоте  $z$  над уровнем земли.

Разовые выпадения на поверхность земли радионуклида  $r$  на расстоянии  $x$  от источника выброса рассчитываются по формуле:

$$C_{s,r}(x) = Q_{o,r} \left[ V_{g,r} G_{o,r}(x) + \Lambda G_{o,r}^z(x) \right], \quad (3.11)$$

где

$V_{g,r}$  – скорость сухого осаждения на поверхность земли (м/с),

$\Lambda$  – постоянная вымывания примеси из атмосферы осадками (1/с), рассчитываемая по формуле:

$$\Lambda(I) = k_r k_0 I \quad (3.12)$$

в зависимости от интенсивности осадков  $I$  (мм/час),  $k_r = 1 \cdot 10^{-5}$  ч/(мм·с) стандартной величины абсолютной вымывающей способности дождя (для всех радионуклидов,

кроме инертных газов) и  $k_0$  - относительной вымывающей способности осадков других типов (Таблица 3.9 [6]).

Функция истощения облака  $F_r(x)$  за счет влажного вымывания в соответствие с формулой (3.37) МПА-98 [6]:

$$F_r(x) = \exp(-\Lambda \cdot x / U) \quad (3.13)$$

В качестве альтернативы описанному выше методу расчета постоянной вымывания по формуле (3.13) при оценке вымывания радиоактивной примеси привлекается также метод расчета этой величины из [3] (Рисунок 3 [3]). В основу этого метода положены зависимости  $\Lambda(I)$  от параметра  $A_R = R_a^2 \cdot \rho_a$ , где  $R_a$  - радиус вымываемых капель влаги, а  $\rho_a$  - их плотность (Рисунок 3-1).

Полная функция истощения облака (с учетом сухого и влажного осаждения) принимает вид:

$$F_r(x) = \exp \left[ -\Lambda \cdot x / U - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{V_g}{U} \int_0^x \frac{1}{\sigma_z(x)} \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) dx \right], \quad (3.14)$$

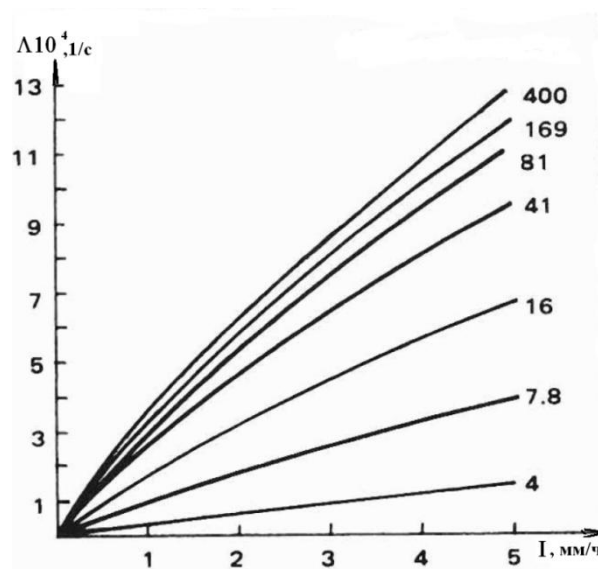


Рисунок 3-1 – Зависимость  $\Lambda(I, A_R)$  согласно рисунку 3 из [3]

### 3.2 Обобщение методики МПА-98 на случай учета застройки

Методика ДВ-98 [58] 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...» (раздел П4.6 [58]).

С учетом формулы (3.4) величина  $R_0$  должна определяться отдельно для рассеяния в поперечном и вертикальном направлениях из следующего уравнения

$$\Sigma_{y,z}(R) = \frac{R + R_0^{(y,z)}}{\sqrt{a_{y,z}(z_o, P) + b_{y,z}(z_o, P)(R + R_0^{(y,z)})}} \quad (3.15)$$

где  $\Sigma_{y,z}(R)$  поперечные направлению ветра стандартные отклонения частиц в горизонтальном (по  $y$ ) и вертикальном (по  $z$ ) направлении на расстоянии  $R$  по направлению ветра от точки выброса (Рисунок 3-2). Решение уравнения (3.15) относительно  $R_0^{(y,z)}$  имеет следующий вид:

$$R_0^{(y,z)} = \frac{1}{2} \Sigma_{y,z}^2 b_{y,z} - R + \sqrt{a_{y,z} \Sigma_{y,z}^2 + \frac{1}{4} \Sigma_{y,z}^2 b_{y,z}^2} \quad , \quad (3.16)$$

и используется в последующих расчетах факторов разбавления.

Таким образом, основная проблема учета зданий при использовании МПА-98 состоит в построении методики расчета начального разбавления облака примеси в форме стандартных отклонений  $\Sigma_{y,z}(R)$ , для чего требуется привлечь трехмерную гидродинамическую модель обтекания зданий на масштабах промплощадки [59].

В основу построения алгоритмов расчета активности радионуклидов в данном исследовании 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 [35 - 37, 60]. От аналогичных моделей, описанных в литературе и широко применяемых за рубежом для решения прикладных задач, реализованную нами комбинацию ГДМ+МК моделей отличает их внутренняя согласованность по отношению к расчету вторых односточечных моментов турбулентных пульсаций скорости и лагранжевых характеристик турбулентности.

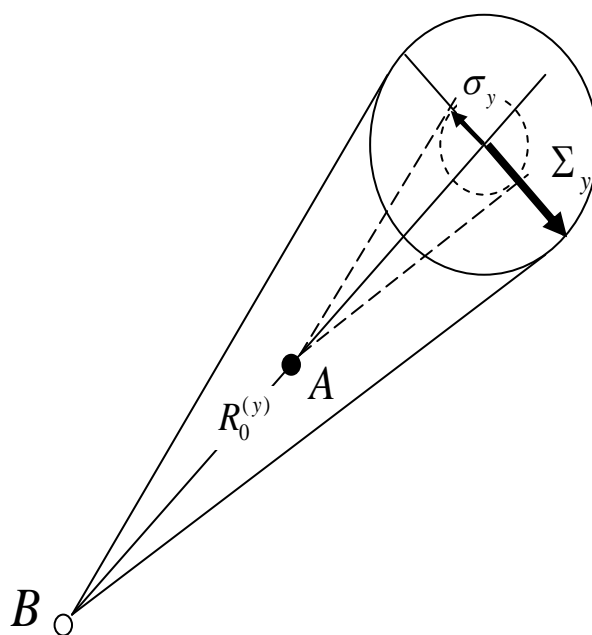


Рисунок 3-2 - Схема, поясняющая расположение виртуального источника (В) по отношению к истинному (А), выбираемое из условия (3.16)

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 поступающей по каналам связи в реальном масштабе времени). Ее описание и результаты верификации представлены в работе [61]. 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 их 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.

На основании статистической обработки количества и координат частиц на заданном удалении  $R$  вдоль направления среднего ветра как раз и производился расчет стандартного отклонения облака частиц примеси  $\Sigma_{y,z}(R)$ , входящего в формулу (3.16), задающую, таким образом, поправку в гауссову модель турбулентной диффузии радионуклидов.

### **3.3 Результаты исследования влияния застройки промплощадки на рассеяние кратковременных выбросов Ленинградской АЭС-2**

Рассмотрим результаты применения разработанной технологии оценки влияния застройки на рассеяние выбросов при проектировании Ленинградской атомной станции (ЛАЭС-2) в г. Сосновый Бор Ленинградской области [59].

С использованием данных о застройке промзоны в форматах ГИС ArcView 3.2 была создана цифровая модель ландшафта промплощадки и окружающей местности, общая конфигурация которой представлена на рисунке 3-3.

В качестве источника кратковременного выброса рассматривался источник единичной мощности, размещаемый на высотах 30 и 100 м. В связи с тем, однако, что при расчете диффузии примеси с учетом застройки, источник может располагаться лишь в свободном от зданий пространстве, было выбрано несколько вариантов его пространственного расположения.

Источники с условными номерами 1, 2 и 3 располагались на минимально возможных для данного расчета расстояниях от внешнего ограждения реакторного корпуса, соответствующих удвоенному шагу расчетной сетки (около 8 м) в углах

равностороннего треугольника с центром на оси реакторного корпуса (рисунок 3-3).

На рисунке 3-4 приведено расчетное поле временного интеграла от мгновенного фактора разбавления для выброса № 1 на высоте 15 м. Как можно видеть, в этом случае наблюдается эффект раздвоения факела при его взаимодействии с градирней. Подобные эффекты приводят, в итоге, к заметному росту поперечной дисперсии частиц примеси. Из этого, в частности, следует, что влияние застройки проявляется, в первую очередь, в отклонении расчетных значений от окружностей, причем характер отклонения зависит здесь от местоположения источника.

Для иллюстрации этого эффекта на рисунке 3-5 приведены примеры расчета величин  $\Sigma_y(R)$  при  $R=1000$ м для различных направлений ветра в форме «розы сигм» для источников №1-3 в окрестности южного реакторного корпуса 1-й очереди ЛАЭС-2 на высоте 30м. Результаты наглядно свидетельствуют, каким образом эти величины зависят от направления ветра. Особенно это касается источника №1, для которого значения  $\Sigma_y(R)$  при  $R=1000$ м при северном ветре оказываются на 30% больше, чем при юго-восточном.

Наконец, на рисунке 3-6 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.

Таким образом, 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.

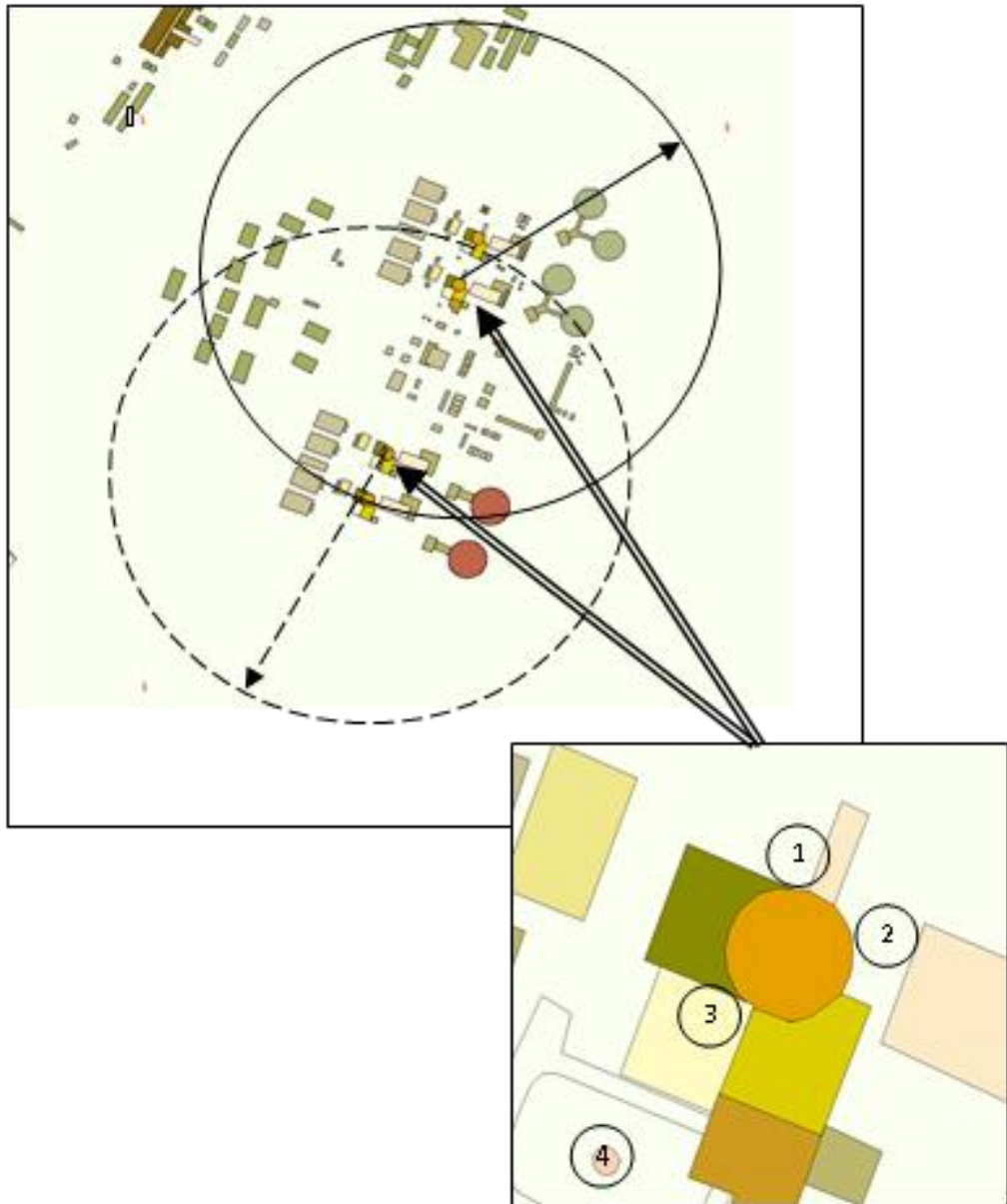


Рисунок 3-3 - Участок территории ЛАЭС-2. Сплошной линией выделена круговая область с радиусом  $R=1000$  м с центром в точке расположения южного реакторного корпуса 1-й очереди ЛАЭС-2, а пунктиром – аналогичная круговая область с центром в точке расположения северного реакторного корпуса 2-й очереди. 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).



Рисунок 3-4 - Расчетное поле временного интеграла от мгновенного фактора разбавления (цифры у кривых – множитель к  $10^{-6}$  с/м<sup>3</sup>) на высоте 2 м для источника выброса № 1 на высоте 15 м: без учета (слева) и с учетом застройки (справа) по модели ГДМ+МК



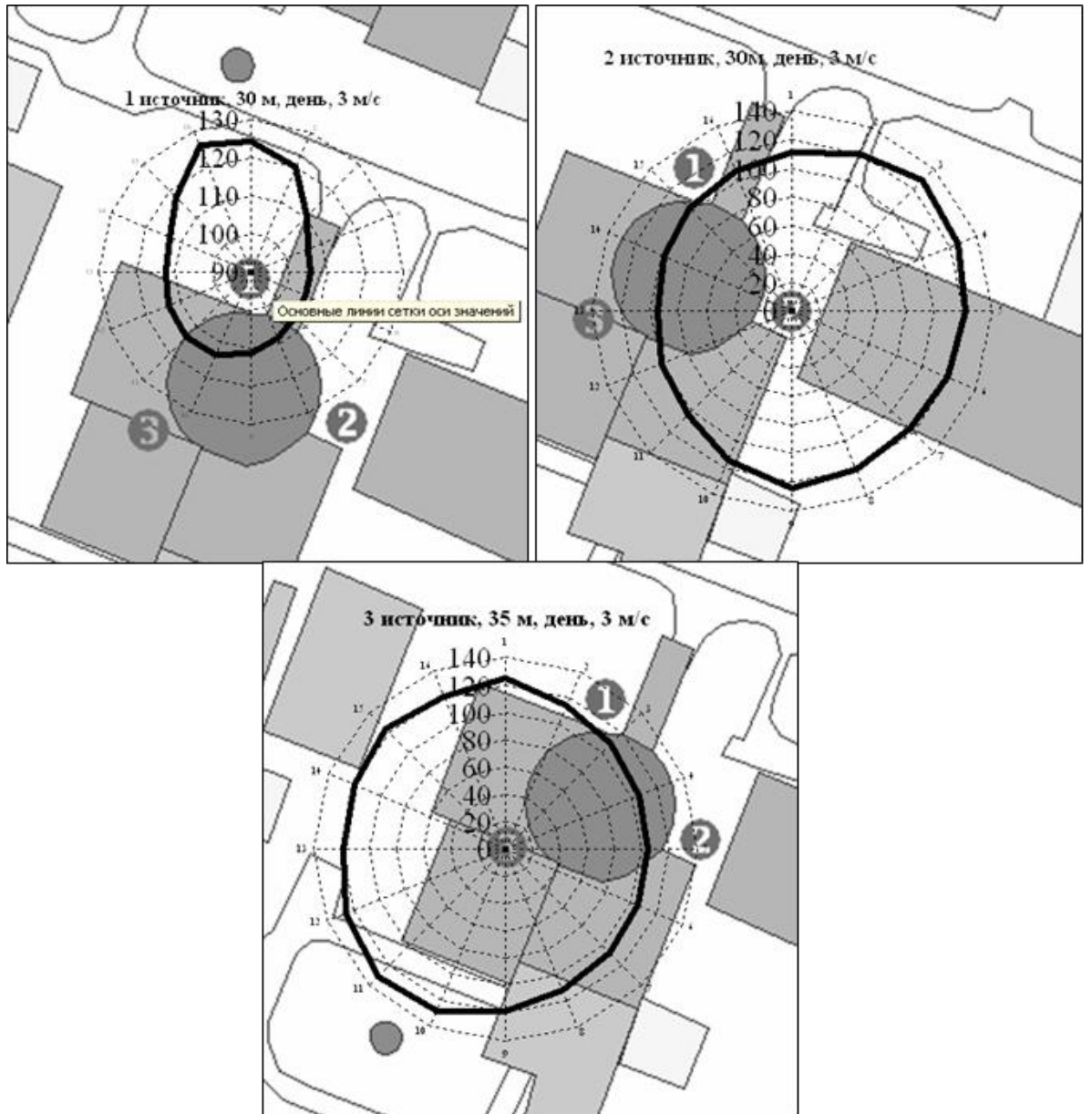


Рисунок 3.5 - Пример расчетных значений  $\Sigma_y(R)$  при  $R=1000$  м для различных направлений ветра в форме «розы сигм» для источников №1-3 в окрестности южного реакторного корпуса 1-й очереди ЛАЭС-2 на высоте 30 м (дневные условия, модуль скорости ветра – 3 м/с). Цифры на рисунке определяют значения  $\Sigma_y(R)$  в метрах.

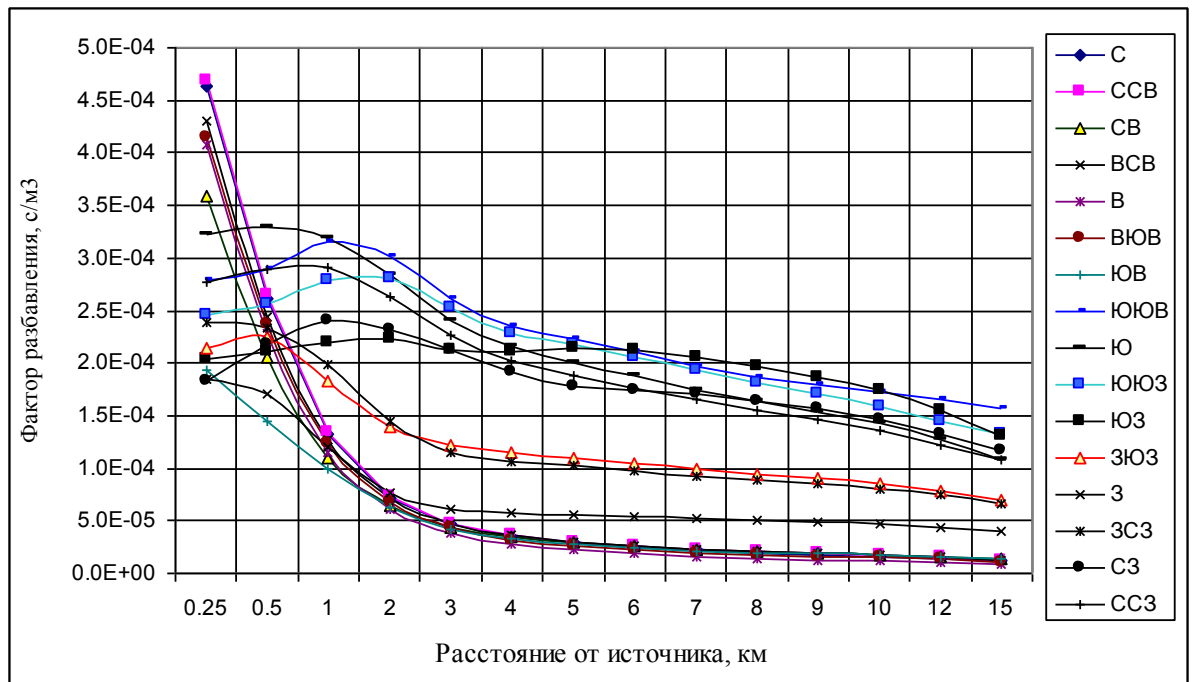
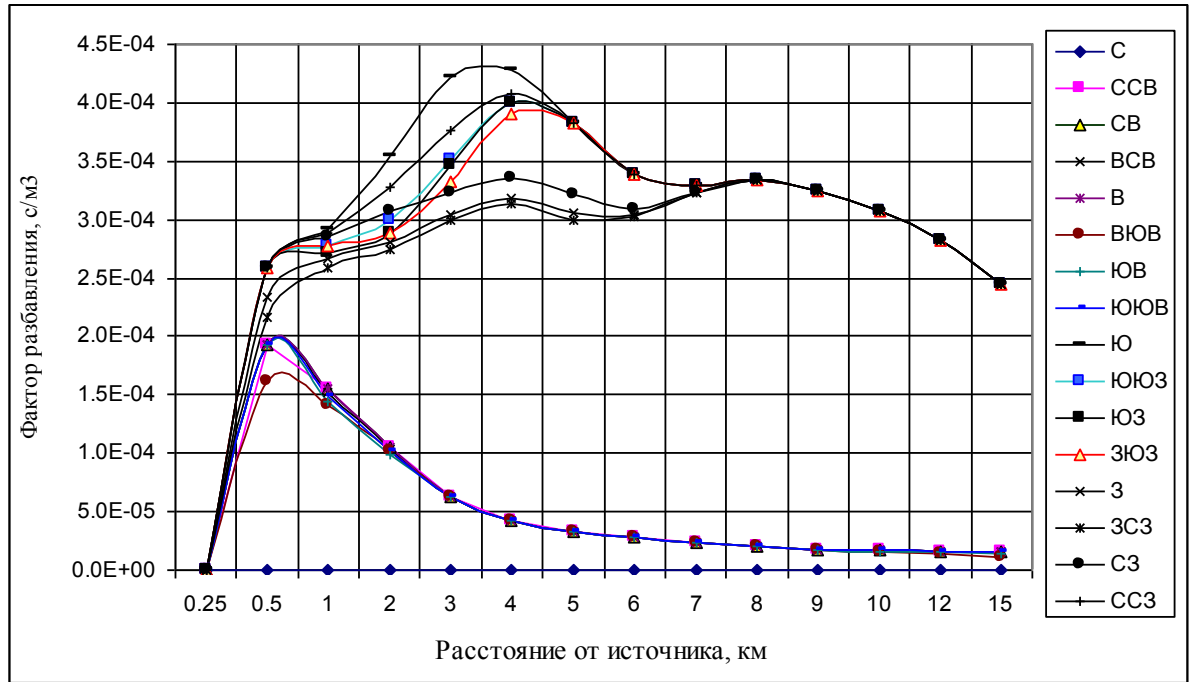


Рисунок 3-6 – Результаты расчета максимальных значений фактора разбавления обеспеченности 99,5 % с осреднением 1 ч по 16 основным румбам ветра для источника в точке №1 (высота 30 м) около южного реакторного корпуса первой очереди ЛАЭС-2 без учета (наверху) и с учетом застройки промзоны (внизу).

### 3.4 Статистическая обработка расчетных значений факторов разбавления и осаднения

Как уже отмечалось в п. 1.1, 1.3.3, в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ (раздел 2 [1]) и российскими НД (п. 5.4 НП-032-01 [2]) оценка радиационных рисков для населения при проектных и запроектных авариях должна выполняться для наименее благоприятных условий рассеяния радионуклидов в атмосфере, характерных для района размещения АЭС.

В качестве «**наихудших условий рассеяния выброса**» в соответствии с подходом, принятым в разделе 4 [3], разделе 2.1 [6] и [26], для анализа радиационных последствий аварий в проектах новых АЭС используются результаты статистической обработки метеоданных района размещения станции, определяются **максимальные на часовом интервале приземные концентрации и выпадения на почву обеспеченности 99,5 % для проектных аварий и обеспеченностью 95 % для запроектных аварий, осредненные по временным интервалам 1, 8, 16 и 24 ч.**

Для площадки АЭС в результате расчета максимальных значений факторов разбавления и осаднения той или иной обеспеченности (95 и 99,5 %) с осреднением за 1 ч для каждого из 16 секторов шириной  $22,5^\circ$  в окрестности каждого из основных румбов и для каждого фиксированного значения  $x$  формируются генеральные совокупности соответствующих значений функций  $G_0$ ,  $C_0(x)$ .

Типичный пример эмпирической функции распределения для фактора разбавления представлен на рисунке 3-7. Как видно из рисунка, функция распределения здесь является ступенчатой. Это связано с тем обстоятельством, что генерируемые в процессе расчетов ряды факторов разбавления/осаднения обладают 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).

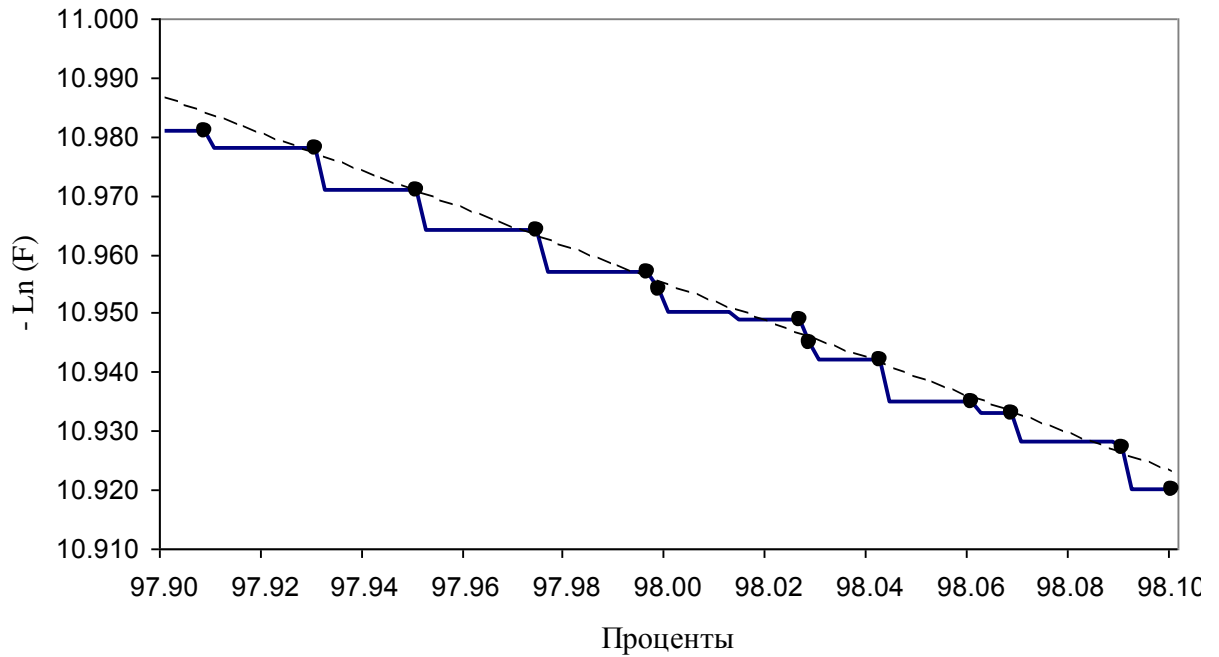


Рисунок 3-7 - Пример расчета фрагмента функции распределения фактора разбавления  $F$  в шкале  $[-\ln(F), -\ln(-\ln(1-P))]$ , где  $P$  – вероятность в долях единицы (оцифровка дана для  $P$ , %). Точками выделены «ступеньки» перехода от одного однородного поля значений к другому, а пунктирная линия – 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)

Таким образом, получение процентильных оценок непосредственно из эмпирических функций распределения и, тем более, так называемых «оггибающих» - максимальных величин во всей выборке, приводит к множеству неопределенностей. Поскольку описанный выше эффект «ступенек» проявляется на разном удалении от источника различным образом, то, в итоге, это находит отражение в появлении случайных флуктуаций в расчетных дистанционных зависимостях процентилей (прежде всего процентиля 99,5 %), что совершенно недопустимо для статистической характеристики. Иначе говоря, метод статистической обработки нуждается в этом случае в существенном уточнении.

Для получения статистически обеспеченных характеристик редких событий в прикладной статистике и климатологии разработан специальный метод сглаживания значений функций распределения в диапазоне вероятностей редких событий, основанный на ее аппроксимации функцией следующего вида (распределение Вейбулла) [62]:

$$F(X) = 1 - \exp(-\alpha X^\beta), \quad (3.17)$$

где значения неизвестных коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$  в данном случае определяются методом наименьших квадратов по эмпирическим значениям функции распределения для каждого сектора ветра и каждого расстояния от источника. Подобная аппроксимация для множества метеорологических явлений (заморозки, экстремальные значения скорости ветра и температуры и т.д.) оказывается весьма универсальной и позволяет прогнозировать экстремальные значения редких событий (возможных раз в 50 или 100 лет), даже в той ситуации, когда их периодичность превышает длину всего ряда наблюдений.

То факт, что линейный тренд по всем точкам на рисунке 3.7 в системе координат  $[-\ln(F), -\ln(-\ln(1-P))]$  достаточно хорошо аппроксимирует функцию распределения фактора разбавления свидетельствует о применимости распределения Вейбулла и в нашем случае.

Второй серьезной проблемой статистической 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 получения аналогичных значений с осреднением более, чем за 1 ч, требуется некоторое обобщение принятой схемы расчетов, поскольку за время 8, 24 и 48 ч, направление ветра может меняться таким образом, что усредняемые значения часовых средних функций  $G_0$ ,  $C_0(x)$  будут располагаться уже в различных

секторах. Для иллюстрации на Рисунке 3-8 приведены примеры такого осреднения за 1, 8, 24 и 48 ч для фактора разбавления на 15 ч 15 июля 2005 г. Как можно видеть из данного примера, указанный эффект фактически начинает проявляться со времени осреднения 8 ч.

Таким образом, в качестве объекта статистического анализа здесь уже не могут рассматриваться осевые значения факторов разбавления и осаждения, а для каждой ситуации требуется рассчитать полностью двумерное поле каждой из этих функций, осредненное за заданный период времени. Математическое определение такого рода объектов можно дать следующим образом:

$$G_o^{(m)}(x, y, t) = \frac{1}{m} \sum_{k=t-\frac{m}{2}}^{k=t+\frac{m}{2}} \frac{1}{\pi \sigma_y^{(k)} \sigma_z^{(k)} U_h^{(k)}} \exp \left[ -\frac{h^2}{2(\sigma_z^{(k)})^2} - \frac{y^2}{2(\sigma_y^{(k)})^2} \right] \quad (3.18)$$

$$C_o^{(m)}(x, y, t) = \frac{1}{m} \sum_{k=t-\frac{m}{2}}^{k=t+\frac{m}{2}} \frac{\Lambda^{(k)}}{\sqrt{2\pi} \sigma_y^{(k)} U_h^{(k)}} \exp \left[ -\frac{y^2}{2(\sigma_y^{(k)})^2} - \Lambda^{(k)} \frac{x}{U_h^{(k)}} \right], \quad (3.19)$$

где  $m = 8, 24, 48$  ч – время осреднения, а  $t$  - текущее время суток.

Формулы (3.18), (3.19) представляют собой формулы скользящего сглаживания, причем все параметры атмосферы, определяющие перенос, рассеяние и вымывание примеси должны здесь задаваться для текущего времени  $k$ . Если метеоусловия за все время осреднения не изменяются, эти формулы дадут одиночные факелы, осевые значения факторов разбавления и осаждения, на оси которых совпадут с теми, которые могут быть рассчитаны без осреднения.

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 огрублялся с достижением той степени связности, который демонстрировали ряды расчетных значений факторов разбавления осаждения (примерно 90% повторяющихся значений). Результаты тестирования в зависимости от длины исходного ряда и времени осреднения представлены в Таблице 3-1.

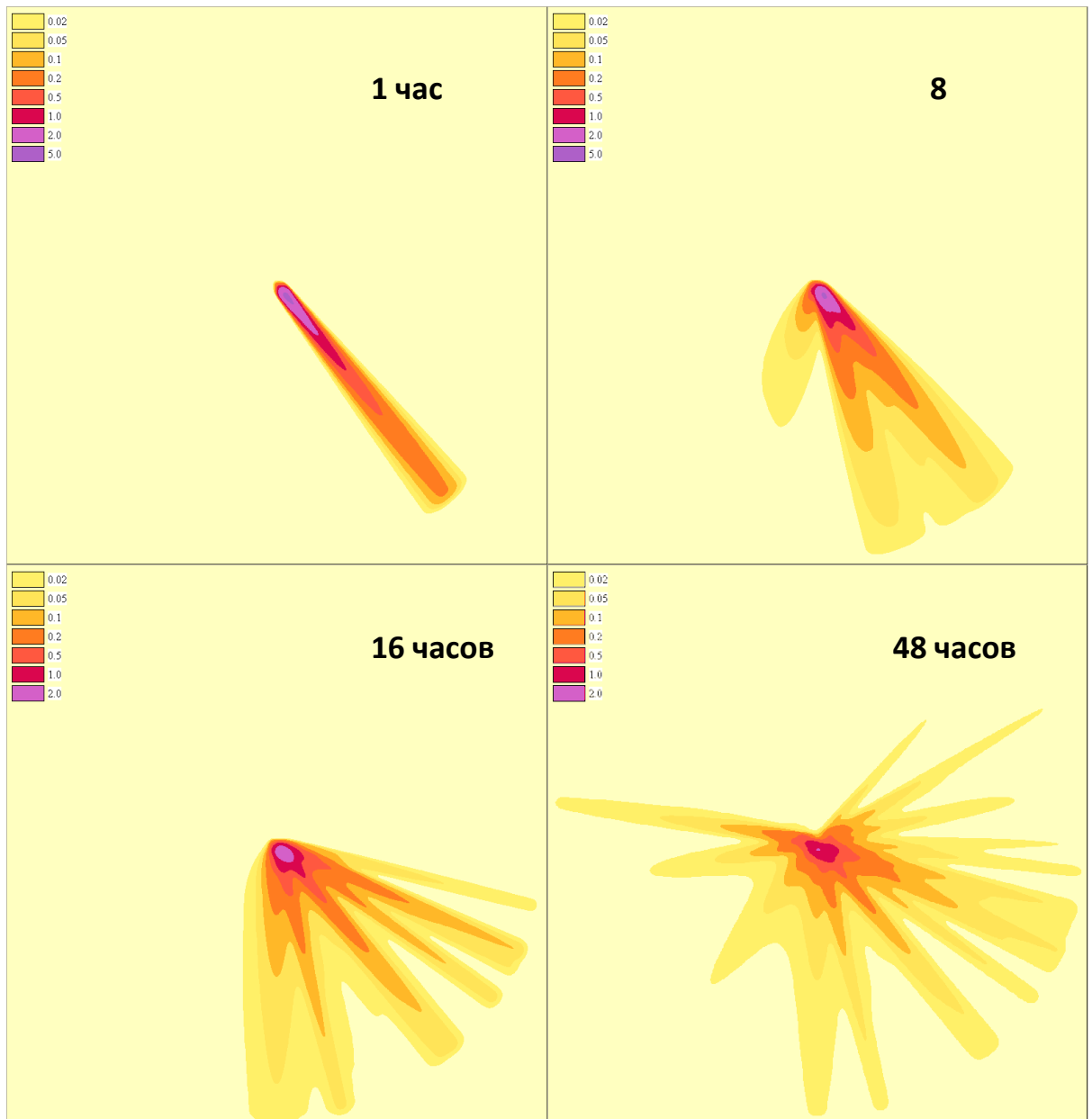


Рисунок 3-8 - Пример расчета фактора разбавления (умноженного на  $10^6$ ,  $\text{с}/\text{м}^3$ ), от источника высотой 30 м на 15 ч 15 июля 2005 г. с различным временем осреднения (1, 8, 24 и 48 ч)

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%

Таблица 3-1 – Среднеквадратичные по 16 рубмам значения относительных погрешностей расчетных значений перцентилей (%) и группировки по рубмам ( $\sigma$  - среднеквадратическое отклонение,  $K_s$  – полуширина окна сглаживания,  $E$  – погрешность группировки по рубмам, %)

	N=5000		N=10000		N=20000		N=50000	
Без осреднения								
$\sigma$	1		1		1		1	
$E$	5.7		3.5		2.5		1.4	
$K_s$	Тест	95 %	Тест	95 %	Тест	95 %	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 %	Тест	99.5 %	Тест	99.5 %	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								
$\sigma_8$	0.14		0.14		0.14		0.14	
$E$	5.05		3.4		2.34		1.33	
$K_s$	Тест	95 %	Тест	95 %	Тест	95 %	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 %	Тест	99.5 %	Тест	99.5 %	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								
$\sigma_{24}$	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 %	Тест	95 %	Тест	95 %	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 %	Тест	99.5 %	Тест	99.5 %	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

для перцентилей 95 % и 3.0 % для 99.5%. Погрешности расчета перцентилей 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 связанных рядов. Это означает, что представленные в Таблице 3-1 значения ошибок могут рассматриваться как их верхние (консервативные) оценки.

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).

### **3.5 Выводы**

Предложен, реализован и апробирован для выбранных источников кратковременных выбросов вблизи реакторного отделения блока 3 ЛАЭС-2 метод учета влияния застройки на факторы разбавления и осаждения радиоактивной примеси, основанный на расширении возможностей нормативной методики МПА-98.

Для получения статистически обеспеченных расчетных оценок уровней 99 % и выше применен метод аппроксимации значений функции распределения степенной зависимостью в диапазоне вероятностей редких событий.

На конкретных примерах показано, что учет застройки приводит к систематическому снижению факторов разбавления (до 5 раз в случае максимальных значений фактора разбавления обеспеченности 95 %).

## **ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ РАССЕЯНИЯ ВЫБРОСОВ И ДОЗ ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ ПРИ АВАРИЯХ НА АЭС**

Необходимость разработки специализированных ПС для расчета параметров рассеяния краткосрочных выбросов и доз для населения при авариях на АЭС 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 [18], РД-03-33-2008 [63], РД-03-34-2000 [64]).

### **4.1 Разработка и верификация ПС “RiskZone v.1.0” для расчета факторов разбавления/осаждения аварийных выбросов АЭС**

Методические подходы и разработанные численные алгоритмы, изложенные в главах 2 и 3, реализованы в ПС “RiskZone v.1.0” [65]. Результаты расчетов ПС “RiskZone v.1.0” служат входными данными для ПС “ДОЗА 3.0”, предназначенного для последующего расчета дозовых нагрузок на население и радиационного риска.

Программное средство (ПС) “RiskZone v.1.0” предназначено для расчета максимальных факторов разбавления/осаждения примесей выбросов радиоактивных веществ при наименее благоприятных условиях рассеяния в атмосфере с заданной обеспеченностью 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 гидрометеонаблюдений и данных реанализа.

ПС “RiskZone v.1.0” успешно прошло экспертизу в научно-техническом центре ядерной и радиационной безопасности (НТЦ ЯРБ) при Ростехнадзоре РФ и аттестовано для проектных расчетов факторов разбавления/осаждения радиоактивных выбросов АЭС в окружающую среду (паспорт аттестации № 368 от 18.03.2015 г.). ПС применяется для обоснования безопасности ОИАЭ,

представляемых в Ростехнадзор в рамках процедуры лицензирования на различных этапах жизненного цикла атомных станций (проектирование, размещение, сооружение, ввод в эксплуатацию и т.д.).

В соответствии с требованиями НД (в том числе пп. 5.1, 5.2, 5.4, 5.7-5.11 НП-032-01 [2]; п.5.24, 5.25, 11.3 СП АС-03 [24]; п. 4.2 СП 2.6.1.2216-07 [66]; МТ 1.2.5.05.0110-2012 [67]) ПС применяется при подготовке исходных данных для анализа радиационных последствий аварий на атомных станциях (оценка наихудших условий рассеяния, характерных для района размещения атомной станции, с определенной обеспеченностью в зависимости от расстояния и направления от источника) с целью:

- подтверждения соответствия проектных, конструкторских и технологических решений законодательству РФ в области использования атомной энергии, требованиям федеральных норм и правил в области использования атомной энергии при осуществлении лицензируемого вида деятельности;
- обоснования полноты мер технического и организационного характера по обеспечению безопасности при осуществлении лицензируемого вида деятельности;
- выполнения требований по обеспечению безопасности планов мероприятий по защите населения в случае возникновения аварии и готовности к выполнению мероприятий;
- подтверждения наличия и готовности сил и средств для ликвидации чрезвычайных ситуаций при возникновении ядерной и радиационной аварии на объекте;
- способности обеспечить условия безопасного прекращения лицензируемого вида деятельности и вывода атомной станции из эксплуатации.

#### **4.1.1 Назначение ПС “RiskZone v.1.0”**

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, основанную на данных о

скорости ветра в приземном слое, процессах очищения атмосферы и предварительно рассчитанных значениях категорий устойчивости Пэскуилла-Гиффорда [3 - 6, 68].

Для оценки классов устойчивости атмосферы реализован как метод Пэскуилла-Гиффорда, рекомендованный документом МАГАТЭ [3], так и метод Пэскуилла-Гиффорда-Тернера, модифицированный Росгидрометом для условий России [69, 70].

При отсутствии данных градиентных измерений привлечен метод, основанный на синтезе информации по одноуровневым стандартным метеорологическим наблюдениям и синхронным данным реанализа атмосферных процессов на стандартных изобарических поверхностях 925, 850 и 700 гПа с использованием численной модели суточных колебаний температуры в приземном слое [49, 50]. Используемые для проведения расчетов параметры стандартных гидрометеорологических и (или) натуральных градиентных наблюдений должны соответствовать требованиям [71].

#### **4.1.2 Модули ПС “RiskZone v.1.0”**

Программное средство “RiskZone v.1.0” включает следующие модули:

- Объектные модули Pasquill и TurnerIEM для обработки стандартных метеоданных для расчета категорий устойчивости Пэскуилла-Гиффорда, включающие два метода расчета категории устойчивости (Пэскуилла [68] и Тернера с поправками ИЭМ [69, 70]);
- Объектный модуль GradClass для обработки градиентных измерений для расчета категорий устойчивости Пэскуилла-Гиффорда;
- Объектный модуль F\_MPA для расчета факторов разбавления/осаждения по методике МПА-98;
- Объектный модуль StatAvRumb для статистической обработки расчетных факторов разбавления/осаждения с определенной обеспеченностью;
- Исполняемый модуль PblGrad для расчета данных о температуре и скорости ветра на двух уровнях для замены отсутствующих градиентных измерений на основе синтеза архивов реанализа атмосферных процессов

на стандартных изобарических поверхностях и данных стандартных гидрометеорологических измерений на метеостанции.

#### 4.1.2.1 Назначение модулей Pasquill и TurnerIEM

Модуль реализует классические методы Пэскуилла [3, 68] и Тернера (с поправками ИЭМ) [69, 70] приближенной оценки категории устойчивости Пэскуилла-Гиффорда, рекомендуемый в качестве одного из методов расчета категорий устойчивости в том случае, если для такого рода расчетов доступны только данные о средней скорости приземного ветра на высоте флюгера (10 м), получаемые в рамках стандартных гидрометеорологических измерений на обычных метеостанциях.

Наиболее часто данные методы используются при получении разнообразных статистик как собственно самих категорий устойчивости, так и получаемых на их основе с использованием гауссовой модели разнообразных характеристик загрязнения атмосферы, в том числе и факторов разбавления/осаждения.

Основное требование по качеству исходных данных состоит в том, чтобы удовлетворялись требования репрезентативности метеорологических наблюдений на метеостанции, определяемые в нормативных документах Росгидромета [71]. В соответствии с этими документами наблюдения проводятся каждые 3 часа в «синоптические сроки» и могут быть распространены на весьма обширную область пространства (десятки километров).

Метод целесообразно применять лишь на ранних стадиях исследования условий переноса и рассеяния примесей для конкретной территории, когда единственно доступной для подобных расчетов информации являются накопленные по измерениям на ближайшей метеостанции ряды наблюдений.

#### 4.1.2.2 Назначение модуля GradClass

Модуль реализует метод приближенной оценки категории устойчивости Пэскуилла-Гиффорда на основе использования соотношений теории подобия Мони́на-Обухова [28] для приземного слоя, адаптированный в [72] качестве одного из методов расчета категорий устойчивости, если для такого рода расчетов доступны данные градиентных измерений: значения скорости ветра и температуры

на двух произвольных высотах в приземном слое, получаемые в рамках специально организованных измерений на градиентной мачте.

Метод может использоваться при получении разнообразных статистик как собственно категорий устойчивости, так и получаемых на их основе с использованием методики МПА-98 разнообразных характеристик загрязнения атмосферы, в том числе и факторов разбавления/осаждения в том случае, если накоплен достаточный объем подобных измерений.

Метод может применяться лишь при организации градиентных наблюдений в пределах несколько десятков метров на горизонтально-однородной поверхности, причем линейный размер такого рода области однородности поверхности должен как минимум в 8 - 10 раз превышать высоту верхнего уровня измерений на градиентной мачте.

#### 4.1.2.3 Назначение модуля F\_MPA

Модуль реализует метод расчета факторов разбавления/осаждения с использованием методики МПА-98 [6] на основе данных о скорости ветра в приземном слое, а также предварительно рассчитанных значений категорий устойчивости Пэскуилла-Гиффорда.

Модуль предназначен для проведения массовых расчетов с использованием накопленных рядов исходных данных, включающих стандартные гидрометеорологические наблюдения (с использованием модулей Pasquill и TurnerIEM), либо градиентных наблюдений (с использованием модуля GradClass) либо синтезированных с использованием модуля PblGrad рядов стандартных гидрометеорологических наблюдений и данных реанализа применительно к последующей оценке максимальных значений факторов разбавления/осаждения на заданных дистанциях от точки выброса радионуклидов (расстояние от источника выброса до рецептора – от 100 м до 15 км).

Реализованные в данном модуле алгоритмы расчета факторов разбавления/осаждения могут использоваться лишь в атмосфере над относительно плоской подстилающей поверхностью, без учета влияния на рассчитываемые характеристики промышленной или жилой застройки (разделы 1.2 и 1.3 [6]).

В соответствии с п. В.1.1 «Методики определения размеров зон планирования защитных мероприятий в случае аварии на атомной станции» МТ 1.2.5.05.0110-2012 [67] при штилевых расчетах рекомендуется принимать скорость ветра на высоте флюгера равной 0,5 м/с с последующим применением формул Смита-Хоскера и Бриггса для стандартных отклонений  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z(x)$ .

#### 4.1.2.4 Назначение модуля StatAvRumb

Модуль предназначен для статистической обработки рядов расчетных значений факторов разбавления/осаждения, получаемых с использованием модуля F\_MPA и далее осредненных на временных интервалах, кратных 1 ч, в соответствии с подходом, принятым в [3, 6]. Обработка выполняется с целью получения для каждого заданного удаления от источника выброса определенной продолжительности в заданном секторе розы ветров максимальных значений осредненных факторов разбавления/осаждения заданной процентной обеспеченности (перцентилей).

#### 4.1.2.5 Назначение модуля PblGrad

Модуль реализует метод синтеза данных о среднесуточных значениях скорости ветра и температуры на стандартных изобарических поверхностях 925, 850 и 700 гПа, получаемых по данным реанализа атмосферных процессов, с данными стандартных гидрометеорологических измерений скорости ветра и температуры на метеостанции с использованием численной модели АПС, описание которой приведено выше в главе 2.

В результате работы модели на каждые полные сутки расчета на выходе получается ряд ежечасных значений скорости ветра и температуры на двух произвольных уровнях в приземном слое, которые далее обрабатываются модулем GradClass в составе ПС “RiskZone v.1.0”.

Метод может использоваться для восстановления отсутствующих исходных данных градиентных измерений для последующих расчетов категорий устойчивости Пэскуилла-Гиффорда с использованием модуля GradClass и факторов разбавления/осаждения с использованием модуля F\_MPA для любой точки земного шара, в которой имеется метеостанция.

## 4.2 Погрешность результатов расчета ПС «RiskZone v.1.0»

В рамках гауссовой модели без учета погрешности задания характеристик источника общая погрешность расчета ( $\Phi$ ) максимальных факторов разбавления/осаждения с заданной процентной обеспеченностью определяется следующими основными факторами:

- инструментальными ошибками в определении скорости ветра  $U$ ,
- погрешностями расчета категории устойчивости Пэскуилла-Гиффорда (далее номер  $K_p$  от 1 до 7) при обработке различных типов гидрометеоданных;
- заданием уровня шероховатости местности  $z_0$ , в том числе и его фиксацией во всей области исследования факторов;
- точностью воспроизведения ПС «RiskZone v.1.0» методики МПА-98 для часовых выбросов;
- точностью статистической обработки результатов моделирования при нахождении максимального фактора разбавления (длиной ряда наблюдений  $N$ ).

Справедлива запись:

$$\Phi = \Phi(U, K_p, Z_0, N), \quad (4.1)$$

или для вариаций:

$$\delta\Phi = \frac{\partial\Phi}{\partial U} \delta U + \frac{\partial\Phi}{\partial K_p} \delta K_p + \frac{\partial\Phi}{\partial Z_0} \delta Z_0 + \frac{\partial\Phi}{\partial N} \delta N. \quad (4.2)$$

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

$$\left| \frac{\delta\Phi}{\Phi} \right| \leq \left| \frac{\partial \ln \Phi}{\partial U} \delta U \right| + \left| \frac{\partial \ln \Phi}{\partial K_p} \delta K_p \right| + \left| \frac{\partial \ln \Phi}{\partial Z_0} \delta Z_0 \right| + \left| \frac{\partial \ln \Phi}{\partial N} \delta N \right|. \quad (4.3)$$

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:

$$D_U = \left| \frac{\partial \ln \Phi}{\partial U} \delta U \right|, \quad D_K = \left| \frac{\partial \ln \Phi}{\partial K_p} \delta K_p \right|, \quad D_Z = \left| \frac{\partial \ln \Phi}{\partial Z_0} \delta Z_0 \right|, \quad D_N = \left| \frac{\partial \ln \Phi}{\partial N} \delta N \right|. \quad (4.4)$$

Для этой цели использовались исходные данные к расчетам, выполненным для исследования параметров рассеяния аварийных выбросов Балтийской АЭС



(см. п. 4.1.3.1 выше). 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  $\delta U$  (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.

В итоге для фактора разбавления было получено:

- $D_u = 23.8$  % для удаления 1 км,
- $D_u = 16.4$ % для удаления 15 км.

Для фактора осаднения:

- $D_u = 13.6$ % для удаления 1 км,
- $D_u = 14.2$ % для удаления 15 км.

Для оценки  $D_k$  предварительно осуществлялся расчет относительной погрешности процентилей  $\delta_m$  с искусственным смещением категории устойчивости для каждого элемента ряда на  $m = 1, 2, 3$  градаций с последующим использованием формулы:

$$D_k = \sum_1^3 P_m \delta_m, \quad (4.4)$$

где  $P_m$  - вероятности ошибочного определения категории устойчивости со сдвигом на  $m$  градаций, определенные ранее на основе верификации модуля PblGrad при тех параметрах сетки, которые использовались в контрольном примере ( $\mu = 3$ ,  $\tau = 60$  с). В итоге оказались справедливыми результаты, представленные ниже в таблице 4-3 для фактора разбавления и в таблице 4-4 для фактора осаднения.

Таблица 4-3 – Погрешности и их вероятности при расчете процентилей 99.5 % фактора разбавления с ошибкой в категории устойчивости

$M$	1	2	3
$P_m$	0.28	0.08	0.03
Расстояние 1 км			
$\delta_m, \%$	1.6	32.5	56.4
Расстояние 15 км			
$\delta_m, \%$	39.6	68.4	76.1

Таблица 4-4 – Погрешности и их вероятности при расчете процентиля 99.5 % фактора осаднения с ошибкой в категории устойчивости

$M$	1	2	3
$P_m$	0.28	0.08	0.04
Расстояние 1 км			
$\delta_m, \%$	23%	32.5%	54.1%
Расстояние 15 км			
$\delta_m, \%$	18.5%	25.4%	48.9

Из данных таблиц нетрудно получить, что для фактора разбавления величину  $D_k$  для удаления 1 км можно оценить как  $D_k = 7 \%$ , а для 15 км - 23 %, а для фактора осаднения, соответственно, 12 и 9 %.

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 %). Расчеты показали, что при этом величину  $D_z$  для фактора разбавления можно оценить как 0.2 % для удаления 1 км и 3.8 % для удаления 15 км, а для фактора осаднения, соответственно, 2.1 % и 0.2 %.

Погрешность  $D_N$  задавалась на основе тестирования, результаты которого представлены в разделе 5.4 [65] для процентиля 99.5 %, получаемого без осреднения:  $D_N = 3.2 \%$ .

Таким образом, оказывается, что для фактора разбавления:

$$\left| \frac{\delta\Phi}{\Phi} \right| \leq 23.8 + 7 + 0.2 + 3.3 = 34.3 \% \text{ для удаления 1 км,}$$

$$\left| \frac{\delta\Phi}{\Phi} \right| \leq 16.4 + 23 + 3.8 + 3.3 = 46.5 \% \text{ для удаления 15 км,}$$

а для фактора осаднения:

$$\left| \frac{\delta\Phi_s}{\Phi_s} \right| \leq 13.6 + 12.1 + 2.1 + 3.3 = 31.1 \% \text{ для удаления 1 км,}$$

$$\left| \frac{\delta\Phi_s}{\Phi_s} \right| \leq 14.2 + 9.9 + 0.2 + 3.3 = 27.6 \% \text{ для удаления 15 км.}$$

С увеличением времени осреднения, согласно таблице 3-1, величины относительных погрешностей возрастают за счет увеличения связности рядов еще на 6 - 7 % (для перцентиля 95 % такого увеличения практически не происходит).

Проведенное исследование показало, что относительная погрешность факторов разбавления (осаждения) процентной обеспеченности 99.5 % во всех случаях не превосходит 47 % (32 %).

Общая чувствительность максимальных факторов разбавления/осаждения к погрешностям стандартных гидрометеорологических измерений и/или погрешностям градиентных измерений, а также к ошибке до 50 % в определении уровня шероховатости поверхности составляет, соответственно, не более 50 и 30 % соответственно.

Погрешность статистической обработки результатов расчета для оценки максимальных факторов разбавления/осаждения с обеспеченностью не выше 95 % не превышает 10 % при длине ряда метеорологических наблюдений и/или данных реанализа не менее 50000.

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.).

### **4.3 ПС «ДОЗА 3.0» для расчета доз для населения от газоаэрозольных выбросов АЭС**

#### **4.3.1 Назначение ПС «ДОЗА 3.0»**

Результаты расчетов в ПС “RiskZone v.1.0” факторов разбавления/осаждения краткосрочных выбросов, осредненных на заданных временных интервалах, с обеспеченностью 95 и/или 99,5 % используются в проектах АЭС при анализе радиационных последствий аварий, определении размеров и границ зон аварийного реагирования, объема защитных мер для населения в случае аварии на энергоблоке и для оценки соответствующих радиационных рисков.

Прогноз дозовых нагрузок в районе размещения АЭС выполняется в ПС «ДОЗА 3.0» [73].

Программа предназначена для расчета среднегодовых доз облучения лиц из 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 [4] и ДВ-98 [58], которые позволяют учесть прямые и косвенные пути воздействия возможного «загрязнения» окружающей среды на население. Методики включают 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 и МКРЗ [23, 74 - 77] и НРБ-99/2009 [22].

Расчет индивидуальных доз облучения выполняется для критической группы населения. При внутреннем облучении 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.

#### 4.3.2 Модули ПС «ДОЗА 3.0»

Программа «ДОЗА 3.0» написана на языке Delphi2007 и занимает около 200 кбайт дискового пространства.

Текст программы содержит три основные подпрограммы:

- *bbod* - запрос и считывание исходных данных,
  - блок расчета дозовых нагрузок,
  - *writ1p* - печать результатов в выходной файл
- и несколько вспомогательных процедур:
- *windsp* – учет изменения скорости ветра с высотой,
  - *rise* – расчет эффективной высоты выброса и средней скорости ветра с учетом подъема факела,
  - *dispersion1* – расчет стандартных отклонений распределения примеси в струе по методике «Интератомэнерго» [4],
  - *dispersion2* – расчет стандартных отклонений распределения примеси в струе по методике МПА-98 [6],
  - *met* – расчет максимальных (на оси струи) приземных концентраций радионуклидов по методике «Интератомэнерго» [4] или по методике МПА-98 [6],
  - *writ2p*, *writ2p2*, *writ2p3*, *writ2p4*, *writ3p*, *writ3p2*, *writ4p*, *writ5p*, *writf* – процедуры вывода расчетных таблиц в выходной файл,
  - *ernucl*, *ernucl2*, *comper*, *faute2* – выявление ошибок в задании исходных данных и печать соответствующих диагностических сообщений.

База данных ПС включает 105 радионуклидов.

#### 4.3.3 Методика расчета

Алгоритм программы «ДОЗА 3.0» реализует «Методику расчета распространения радиоактивных веществ с АЭС и облучения окружающего населения. НТД 38.220.56-84» (далее Методика) [4], которая устанавливает методы расчета распространения радиоактивных веществ с АЭС в окружающую среду и

методы расчета дозовой нагрузки окружающего населения для всех основных видов радиационного воздействия на человека за счет внешнего и внутреннего облучения.

Конкретный набор видов воздействий и путей миграции радиоактивных веществ, которые необходимо учитывать при проектировании, сооружении и эксплуатации АЭС, определен требованиями действующих НД к радиационной безопасности населения и окружающей среды (НРБ-99/2009 [22], ОСПОРБ 99/2010 [16], СП АЭС-03 [24] и т.д.).

В качестве параметра воздействия ионизирующего излучения на организм человека в соответствии с требованиями НРБ-99/2009 (Приложение 7) используется эффективная доза или эквивалентная доза на различные органы или ткани.

Методика позволяет рассчитывать индивидуальные эквивалентные дозы при НЭ АЭС и в аварийных ситуациях.

Эквивалентная доза  $H$  определяется по формуле

$$H = D \cdot Q \cdot N, \quad (4.5)$$

где  $D$  - поглощенная доза,

$N$  - произведение других модифицирующих коэффициентов, которое в настоящее время принимается равным единице,

$Q$  - коэффициент качества.

$Q = 1$  для гамма-излучения и электронов,  $Q = 20$  для альфа-излучения.

Эффективная доза  $H_E$  - взвешенная сумма эквивалентных доз на различные органы и ткани (рассматриваемые органы и ткани приводятся в Публикациях 69 и 72 МКРЗ [76, 77]) - определяется, выражением

$$H_E = \sum_j w_j \cdot H_j, \quad (4.6)$$

где  $H_j$  - эквивалентная доза на отдельный орган или ткань  $j$ , Зв,

$w_j$  - коэффициент взвешивания, связывающий стохастический риск от облучения отдельного органа или ткани с общим риском при равномерном облучении всего тела.

Для  $w_j$  используются значения, приведенные в таблице 4-5.

Эквивалентная доза  $H_T(\tau)$  или эффективная доза  $E(\tau)$ , ожидаемая при внутреннем облучении, - доза за время  $\tau$ , прошедшее после поступления радионуклида в организм человека - определяется по формуле

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{H}_T(t) dt, \quad (4.7)$$

$$E(\tau) = \sum_T w_T \cdot H_T(\tau), \quad (4.8)$$

где  $\dot{H}(t)$  - мощность эквивалентной дозы к моменту времени  $t$  в органе или ткани  $T$ , Зв/год,

$t_0$  - момент поступления радионуклида, год.

В случаях, когда  $\tau$  не определено,  $\tau$  принимается равным 50 годам для взрослых и  $(70-t_0)$  для детей.

Таблица 4-5 – Коэффициент взвешивания  $w_j$  для различных органов и тканей [22]

Ткань или орган	Коэффициент взвешивания $w_j$
Гонады	0,20
Грудная железа	0,05
Красный костный мозг	0,12
Легкие	0,12
Желудок	0,12
Мочевой пузырь	0,05
Печень	0,05
Пищевод	0,05
Щитовидная железа	0,05
Толстый кишечник	0,12
Кожа	0,01
Клетки костных поверхностей	0,01
Остальное	0,05

При расчете дозовых нагрузок учитываются следующие пути воздействия и поступления радиоактивных веществ в организм человека:

- через атмосферу,
- через воду,
- через пищевые продукты.

При расчетах доз использована статистическая модель (метод коэффициентов накопления) [4], позволяющая давать оценки:

- годовых доз облучения при условии постоянства выбросов и установившегося равновесного накопления радионуклидов во внешней среде с учетом радиоактивного распада радионуклидов и процессов выведения,
- ожидаемых доз в случае кратковременного аварийного выброса с учетом всех путей воздействия, включая пищевые цепочки. Может быть вычислена также доза за 1 год (или несколько лет) проживания на загрязненной территории.

Вычисляемая доза обозначает годовую эффективную дозу или эквивалентную дозу на отдельный орган или ткань при внешнем облучении. При внутреннем облучении она представляет собой полувековую эффективную эквивалентную дозу или эквивалентную дозу на отдельный орган или ткань для взрослых или соответствующие дозы за время жизни от момента поступления до 70 лет для детей и подростков. Вычисляемые эквивалентные дозы при внутреннем облучении представляют собой также годовые дозы в условиях равновесия содержания радионуклида в организме и окружающей среде или к концу указанного срока.

Внешнее облучение - вычисляемая доза  $H_p^{r,j}$  обозначает эффективную дозу или эквивалентную дозу на различные органы или ткани  $j$ , вызванную радионуклидами  $r$ , путем экспозиции  $p$ . В облучении играет роль лишь бета- и гамма-излучение.

Внутреннее облучение - вычисляемая доза  $H_p^{a,r,j}$  обозначает эффективную дозу или эквивалентную дозу на различные органы или ткани  $j$  лица возрастной группы  $a$ , вызванную радионуклидами  $r$  путем экспозиции  $p$ . В облучении играет роль альфа-, бета- и гамма-излучение.

Эффективная доза или эквивалентная доза на орган или ткань состоит из суммы доз, вызванных различными радионуклидами и путями облучения:

$$H^{a,j} = \sum_p \sum_r H_p^{a,r,j}, \quad (4.9)$$

где  $H^{a,j}$  - эффективная доза или эквивалентная доза на орган или ткань  $j$  лица возрастной группы  $a$ , Зв,



$H_p^{a,r,j}$  - эффективная доза или эквивалентная доза на орган или ткань  $j$  лица возрастной группы  $a$ , вызванная радионуклидом  $r$  путем  $p$ , Зв.

Методика позволяет рассчитывать дозы облучения в условиях долговременного постоянного или квазистационарного во времени выброса при нормальной эксплуатации (НЭ) АЭС, а также при кратковременном выбросе в аварийных ситуациях

Методика расчета эффективных/эквивалентных доз облучения лиц из населения, вызванных внешним облучением, учитывает только бета- и гамма-излучение радионуклидов при распространении газоаэрозольного выброса в окружающей среде. Во внутреннем облучении учтена роль альфа-, бета- и гамма-излучателей в радиоактивной примеси. В части расчета эквивалентных доз облучения методика ограничена следующими органами и тканями: красный костный мозг, легкие, щитовидная железа, верхняя часть толстой кишки, гонады, кожа.

При расчете поступления радиоактивных веществ с пищевыми продуктами в Методике применен метод коэффициентов накопления в предположении равновесной концентрации радиоактивных веществ в окружающей среде. В качестве входных параметров для таких расчетов используются данные, связанные с районом размещения АЭС (например, результаты расчетов ПС «RiskZone v.1.0», описание которого представлено выше в разделе 4.1). Расчет доз облучения отдельных лиц из населения за счет поступления радионуклидов с пищей ограничен рассмотрением следующих продуктов питания: молочная продукция, мясо, пресноводная рыба, пшеница, картофель, капуста, огурцы, питьевая вода.

При расчете поступления радиоактивных веществ с водой в организм человека учитываются только поверхностные воды.

Алгоритм ПС «ДОЗА 3.0» ограничивает расчет дозы внутреннего облучения населения двумя возрастными группами: 1 (взрослые старше 17 лет – группа 6 согласно НРБ-99/2009) или 2 (дети в возрасте от 1 до 2 лет – группа 2 согласно НРБ-99/2009) [22].

Выбор расчетной модели определяется конкретными условиями расположения АЭС и поставленной задачей. Пути облучения, приводящие к незначительной дозовой нагрузке, не учитываются в Методике, например:

- Внешнее облучение
  - за счет купания и катания на лодке,
  - от донных отложений и пребывания на пляже,
  - за счет пребывания на орошаемой территории;
- Внутреннее облучение
  - за счет мяса и молока животных, потребляющих воду (в том числе питьевую),
  - за счет потребления растительных продуктов, орошаемых водой,
  - за счет мяса и молока животных, потребляющих орошаемые кормовые растения.

Расчеты метеорологических факторов разбавления и осаждения являются результатами расчетов ПС «RiskZone v.1.0» или справочными данными (например, [4, 39, 78]) и представляю собой входные данные при расчете доз облучения лиц из населения.

Для оценочных расчетов ПС «ДОЗА 3.0» использует рекомендации Методики (крайне консервативная оценка) или действующей методики МПА-98 [6] для расчета приземной концентрации радионуклидов в случае распространения кратковременного выбросов в атмосфере в рамках указанных ниже приближений (точечный источник на определенной высоте продолжительностью от нескольких минут до нескольких часов).

Методика устанавливает соотношения для концентрации радионуклидов в приземном слое атмосферы в направлении, совпадающем с направлением ветра, для точечного источника в ситуациях, в которых метеорологические параметры (характеристики ветров, погодные условия) приблизительно равномерны во времени и пространстве в течение распространения струи выброса в атмосфере.

Методики используют формулы статистической теории атмосферной диффузии с системой классификации категорий устойчивости по Паскуиллу, в основе которой лежит Гауссова модель рассеяния примеси в атмосфере, и рекомендует проводить определение категорий диффузии на основе температурного градиента и скорости ветра [3 - 5, 39].

Уравнения методик построены в предположении плоской поверхности земли и однородной шероховатости подстилающей поверхности.

По мере увеличения расстояния для приподнятого источника в некоторых погодных условиях форма струи может изменяться от линейного (цилиндрического) источника вблизи источника (для расстояний порядка 1-1,5 км) до источника в форме полубесконечного пространства [39]. Алгоритм ПС «ДОЗА 3.0» при необходимости использует при расчете дозы внешнего облучения от факела выброса экстраполяционную формулу на любом расстоянии от источника.

Для трех групп сельскохозяйственных продуктов (молочная продукция, мясо сельскохозяйственных животных, растительные продукты) в ПС «ДОЗА 3.0» учтены особенности миграции и накопления трития, поступающего с АЭС в окружающую среду в виде тритиевой воды, и  $^{14}\text{C}$  в виде углекислого газа и быстро окисляющихся до  $\text{CO}_2$  соединений [4]. Радионуклиды  $^3\text{H}$  и  $^{14}\text{C}$  вносят определяющий вклад в дозовые нагрузки на население при нормальной эксплуатации АЭС.

#### Расчет эквивалентных/эффективных доз при нормальной эксплуатации

Внешнее облучение от облака определяется по формуле

$$H_{\text{AI}}^{r,j} = Q^r \cdot \overline{\chi}_i^r(x) \cdot R_A^{r,j}, \quad (4.10)$$

где  $H_{\text{AI}}^{r,j}$  - годовая доза от радионуклида  $r$  на различные органы и ткани  $j$  за счет излучения от облака в рассматриваемой точке  $x$  сектора направления ветра  $j$ , Зв;

$Q^r$  - годовой выброс радионуклида  $r$ , Бк;

$R_A^{r,j}$  - дозовый коэффициент облучения от облака для радионуклида  $r$  и различных органов и тканей  $j$ , Зв·м<sup>3</sup>/(Бк·с);

$\overline{\chi}_i^r(x)$  - долговременный среднегодовой метеорологический фактор разбавления радионуклида  $r$  в рассматриваемой точке  $x$  сектора направления ветра  $i$ , с/м<sup>3</sup>;

$\overline{\chi}_i^r(x)$  не является результатом расчета ПС «ДОЗА 3.0»; расчеты выполняются с использованием специализированных ПС с учетом статистической обработки многолетних аэрометеорологических данных района размещения АЭС.

При расчете дозы внешнего облучения от газоаэрозольного выброса алгоритм ПС при необходимости выполняет дополнительную корректировку с учетом

изменения формы струи приподнятого источника при ее распространении с расстоянием от линейного источника до источника в форме полубесконечного пространства согласно рекомендациям [39]. Для расчета используется экстраполяционная формула определения дозы  $D(x)$  на любом расстоянии  $x$  в следующей форме:

$$D(x) = K(x) \cdot D_{\infty}(x) + [1 - K(x)] \cdot D_L(x), \quad (4.11)$$

где  $D_{\infty}(x)$  - доза, рассчитанная для облака в форме полубесконечного пространства,

$D_L(x)$  - доза, рассчитанная для линейного источника,

$K(x)$  - множитель, учитывающий приподнятость струи над землей.

Для кратковременных выбросов

$$K(x) = \exp\left[\frac{-h^2}{2\sigma_z(x)^2}\right], \quad (4.12)$$

Для непрерывных выбросов

$$K(x) = \sum_j w_j \exp\left[\frac{-h^2}{2\sigma_{z,j}(x)^2}\right], \quad (4.13)$$

где  $w_j$  – повторяемость  $j$ -й категории устойчивости погоды.

Внешнее облучение от загрязненной поверхности земли вычисляется по формуле

$$H_{A2}^{r,j} = Q^r \cdot [\overline{F}_i^r(x) + \overline{W}_i^r(x)] \cdot K^r \cdot K_s \cdot R_s^{r,j}, \quad (4.14)$$

где  $H_{A2}^{r,j}$  - годовая доза от радионуклида  $r$  на различные органы и ткани  $j$  за счет излучения от загрязненной поверхности земли, Зв;

$Q^r$  - годовой выброс радионуклида  $r$ , Бк;

$\overline{F}_i^r(x)$  - долговременный среднегодовой фактор сухого осаждения для радионуклида  $r$  в рассматриваемой точке  $x$  сектора направления ветра  $i$ ,  $m^{-2}$ .

$\overline{F}_i^r(x) = v_g \overline{\chi}_i^r(x)$ , где  $v_g$  - эффективная скорость сухого осаждения (таблица 4-6 ниже), м/с.

$\overline{W}_i^r(x)$  - долговременный среднегодовой фактор вымывания осадками для радионуклида  $r$  в рассматриваемой точке  $x$  сектора направления ветра  $i$ ,  $m^{-2}$ .

Таблица 4-6 – Значения скорости сухого осаждения для выброшенной примеси, по размерам подобной атмосферной пыли [4]

Вещество	$V_{g,r}$ , см/с
Элементарный йод	2
Органические соединения йода	0.01
Аэрозоли	0.8

Факторы  $\overline{\chi}_i^r(x)$ ,  $\overline{W}_i^r(x)$  не являются результатами расчета ПС «ДОЗА 3.0»; расчеты этих факторов выполняются по специализированным ПС с учетом статистической обработки многолетних аэрометеорологических данных района размещения АЭС.

$R_s^{r,j}$  - дозовый коэффициент облучения от загрязненной поверхности земли для радионуклида  $r$  и различных органов и тканей  $j$ , (Зв·м<sup>2</sup>)/(Бк·с);

$K_s$  - безразмерный коэффициент экранирования зданиями, учитывающий время пребывания человека на открытой местности. В алгоритме программы предусмотрена возможность учета экранирования излучения от поверхности земли зданиями и сооружениями, а также неполного пребывания человека на открытой местности согласно [58].

Согласно ДВ-98 [58]

$$K^r = [1 - \exp(-\lambda_{эф}^r t_b)] / \lambda_{эф}^r, \quad (4.15)$$

где  $t_b$  - время накопления радионуклида на поверхности земли, с (исходя из срока службы АЭС, рекомендуется 50 лет),  $\lambda_{эф}^r = \lambda^r + \lambda_{эф}$ , где  $\lambda^r$  - постоянная радиоактивного распада радионуклида  $r$ , с<sup>-1</sup>;

$\lambda_{эф}$  - постоянная «экологического» выведения радионуклида, учитывающая все остальные процессы выведения из активного слоя почвы, кроме радиоактивного распада, с<sup>-1</sup>.

В соответствии с ДВ-98 при расчете дозы от выпадений на поверхность земли ПС «ДОЗА 3.0» учитывает эффекты экранирования излучения верхними слоями почвы при миграции радионуклидов в более глубокие слои. В программе задано значение постоянной «экологического» выведения  $\lambda_{эф} = 4,56 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч} = 4 \text{ \%/год}$  [58].

Внутреннее облучение за счет ингаляции вычисляется по формуле

$$H_{A3}^{a,r,j} = A_{A3}^{a,r} \cdot R_{IN}^{a,r,j}, \quad (4.16)$$

где  $H_{A3}^{a,r,j}$  - годовая доза облучения от радионуклида  $r$  за счет ингаляции на различные органы и ткани  $j$  лица возрастной группы  $a$ , Зв;

$R_{IN}^{a,r,j}$  - дозовый коэффициент радионуклида  $r$  за счет ингаляции на различные органы и ткани  $j$  лица возрастной группы  $a$ , Зв/Бк;

$A_{A3}^{a,r}$  - годовое поступление радионуклида  $r$  за счет ингаляции для лиц возрастной группы  $a$ , Бк;

$$A_{A3}^{a,r} = Q^r \cdot \overline{\chi_i^r(x)} \cdot U_{A3}^a, \quad (4.17)$$

где  $Q^r$  - годовой выброс радионуклида  $r$ , Бк;

$U_{A3}^a$  - скорость дыхания для лиц возрастной группы  $a$ , м<sup>3</sup>/с.

Расчет доз внутреннего облучения за счет потребления сельскохозяйственных продуктов питания выполняется по формулам (12), (19), (21) [4].

Расчет доз внутреннего облучения за счет потребления питьевой воды и рыбы выполняется по формулам (26) и (28) [4].

#### Аварийные ситуации

При расчете индивидуальной эквивалентной дозы в случае аварии используются те же формулы, что и при непрерывном выбросе. В соответствующих формулах годовой выброс радиоактивных веществ в атмосферу или водную среду заменяется полным выбросом радиоактивных веществ при аварии. При этом  $t_b$  в формуле (4.15) - время, за которое рассчитывается интегральная доза от аварийных выпадений (рекомендуется 50 лет). В предположении о постоянстве погодных условий долговременные факторы переноса и разбавления примесей в атмосфере заменяются соответствующими кратковременными факторами.

При расчете доз за счет поступления радиоактивных веществ по пищевым цепочкам используются значения коэффициентов  $K_{n1}^r$  и  $K_{n2}^r$  для кратковременных выбросов [4]. В соответствующих формулах задаются значения годового потребления продуктов питания.

Алгоритм ПС «ДОЗА 3.0» дополнительно позволяет выполнить корректировку нормированных приземных концентраций согласно рекомендациям Методики:

- истощение облака выброса за счет сухого осаждения,
- обеднение облака выброса за счет вымывания осадками,
- обеднение факела за счет радиоактивного распада,
- изменение скорости ветра с высотой и тепловой подъем факела выброса.

ПС позволяет Пользователю при необходимости выполнить расчет доз с учетом дополнительных факторов разбавления примеси, непосредственно задавая значения эффективного коэффициента разбавления в файле исходных данных.

#### **4.3.4 Верификация и применение ПС «ДОЗА 3.0» для расчета дозовых нагрузок на население в случае запроектной аварии на Балтийской АЭС и Ленинградской АЭС-2**

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.).

Результаты расчетов дозовых нагрузок на население за первые 10 суток после начала гипотетической запроектной аварии на Балтийской АЭС и Ленинградской АЭС-2 приведены ниже в таблицах 4-7, 4-8 (обеспеченность 99,5%). В качестве исходных данных ПС «ДОЗА 3.0» использовались результаты расчетов максимальных факторов разбавления кратковременных выбросов, полученные в ПС “RiskZone v.1.0” – данные по факторам рассеяния примеси на различных этапах аварии с временем осреднения 8, 16 и 24 ч, для Ленинградской АЭС-2 приведенные выше в таблице 4-2.

Результаты расчетов факторов разбавления аварийных выбросов и дозовых нагрузок на население района размещения Балтийской АЭС в случае ЗПА соответствуют результатам, полученным Международной группой МАГАТЭ по независимой оценке воздействия Балтийской АЭС на окружающую среду с использованием ПС “AIDA” и “COSIMA” [11].

Таблица 4-7 – Балтийская АЭС: предотвращаемая доза за первые десять суток (для критической группы - ребенок)

В Гр

Расстояние, км	Внешнее облучение		Внутреннее облучение за счет ингаляции	Уровень аварийной дозы
	От факела выброса	От поверхности		
На все тело			5.0 E-1 (5.0 E-2)	
0,25	2,5E-02	4,2E-02	-	6,7E-02
0,8	7,9E-03	1,4E-02	-	2,2E-02
1	5,7E-03	9,7E-03	-	1,5E-02
2	2,5E-03	4,6E-03	-	7,1E-03
3	1,4E-03	2,6E-03	-	4,0E-03
5	7,6E-04	1,5E-03	-	2,2E-03
10	2,7E-04	5,4E-04	-	8,1E-04
15	1,3E-04	2,7E-04	-	3,9E-04
Доза на критический орган - щитовидная железа			5.0 E0 (5.0 E-1)	
0,25	1,9E-02	2,1E-03	1,9E+00	1,9E+00
0,8	6,2E-03	6,8E-04	6,1E-01	6,2E-01
1	4,4E-03	4,8E-04	4,3E-01	4,4E-01
2	2,1E-03	2,3E-04	2,1E-01	2,1E-01
3	1,1E-03	1,3E-04	1,2E-01	1,2E-01
5	6,1E-04	6,8E-05	6,7E-02	6,8E-02
10	2,1E-04	2,2E-05	2,4E-02	2,4E-02
15	1,0E-04	9,9E-06	1,2E-02	1,2E-02



Таблица 4-8 – Ленинградская АЭС-2: предотвращаемая доза за первые десять суток (для критической группы - ребенок)

Расстояние, км	Внешнее облучение		Внутреннее облучение за счет ингаляции	Уровень аварийной дозы
	От факела выброса	От поверхности		
Эффективная доза			<b>5,0 E-1</b> (5,0 E-2)	
0,25	8,7E-04	9,1E-03	-	9,9E-03
0,5	7,3E-04	7,5E-03	-	8,2E-03
0,8	5,9E-04	5,6E-03	-	6,2E-03
1,0	5,4E-04	5,0E-03	-	5,5E-03
3,0	3,1E-04	2,7E-03	-	3,0E-03
5,0	2,6E-04	2,3E-03	-	2,6E-03
7,0	2,1E-04	1,9E-03	-	2,1E-03
10,0	1,6E-04	1,2E-03	-	1,4E-03
15,0	1,0E-04	6,6E-04		7,6E-04
Эквивалентная доза на щитовидную железу			<b>5,0 E0</b> (5,0 E-1)	
0,25	5,5E-04	5,6E-04	1,9E-01	1,9E-01
0,5	4,7E-04	4,4E-04	1,5E-01	1,5E-01
0,8	4,0E-04	3,3E-04	1,1E-01	1,1E-01
1,0	3,6E-04	2,9E-04	9,9E-02	1,0E-01
3,0	2,2E-04	1,5E-04	5,4E-02	5,4E-02
5,0	1,8E-04	1,2E-04	4,7E-02	4,7E-02
7,0	1,5E-04	9,4E-05	3,7E-02	3,7E-02
10,0	1,1E-04	5,7E-05	2,5E-02	2,5E-02
15,0	7,5E-05	2,6E-05	1,3E-02	1,3E-02

Примечание – в соответствии с п. 6.7 НРБ-99/2009, если прогнозируемые дозы облучения по прошествии 10 суток в начальный период аварии могут превосходить указанные пределы (в рамке – жирный шрифт), то для ограничения доз облучения должны быть реализованы все эффективные защитные меры (включая эвакуацию).

#### 4.3.5 Оценка рисков

В соответствии с п. 2.3 НРБ-99/2009 [22] для наиболее полной оценки вреда, который может быть нанесен здоровью в результате облучения в малых дозах,

определяется ущерб, количественно учитывающий как эффекты облучения отдельных органов и тканей тела, отличающиеся радиочувствительностью к ионизирующему облучению, так и всего организма в целом. В соответствии с общепринятой в мире линейной беспороговой теорией зависимости риска стохастических эффектов от дозы, величина риска пропорциональна дозе излучения и связана с дозой через линейные коэффициенты радиационного риска, приведенные ниже в таблице 4-7.

Усредненная величина коэффициента риска, используемая для установления пределов доз персонала и населения, принята равной  $0,05 \text{ Зв}^{-1}$ .

Таблица 4-9 – Коэффициенты радиационного риска в соответствии с п. 2.3 НРБ-99/2009 [22]

Облучаемая группа населения	Коэффициент риска злокачественных новообразований, $\times 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$	Коэффициент риска наследственных эффектов, $\times 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$	Сумма, $\times 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$
Все население	5,5	0,2	5,7
Взрослый	4,1	0,1	4,2

В условиях нормальной эксплуатации источников ионизирующего излучения пределы доз облучения в течение года устанавливаются, исходя из следующих значений индивидуального пожизненного риска:

- для персонала -  $1 \cdot 10^{-3}$ ,
- для населения -  $5 \cdot 10^{-5}$ .

Уровень пренебрежимо малого риска составляет  $10^{-6}$ .

При обосновании защиты от источников потенциального облучения в течение года принимаются следующие граничные значения обобщенного риска (произведение вероятности события, приводящего к облучению, и вероятности смерти, связанной с облучением):

- персонал -  $2 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$ ,
- население -  $1 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ .

#### 4.3.6 Выводы

Результаты расчетов факторов разбавления/осаждения аварийных выбросов и доз при тяжелых авариях, выполненных в ПС “RiskZone v.1.0” и «ДОЗА 3.0», позволяют обосновать радиационную безопасность и провести зонирование территорий вокруг АЭС, подтвердив соответствие проектов требованиям ТЗ на АЭС-2006, действующим российским НД (п.3.3.2, 3.3.3, 5.9 НП-032-01, п.11.3 СП АС-03) и международным рекомендациям.

В настоящее время для АЭС, сооружаемых по проекту АЭС-2006 (Ленинградская АЭС-2, Белорусская АЭС) подтверждено:

- расчетный радиус зоны планирования обязательной (экстренной) эвакуации населения при достижении уровня Б прогнозируемой дозы облучения за первые 10 суток (таблица 6.3 НРБ-99/2009) не превышает 800 м от реакторного отделения;

- зона планирования обязательных защитных мероприятий для населения при достижении уровня Б (часть ЗПЗМ, на которой возможно превышение уровня Б) прогнозируемой дозы облучения за первые 10 суток (таблица 6.3 НРБ-99/2009) не превышает 3 км от энергоблока;

- зона планирования защитных мероприятий (ЗПЗМ) для населения при достижении уровня А прогнозируемой дозы облучения за первые 10 суток (таблица 6.3 НРБ-99/2009) не превышает 5 км от энергоблока.

За пределами ЗПЗМ прогнозируемый уровень дозы населения за первый год после запроектной аварии с выбросом радиоактивных веществ на уровне ПАВ в окружающую среду не потребует введения защитных мер за исключением временного ограничения потребления отдельных «загрязненных» сельхозпродуктов местного производства.

В ближайшее время планируется применение разработанных подходов, программных средств и полученных результатов при разработке проектов АЭС Пакш-2 (Венгрия), Эль-Дабаа (Египет), Нинь-Тхуан (Вьетнам).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты проведенного исследования состоят в следующем:

1 Адаптирована и верифицирована численная модель атмосферного пограничного слоя для решения задачи восстановления его вертикальной структуры на основе 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 показано, что погрешности расчета их максимальных значений не превышают 50 %.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

- АО – акционерное общество  
АПС – атмосферный пограничный слой  
АЭС – атомная электростанция  
БД – база данных  
ВАБ – вероятностный анализ безопасности  
ВАК – Высшая аттестационная комиссия  
ВМО – Всемирная метеорологическая организация  
ВОЗ – Всемирная организация здравоохранения  
ГДМ+МК – гидротермодинамическая модель + метод Монте-Карло  
ЗПА – запроектная авария  
КПП – компьютерный пакет программ  
МАГАТЭ – Международное агентство по атомной энергии  
МХО ИАЭ – международное хозяйственное объединение «Интератомэнерго»  
НД – нормативный документ  
НКДАР – Научный комитет по действию атомной радиации  
НТД – нормативно-технический документ  
НТЦ ЯРБ – Научно-технический центр ядерной и радиационной безопасности  
НЭ – нормальная эксплуатация  
ООН – Организация объединенных наций  
ПА – проектная авария  
ПС – программное средство  
ПТК – программно-технический комплекс  
ЭВМ – электронная вычислительная машина

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. IAEA. Safety standards series No. NS-G-3.2 Dispersion of radioactive material in air and water and consideration of population distribution in site evaluation for nuclear power plant. - Safety Guide. Vienna. 2002. – 42 p.
2. НП-032-01 «Размещение атомных станций. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности» - М., 2002 – 8 с.
3. Серия изданий по безопасности № 50-SG-S3. Руководства МАГАТЭ по безопасности. - Вена, 1982. – 105 с.
4. НТД 38.220.56-84 “Методы расчета распространения радиоактивных веществ с АЭС и облучения окружающего населения”. Часть 1. Приложения. - МХО Интератомэнерго, М., Энергоатомиздат, 1984 – 168 с.
5. Методы расчета распределения радиоактивных веществ в атмосфере и доз облучения населения. НТД МХО. - М., 1992 – 333 с.
6. Методические указания по расчету радиационной обстановки в окружающей среде и ожидаемого облучения населения при кратковременных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу (МПА-98). - Минатом России. М., 1999 – 127 с.
7. Программа ДОЗА\_М. Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности. Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности. Аттестационный паспорт № 117 от 02.03.2000 г. – 4 с.
8. Отчет о научно-исследовательской работе. Аттестация программных средств, применяемых для обоснования безопасности РУ ЭГП-6 Билибинской АЭС. Программный комплекс Выброс 3.1. Верификационный отчет. АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», Обнинск, 2015. – 172 с.
9. Программное средство “SULTAN” оперативного прогнозирования радиационной обстановки за пределами станции в случае аварии на АЭС. Инструкция пользователя. Утв. Техническим директором концерна “Росэнергоатом” 12.10.2000, М., 2000.

10. Napier B.A., Peloquin R.A., Strenge D.L., Ramsdell J.V. GENII-The Hanford Environmental Radiation Dosimetry Software System. Volume 1: Conceptual Representation. Pacific Northwest Laboratory. Washington, 1988.
11. МАГАТЭ. Департамент ядерной безопасности. Международное партнерское рассмотрение документов «Материалы оценки воздействия на окружающую среду», подготовленных для Балтийской АЭС, Калининград (Российская Федерация). Итоговый отчет Международной группы партнерского рассмотрения МАГАТЭ. 2015. – 158 р.
12. Верификация компьютерной системы “НОСТРАДАМУС” для прогнозирования радиационной обстановки на ранней стадии аварии на АЭС. Верификационный отчет. ИБРАЭ РАН, инв. № 3431, М., 2001. (срок действия аттестационного паспорта - до 17.04.2024 г.)
13. В.С. Косых, Р.В. Бородин, Н.А. Корнейчук. RECASS NT: система информационной поддержки принятия решений в случае аварийных ситуаций на радиационно и химически опасных объектах. Сб. статей под ред. М.П. Коломеева «Проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды» – Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2010. Том 3, с. 24-35
14. System for integrated modelling of atmospheric composition / Mikhail Sofiev, Marje Prank, Pilvi Siljamo, Joana Soares, Julius Vira, Tuula Summanen, Ari Karppinen // FMI [Электронный ресурс FMI]. -Режим доступа: <http://silam.fmi.fi>
15. Sofiev M. A dispersion modelling system SILAM and its evaluation against ETEX data / M. Sofiev, P. Siljamo, I. Valkama, M. Ilvonen, J. Kukkonen // Atmospheric Environment. - 2006. - №2 40. - P. 674-685
16. ОСПОРБ 99/2010 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности». – М., 2014. – 85 с.
17. СНиП 2.01.51 – 90 «Инженерно-технические мероприятия гражданской обороны». – М., 1995. – 42 с.
18. ОПБ 88/97 «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» - М., 1999. - 35 с.
19. РБ-024-11 «Положение об основных рекомендациях к разработке вероятностного анализа безопасности уровня 1 для внутренних иницирующих событий для всех режимов работы энергоблока атомной станции». Утв. Приказом

Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 9 сентября 2011 г. № 519. – М., 2011 – 27 с.

20. Руководство по безопасности «Основные рекомендации к вероятностному анализу безопасности уровня 2 атомных станций с реакторами типа ВВЭР» РБ-044-09. – М., 2009 – 46 с.

21. IAEA. Safety Standards Series No. RS-G-1.2 Safety assessment and verification for nuclear power plants. Vienna, 2001. - 85 p.

22. НРБ 99/2009 «Нормы радиационной безопасности». – М., 2009. – 100 с.

23. Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards. General safety requirements. Part 3. No GSR Part 3. IAEA, Vienna, 2014. – 471 p.

24. СанПиН 2.6.1.24-03 «Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03)». – М., 2003. – 35 с.

25. European utility requirements for LWR nuclear power plants. Revision D. 2012. – 321 с.

26. NRC Regulatory Guide 1.145 – Atmospheric Dispersion Models for Potential Accident Consequence Assessments at Nuclear Power Plants. Rev.1. 1982. – 15 p.

27. Экология и гидрометеорология больших городов и промышленных зон (Россия, Мексика). Монография. Т.1 Анализ окружающей среды // Баранова М.Е., Гаврилов А.С., Шелутко В.А., Дмитриев В.В., Гутниченко В.Г. и др. // Ред. Карлин Л.Н., Шелутко В.А. – Издательство РГГМУ, СПб., - 2009. – 180 с.

28. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика, т. 1. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. - 694 с.

29. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей // Ред. Ф.Т.М. Ньистадта и Хю Ван Допа. Перевод с англ. - Гидрометеиздат, Л.:, 1985. - 350 с.

30. Hanna S.R. Air quality modeling over short distances // Handbook of applied meteorology. Ed. By D.D.Houghton. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley&Sons Inc., New York, 1985, 712 – 743 p.



31. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды // М.: Наука, 1982. - 315 с.
32. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий – ОНД-86. Ленинград, Гидрометеоздат, 1987. – 17 с/
33. Гаврилов А.С. Математическое моделирование мезометеорологических процессов //Л.: изд. ЛПИ, 1988. - 96 с.
34. Гаврилов А.С. Интеллектуальная геоинформационная система// Бюллетень ГИС ассоциации, вып. 1(13), 1998. - 58-59 с.
35. Gavrilov A.S. Stochastic modelling of nuclear turbulent diffusion. Diffusion in lowest troposphere // Proceeding of conference "Nuclear Risks, Environmental and Development Cooperation in The North of Europe" (Apatity, June 19-23, 1999), Umeå University, Sweden, 2000. - p. 80-84.
36. Автоматизированный программный комплекс (ПК) Zone для расчета и прогноза загрязнения атмосферы выбросами предприятий и автотранспорта (Экологический программный комплекс для персональных ЭВМ) /Под ред. А.С. Гаврилова - СПб.: Гидрометеоздат, 1992. - 165 с.
37. Гаврилов А.С., Воронов Г.И., Савватеева Л.А. Автоматизированный учебный программный комплекс (ПК) Z/Study для расчета и прогноза загрязнения атмосферы выбросами предприятий и автотранспорта, 2003. Последняя версия аналога ПК Zone – Z/Study включена ОФАП Минобразования и науки (№ ОФАП: 3024 № инф. Библ. Фонда РФ: 50200301043).
38. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М., Мир, 1980. - 616 с.
39. Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере. Справочник. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. М.: Энергоатомиздат, 1991. - 256 с.
40. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации по экологическому, техническому и атомному надзору № 465 8 июня 2010 г. «Об утверждении Положения о повышении точности прогностических оценок радиационных характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на персонал и население». – 73 с.

41. «Методические рекомендации по выбору исходных данных и параметров при расчете радиационных последствий аварий на АЭС», ВНИИАЭС, ГНЦ-ИБФ, ИБРАЭ РАН, НПО «Тайфун», Москва, 2001. – 28 с.
42. Белихов А.Б., Леготин Д.Л., Сухов А.К. Моделирование распространения атмосферных загрязнений с помощью системы SILAM. Вестник Костромского государственного университета им. Некрасова Н.А. Выпуск №1, том 20, 2014 г. <http://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-rasprostraneniya-atmosfernyh-zagryazneniy-s-pomoschyu-sistemy-silam>.
43. High Resolution Limited Area Model [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://hirlam.org>.
44. The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.ecmwf.int/about>.
45. National Weather Service - Internet Weather Source. Comment on the NWS Information Activity Policy [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://weather.noaa.gov>.
46. Официальный сайт гидрометеорологического центра Республики Беларусь [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.pogoda.by>.
47. Numerical weather prediction models UKMET [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://meteocentre.com>.
48. GRIB File Viewer – Weather data visualization [Электронный ресурс]/ - Режим доступа: [http://www.zygrib.org/index.php?page=abstract\\_ru](http://www.zygrib.org/index.php?page=abstract_ru).
49. Василенко С.В., Гаврилов А.С., Мханна А., Липовицкая И.Н. Моделирование атмосферного пограничного слоя применительно к проблемам климатологии // МНМС «Математическое моделирование. Численные методы и комплексы программ». Вып. 13. СПбГАСУ – Санкт-Петербург. 2006. – с. 56-62.
50. Василенко С.В., Гаврилов А.С., Мханна А., Липовицкая И.Н. Метод климатологического анализа вертикальной структуры атмосферного пограничного слоя с использованием численной модели // Ученые записки РГГМУ 2006. Вып. 2. – с. 53–65.
51. Методы расчета турбулентных течений// Перевод с англ. - М.: Мир, 1984. - 463 с.

52. Гаврилов А.С., Лайхтман Д.Л. О влиянии радиации на режим приземного слоя атмосферы // Изв. АН СССР, ФАО. Т.9, 1973. – с. 27–33.
53. Гаврилов А.С. К вопросу о строении приземного слоя атмосферы // Межвузовский сб. «Физика и исследование атмосферы», вып. 62. - Изд. ЛПИ, Л.: 1977. - с. 3-14.
54. Blackadar A.K. The vertical distribution of the wind and turbulent exchange in a neutral atmosphere. I. Geophys. Res., 1962, vol. 67, № 80, p. 3095-3102.
55. Numerical Analysis, Third Edition, by Richard J. Burden and J. Douglas Faires, 1985. Algorithm 3.4. – p. 122.
56. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы // Гидрометеоздат, Л.: 1984. - 751 с.
57. Golder D. «Relations Among Stability Parameters in the Surface Layer» Boundary-Layer Meteorology 3(1): 1982. – p. 47-58.
58. Руководство по установлению допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферу ДВ-98. Том 2. Москва, 1999. – 304 с.
59. 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.
60. Баранова М.Е., Гаврилов А.С. Численное моделирование динамики обтекания турбулентным потоком тонких вертикальных ограждений // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: Межвуз. темат. сб. тр. Вып. 10 / СПбГАСУ. – СПб, 2004, с. 85-94.
61. 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 РГГМУ, т.31, 2013 /РГГМУ. - СПб, 2013. - с. 119 – 129
62. Кобышева Н.В., Наровлянский Г.Я. Климатологическая обработка метеорологической информации, Л.: Гидрометеоздат, 1978. - 96 с.
63. РД-03-33-2008 «Инструкция об организации проведения экспертизы программных средств, применяемых при обосновании и (или) обеспечении безопасности объектов использования атомной энергии». – М., 2008. – 13 с.

64. РД-03-34-2000 «Требования к составу и содержанию отчета о верификации и обосновании программных средств, применяемых для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии». – М., 2000. – 32 с.
65. НИР. Верификационный отчет для программного средства RiskZone версия 1.0. ЗАО «Ленэкософт+». Арх. номер: НИР-Ф-21289 от 12.09.2014 г. Аттестационный паспорт ПС № 368 от 18.03.2015 г. - СПб, 2014. – 232 с.
66. 2.6.1. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Санитарно-защитные зоны и зоны наблюдения радиационных объектов. Условия эксплуатации и обоснование границ. Санитарные правила (СП СЗЗ и ЗН-07) СП 2.6.1.2216-07. – М., 2008. – 21 с.
67. «Методика определения размеров зон планирования защитных мероприятий в случае аварии на атомной станции», МТ 1.2.5.05.0110-2012, М., 2013. – 48 с.
68. Pasquill F. The estimation of the dispersion of windborne material / Meteorol. Mag., 1961, vol. 90. – p. 33-49.
69. Методика расчета загрязняющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах. РД 52.18.717-2009, Росгидромет, Обнинск, ООО "Принт-сервис", 2009. - 111 с.
70. Turner D.V. Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates, US Environmental Protection Agency, Office of Air Programs, Research Triangle Park, North Carolina, 1970.
71. Наставления гидрометеостанциям и постам - Л. Гидрометеоиздат, 1985, вып.3, ч.1: Метеорологические наблюдения на станциях. - 300 с.
72. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. - 274 с.
73. ПС «ДОЗА 3.0». Отчет о верификации и обосновании программного средства. НИР.0-0-22-ОТ-093. Изм. 1. Арх. № НИР-Т-133 от 11.09.2013 г. Аттестационный паспорт № 338 от 12.09.2013 г. – СПб, 2013. - 207 с.
74. Safety Reports Series No.19. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2001. – 229 p.

75. Safety Series №115, IAEA, Vienna, 1996. – 354 p.
76. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 3 Ingestion dose coefficients. ICRP Publication 69. Elsevier Science Ltd., Oxford, 1995.
77. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4 Inhalation dose coefficients. ICRP Publication 72. Elsevier Science Ltd., Oxford, 1996.
78. Regulatory Guide. 1.113, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Revision 1, 1977. Guide YVL 7.3, Revision 1, Institute of Radiation Protection, Finland, 1983.