ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ (РОСГИДРОМЕТ)

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

РД
52.18.717-
2009

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАССЕЯНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРЕ ПРИ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСАХ

Обнинск
ООО "ПРИНТ-СЕРВИС"
2009

gost.e-ecolog.ru

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ (РОСГИДРОМЕТ)

РД

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ 52.18.717-

2009

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАССЕЯНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРЕ ПРИ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСАХ

Обнинск
ООО "ПРИНТ-СЕРВИС"
2009

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Государственным учреждением «Научно-производственное объединение "Тайфун" (ГУ НПО "Тайфун").

2 РАЗРАБОТЧИКИ: В.М.Шершаков, д-р техн. наук, Н.В.Клепикова, канд. физ.-мат. наук, Н.И.Троянова, Г.Н.Фреймундт, И.В.Стогова, Л.Н.Жарова, нормоконтролер

3 СОГЛАСОВАН с УМЗА Росгидромета 29.07.2009

4 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Заместителем Руководителя Роскомгидромета от 30.07.2009

5 ЗАРЕГИСТРИРОВАН ЦМТР ГУ «НПО «Тайфун» за номером РД 52.18.717 – 2009 от 17.08.2009

6 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Содержание

1 Область применения ... 1
2 Нормативные ссылки ... 2
3 Термины и определения ... 3
4 Обозначения ... 8
5 Порядок расчета по мезомасштабной модели ... 11
5.1 Общие положения модели ... 11
5.2 Основные положения метода расчета ... 12
5.3 Входная информация ... 13
5.4 Определение концентрации и плотности выпадений ЗВ для точечного источника конечного времени действия ... 15
5.4.1 Способ моделирования источника ... 15
5.4.2 Расчет концентрации ЗВ в облаке ... 16
5.4.3 Определение траектории центра тяжести облака ... 17
5.4.4 Расчет проинтегрированной по времени приземной концентрации ... 19
5.4.5 Расчет плотности выпадения из облака ... 19
5.5 Учет начальных размеров источника ... 20
5.5.1 Метод «виртуального» источника ... 20
5.5.2 Параметры «виртуальных» источников ... 21
5.6 Выбор величины адвективного шага ... 22
5.7 Дисперсионные σ-кривые для мезомасштабной модели ... 23
5.7.1 Обобщённые дисперсионные σ-кривые в ПСА ... 23
5.7.2 Обобщённые дисперсионные σ-кривые в СА ... 27
6 Порядок расчета по локальной модели ... 27
6.1 Общие положения модели ... 27
6.2 Основные положения метода расчета ... 28
6.3 Входная информация ... 29
6.4 Расчеты полей концентрации и плотности выпадения из факела и облака ЗВ при наличии ветра ... 30
6.4.1 Вычисления концентрации ЗВ в атмосфере ... 30
6.4.2 Проинтегрированная по времени приземная концентрация ... 32
6.4.3 Плотность выпадения ЗВ ... 33
6.5 Расчет приземной концентрации и плотности выпадения ЗВ в условиях слабого ветра и штиля ... 33

6.5.1 Особенности рассеяния ЗВ при слабом ветре и штиле 33
6.5.2 Расчет приземной концентрации в условиях слабого ветра и штиля 34
6.5.3 Проинтегрированная по времени приземная концентрация 35
6.5.4 Плотность выпадения ЗВ 36
6.6 Горизонтальные и вертикальные дисперсии облака ЗВ 37
6.7 Учет начальных размеров источника 39
7 Порядок расчета по модели «тяжелых» газов 40
7.1 Общие положения модели 40
7.2 Общие положения метода расчета 41
7.3 Входная информация 42
7.4 Расчет полей концентрации в облаке или факеле «тяжелых» газов 43
8 Определение вероятности превышения концентрацией порогового уровня 49
Приложение А (обязательное) **Расчетные формулы для мезомасштабной модели** 52
А.1 Вспомогательные функции 52
А.2 Рабочие формулы для расчета концентрации ЗВ в атмосфере для точечного источника 53
А.3 Рабочие формулы для расчета вертикальной составляющей траектории центра тяжести облака 55
Приложение Б (рекомендуемое) **Генерация облаков для мезомасштабной модели** 65
Б.1 Генерация облаков в ПСА для объемного источника 65
Б.2 Генерация облаков в ПСА при проливе и испарении с плоской поверхности 68
Б.3 Генерация облаков в СА для объемного источника 70
Б.4 Генерация облаков ЗВ в ПСА при переходе облака из СА в ПСА 72
Приложение В (обязательное) **Определение параметров ЗВ** 74
В.1 Расчет траектории начального подъема ЗВ 74
В.2 Параметры ЗВ 75
В.2.1 Набор используемых параметров ЗВ 75
В.2.2 Скорость оседания 76
В.2.3 Полидисперсность ЗВ 76
В.2.4 Скорость сухого осаждения 77
В.2.5 Химическое превращение. Радиоактивный распад 78
В.2.6 Вымывание ЗВ осадками 78
Приложение Г (рекомендуемое) **Оценка параметров пограничного слоя атмосферы** 80
Г.1 Входная и выходная метеорологическая информация 80

Г.2 Определение категорий устойчивости атмосферы 81
Г.2.1 Типизация метеорологических условий 81
Г.2.2 Метод Тернера для определения категории устойчивости атмосферы 81
Г.3 Определение параметров ПрСА и ПСА 85
Г.3.1 Расчет поля мезомасштабного коэффициента шероховатости в районе ПОО 86
Г.3.2 Расчет параметров ПрСА 87
Г.3.3 Расчет высоты ПСА 93
Г.3.4 Определение профиля скорости ветра 95
Г.3.5 Определение профиля температуры воздуха 100
Г.4 Определение интенсивности осадков по данным наземных метеостанций и постов 100
Г.5 Определение вертикальных профилей коэффициентов турбулентной вязкости и диффузии 101
Приложение Д (обязательное) **Расчет штилевого фактора разбавления в Гауссовых моделях** 103
Д.1 Рабочие формулы для вычисления G_1^{st}, G_2^{st} и α_1 103
Д.2 Рабочие формулы для вычисления $G_{доп\,т1}^{st}$, $G_{доп\,т2}^{st}$ и α_2 104
Приложение Е (рекомендуемое) **Определение параметров «виртуальных» источников для Гауссовых моделей** 106
Е.1 Генерация облаков в ПСА для объемного источника 106
Е.2 Определение координат 108
Е.3 Определение массы или мощности выброса «виртуальных» источников 108
Библиография 109

Введение

На потенциально-опасных объектах (*ПОО*) существует возможность возникновения аварийных ситуаций, вызывающих значительное превышение предельно допустимых выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосферу. Для оценки загрязнения окружающей среды при аварийных выбросах разрабатываются системы прогнозирования и контроля, включающие в качестве одного из основных компонентов математическую модель распространения ЗВ в атмосфере.

В настоящее время разработаны и действуют методические документы по оценке последствий постоянных выбросов в атмосферу химических РД 52.04.212 и радиоактивных МВР.45090.4О0038, ДВ-98 загрязняющих веществ при *штатной* работе ПОО, устанавливающие для ПОО нормативы допустимых выбросов ЗВ в атмосферу. Для оценки последствий *аварийных* выбросов на ПОО разработаны и действуют несколько методик МПА-98, РД 52.04.253, РД 03-26, [1]. Методические указания МПА-98 предназначены для проведения оценки максимально ожидаемого облучения населения и радиоактивного загрязнения окружающей среды от проектных и запроектных аварийных выбросов радиоактивных веществ при наихудших для рассеяния ЗВ метеорологических условиях. Полученные оценки используются на стадии проектирования и реконструкции ПОО, но не применимы для оценки радиоактивного загрязнения окружающей среды в реальных метеорологических условиях. Методики РД 52.04.253, РД 03-26, [1] предназначены для прогнозирования загрязнения окружающей среды выбросами опасных веществ при авариях на химически опасных объектах и для решения двух наборов задач:

– определение параметров источника;

– оценка последствий выбросов ЗВ для окружающей среды при их распространении над горизонтально-однородной поверхностью в стационарных метеоусловиях.

В [1] рассматриваются последствия возможных аварий как при наиболее опасных метеоусловиях, приводящих к максимально возможному загрязнению окружающей среды, так и при наиболее повторяющихся метеоусловиях.

Некоторые поступающие в атмосферу ЗВ могут иметь отрицательную плавучесть и относятся к "тяжелым" газам. В РД 52.04.253, РД 03-26, [1] при определении параметров источника учитываются физико-химические свойства опасных веществ. Оценки последствий аварийных выбросов опасных веществ для окружающей среды проводятся,

используя гауссовы модели, в РД 52.04.253, [1] без учета, а в РД 03-26 – с учетом особенностей рассеяния в атмосфере "тяжелых" газов.

Разработка настоящего руководящего документа обусловлена необходимостью включения в систему быстрого реагирования на аварийные ситуации моделей расчета переноса и рассеяния ЗВ в атмосфере в мезомасштабной (100–километровой) зоне ПОО для оперативного описания формирования загрязнения окружающей среды в условиях наиболее приближенных к реальным. Это касается возможности проведения расчета переноса и рассеяния ЗВ в виде аэрозольных частиц и газа, включая "тяжелые", при различных источниках выброса в реальных метеорологических условиях, изменяющихся во времени и пространстве.

В настоящем руководящем документе представлены разработанные алгоритмы расчетов мезомасштабного переноса и рассеяния пассивных ЗВ в атмосфере (мезомасштабная модель). В случае стационарных и однородных метеорологических условий для локальной области (в 10–километровой зоне) ПОО предлагается использовать гауссовы модели, область применения которых расширена по сравнению со стандартными за счет включения условий слабого ветра и штиля (локальная модель). При аварийном поступлении в атмосферу "тяжелых" газов представлен алгоритм расчета их переноса и рассеяния в атмосфере с учетом гравитационного растекания облака или факела ЗВ (модель "тяжелых" газов).

При отсутствии необходимых метеорологических параметров для проведения экспресс-оценки загрязнения окружающей среды от аварийных выбросов в настоящем руководящем документе предложен упрощенный вариант оценок параметров пограничного слоя атмосферы (ПСА) по данным стандартных метеорологических наблюдений на метеостанциях вблизи ПОО. Для повышения достоверности проводимых расчетов и оценок загрязнения окружающей среды пользователю необходимо позаботиться о получении требуемых для расчетов метеорологических параметров, например, по данным региональных моделей прогноза.

Настоящий руководящий документ ориентирован на его использование в виде программного блока в системе быстрого реагирования на аварийные ситуации на ПОО.

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАССЕЯНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРЕ ПРИ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСАХ

Дата введения – 2009 – 12 – 01

1 Область применения

1.1 Настоящий руководящий документ устанавливает порядок расчета рассеяния химических и радиоактивных ЗВ в атмосфере при аварийных выбросах на ПОО и применяются для вычисления:

а) траекторий переноса ЗВ;

б) концентрации ЗВ;

в) проинтегрированной по времени концентрации (ПВК) ЗВ;

г) плотности выпадения ЗВ на подстилающую поверхность земли.

1.2. Настоящий руководящий документ предназначен для расчета рассеяния ЗВ в атмосфере при аварийных выбросах ЗВ по мезомасштабной, локальной моделях и по модели "тяжелых" газов.

Примечания

1 Мезомасштабная модель позволяет оперативно рассчитать для выброса высотой не более 3000 м загрязнение окружающей среды на расстояниях не более 100 км от ПОО с учетом прогноза развития метеорологических условий при распространении ЗВ над неоднородной подстилающей поверхностью.

2 Локальная модель позволяет оперативно для выбросов высотой не более 150 м в ПСА оценить загрязнение окружающей среды на расстояния от ПОО не более 10 км и сделать ориентировочную экспресс-оценку для переноса ЗВ на расстояния от ПОО не более 30 км при стационарных горизонтально-однородных метеорологических условиях.

3 Модель "тяжелых" газов позволяет оперативно рассчитывать загрязнение окружающей среды для приземного выброса ЗВ до расстояния, на котором плотность облака или факела становится равной плотности окружающего воздуха.

1.3 Настоящий руководящий документ предназначен для применения организациями Росгидромета, осуществляющими работы по прогнозу загрязнения окружающей среды при аварийных выбросах ПОО в атмосферу и может быть

использован специальными подразделениями других ведомств, уполномоченными проводить расчеты прогноза загрязнения окружающей среды при аварийных выбросах в атмосферу.

2 Нормативные ссылки

В настоящем руководящем документе используются ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ Р 22.0.05-94 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Термины и определения

ГОСТ 17.2.1.04-77 Охрана природы. Атмосфера. Источники и метеорологические факторы загрязнения. Промышленные выбросы. Термины и определения.

ГОСТ 17.2.1.03-84 Охрана природы. Атмосфера. Термины и определения контроля загрязнения

ГОСТ Р 22.0.02-94 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Термины и определения основных понятий

РД 52.04.212-86 Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий; ОНД-86

МВР.45090.4О038 Методические указания. Расчет допустимых выбросов радиоактивных веществ с атомных станций в атмосферу – М: 2005, 47с.

ДВ-98. Руководство по установлению допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферу. – Москва, 1999

МПА-98. Технологический документ. Методические указания по расчету радиационной обстановки в окружающей среде и ожидаемого облучения населения при кратковременных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу. – М.: Минатом России, 1998, 126 с.

РД 52.04.253-90. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте

РД 03-26-2007. Методические указания по оценке последствий аварийных выбросов опасных веществ.

СП 2.6.1.758-99 Нормы радиационной безопасности

РД 03-315-99. Положение о порядке оформления декларации промышленной безопасности и перечне сведений, содержащихся в ней

ЕК НТД 38.220.56-84. Безопасность в атомной энергетике. Часть 1. Общие положения безопасности АЭС. Методы расчета распространения радиоактивных веществ с АЭС и облучение окружающей среды. Том 1. Изд.первое. МХО Интератомэнерго. - М.: Энергоатомиздат, 1984, 52с.

3 Термины и определения

В настоящем руководящем документе применены следующие термины с соответствующими определениями.

3.1

авария: Опасное техногенное происшествие, создающее на объекте, определенной территории или акватории угрозу жизни и здоровью людей и приводящее к разрушению зданий, сооружений, оборудования и транспортных средств, нарушению производственного или транспортного процесса, а также к нанесению ущерба окружающей природной среде.

[ГОСТ Р 22.0.05-94, статья 3.1.3]

3.2 активность Q: Мера радиоактивности какого-либо количества радионуклида, находящегося в данном энергетическом состоянии в данный момент времени:

$$Q = dN/dt,$$

где dN - ожидаемое число спонтанных ядерных превращений из данного энергетического состояния, происходящих за промежуток времени dt. В системе СИ единицей измерения активности является Беккерель (Бк). 1 Бк равен 1 ядерному превращению за 1 с. Использовавшаяся ранее внесистемная единица активности кюри (Ки) составляет $3.7 \cdot 10^{10}$ Бк.

3.3

атмосферная диффузия: Неупорядоченное перемещение воздуха с находящимися в нем примесями, обусловленное турбулентностью атмосферы.

[ГОСТ 17.2.1.04-77, статья 13]

3.4 боевое отравляющее вещество; БОВ: Ядовитые химические соединения, применяемые для снаряжения химических боеприпасов и являющиеся главными компонентами химического оружия.

3.5 «виртуальный» источник: Точечный источник, положение которого смещено относительно реального источника в подветренную сторону.

3.6 «виртуальное» время: Время, в течение которого центр облака за счет адвективного переноса пройдет расстояние от «виртуального» до реального источника.

3.7 вымывание ЗВ из атмосферы: Удаление ЗВ из атмосферы при образовании облаков, туманов и выпадении осадков.

3.8 выброс ЗВ: Поступление ЗВ в атмосферу из источника загрязнения.

3.9 дисперсия: Мера рассеяния случайных величин, то есть отклонения их от среднего значения. Квадратный корень из дисперсии есть стандартное отклонение.

3.10 загрязняющее вещество; ЗВ: Химическое, в том числе и "тяжелые" газы, или радиоактивное вещество в атмосфере, которое может оказывать неблагоприятное влияние на здоровье людей и (или) на окружающую среду.

3.11 загрязнение атмосферного воздуха: Поступление в атмосферный воздух или образование в нем ЗВ в концентрациях, превышающих установленные государством гигиенические и экологические нормативы качества атмосферного воздуха [2].

3.12

источник загрязнения атмосферы: Объект, распространяющий загрязняющие атмосферу вещества.

[ГОСТ 17.2.1.04-77, статья 24]

3.13 источник мгновенного времени действия; (далее мгновенный источник): Источник, выбрасывающий ЗВ в атмосферу в течение не более 3 мин.

3.14 источник конечного времени действия: Источник, выбрасывающий в атмосферу ЗВ в течение некоторого конечного периода времени более 3 мин.

3.15

источник непрерывного загрязнения атмосферы, (далее источник непрерывного действия): Источник, выбрасывающий загрязняющие атмосферу вещества непрерывно в течение длительного периода времени.

[ГОСТ 17.2.1.04-77, статья 24з]

3.16 категории устойчивости: Классификация состояния нижнего слоя атмосферы по интенсивности турбулентности [2].

3.17 концентрация ЗВ в атмосфере: Количество ЗВ, содержащееся в единице массы или объема воздуха, приведенного к нормальным условиям.

3.18 локальная зона ПОО: Территория вокруг ПОО радиусом не более 30 км.

3.19 локальная система координат: Правая система координат, в которой ось x направлена по направлению ветра, ось y – перпендикулярно его направлению, а ось z – вверх.

3.20 мезомасштабная зона ПОО: Территория вокруг ПОО радиусом не более 100км.

3.21 метеорологическая информация: Сообщения метеорологического характера всех видов [2].

3.22 метеорологическая станция: Учреждение, где проводятся метеорологические наблюдения, ведется их обработка в установленные сроки и в определенной последовательности [2].

3.23 минимальный набор метеорологических наблюдений: На метеорологических станциях в обязательном порядке должны проводиться и регистрироваться такие приземные наблюдения, как направление и скорость ветра, температура и относительная влажность воздуха, балл облачности, количество и тип атмосферных осадков с указанием времени их прохождения.

3.24 мощность выброса: Количество загрязняющего вещества (активности), поступающее в атмосферу в единицу времени.

3.25 объемный источник загрязнения атмосферы; (далее - объемный источник): Источник, формирующийся из выбросов ЗВ в виде локального пространственного образования с выраженной границей.

3.26 опасные вещества; *ОВ:* Воспламеняющиеся, окисляющиеся, горючие, зрывчатые, токсичные, высокотоксичные вещества и вещества, представляющие опасность для окружающей природной среды, перечисленные в Федеральном законе «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.06.1997 № 116-ФЗ.

3.27 ориентировочный безопасный уровень воздействия ЗВ; ОБУВ: Временный гигиенический норматив для ЗВ в атмосфере, устанавливаемый расчетным методом для целей проектирования промышленных объектов и контроля выбросов.

3.28 период полураспада радионуклида $T_{1/2}$: Время, в течение которого число ядер данного радионуклида в результате самопроизвольных ядерных превращений уменьшается в 2 раза.

3.29 плотность выпадения: Количество ЗВ, накопившееся на единице площади подстилающей поверхности в течение определенного периода времени.

3.30 пограничный слой атмосферы; ПСА: Нижний, начинающийся от земной поверхности, слой атмосферы, в котором существенно сказываются динамические и тепловые влияния подстилающей поверхности [2].

3.31 поле ветра: Пространственное распределение ветра, то есть скорости движения воздуха, рассматриваемые как векторные величины. В каждой точке поле ветра характеризуется числовой величиной модуля скорости ветра и направлением вектора скорости или величинами проекций скорости вектора на оси координат.

3.32 поле концентрации ЗВ в атмосфере; (далее – поле концентрации ЗВ): Пространственное распределение концентрации ЗВ в атмосфере, отнесенной к установленному времени осреднения.

3.33 пороговая токсодоза: Наименьшая ингаляционная токсодоза опасного вещества, вызывающая у человека, не оснащенного средствами защиты органов дыхания, начальные признаки поражения организма с определенной вероятностью.

3.34

потенциально опасный объект; ПОО: Объект, на котором используют, производят, перерабатывают, хранят или транспортируют радиоактивные, пожаровзрывоопасные, опасные химические и биологические вещества, создающие реальную угрозу возникновения источника чрезвычайной ситуации.

[ГОСТ Р 22.0.02-94, статья 2.1.24].

3.35 предельно допустимый выброс; ПДВ: Норматив выброса вредного (загрязняющего) вещества в атмосферный воздух, который устанавливается для стационарного источника загрязнения атмосферного воздуха с учетом технических нормативов выбросов и фонового загрязнения атмосферного воздуха, при условии не превышения данным источником гигиенических и экологических нормативов качества атмосферного воздуха, предельно допустимых (критических) нагрузок на экологические системы и других экологических нормативов.

3.36 предельно допустимая концентрация; ПДК: Утвержденный в законодательном порядке санитарно-гигиенический норматив. Под ПДК понимается максимальная концентрация химических элементов и их соединений в окружающей среде, которая при повседневном влиянии в течение длительного времени на организм человека не вызывает патологических изменений или заболеваний, устанавливаемых современными методами исследований в любые сроки жизни настоящего и последующего поколений. Предельные допустимые концентрации для атмосферного воздуха относятся к определенному периоду времени осреднения. Различают

максимальную разовую $ПДК_{м.р.}$ и среднесуточную $ПДК_{с.с.}$ предельно допустимые концентрации.

3.37 приземная концентрация ЗВ в атмосфере; (далее приземная концентрация): Масса (активность) ЗВ, содержащаяся в единице объема в приземном слое атмосферы на высоте (1,5±0,5) м от поверхности земли.

3.38 приземный слой атмосферы; ПрСА: Нижняя часть ПСА от поверхности земли до (30–100) м, в которой наиболее существенно проявляются эффекты взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью. Основное свойство ПрСА – постоянство с высотой турбулентных потоков количества движения, тепла и водяного пара [2].

***3.*39 оседающее ЗВ:** Вещество, которое под влиянием гравитационных сил опускается и оседает на подстилающую поверхность.

***3.*40 осаждающееся ЗВ:** Вещество, которое частично захватывается и накапливается подстилающей поверхностью под действием гравитационных сил, электростатического притяжения, адсорбции и химического взаимодействия.

3.41 радионуклид: Радиоактивные атомы с данным массовым числом и атомным номером, а для изомерных атомов - и с данным энергетическим состоянием атомного ядра.

3.42 свободная атмосфера; СА: Атмосфера в удалении от подстилающей поверхности земли и ее непосредственного влияния; обычно подразумевается атмосфера, находящаяся выше ПСА и примыкающая к нему [2].

3.43 стандартная система координат: Правая система координат, в которой ось x направлена по параллели, ось y – по меридиану, а ось z – в зенит.

3.44 смертельная (или летальная) токсодоза: Наименьшая ингаляционная токсодоза опасного вещества, вызывающая у человека, не оснащенного средствами защиты органов дыхания, смерть с вероятностью 50%.

3.45 сценарий аварии: Последовательность отдельных логически связанных событий, обусловленных конкрентным инициирующим событием, приводящих к аварии с опасными последствиями согласно РД 03-315.

3.46 точечный источник загрязнения атмосферы; далее - точечный источник): Источник, выбрасывающий ЗВ в атмосферу из установленного отверстия.

3.48 «тяжелый» газ: Смесь ЗВ и воздуха, имеющая отрицательную плавучесть, *обусловленную либо повышенной плотностью, либо пониженной температурой* относительно окружающего воздуха.

4 Обозначения

В настоящем руководящем документе применены следующие обозначения:

A, B, C, D, E, F, G - категории устойчивости атмосферы;

$D(x,y,t)$ - плотность выпадения ЗВ на подстилающую поверхность за интервал времени $(t-t_1)$, кг/м^2 (Бк/м^2);

$D_0(x,y,t;t_k)$ - плотность выпадения ЗВ от k-го облака за интервал времени $(t-t_k)$, кг/м^2 (Бк/м^2);

d_s - горизонтальный размер источника, м;

dd, mm, jj - день, месяц и год, соответственно;

Ei(x) - интегральная показательная функция;

Fi - метеорологическое направление ветра (откуда дует ветер), град;

f - параметр Кориолиса, с$^{-1}$;

f(R) - функция плотности распределения частиц по размерам;

$G^{st}_{мгн}, G_{мгн}$ - факторы разбавления для мгновенного источника в условиях слабых ветров (штилей) и при наличии ветра, соответственно, м$^{-3}$;

$G^{st}_{дл}, G_{дл}$ - факторы разбавления для источника конечного времени действия в условиях слабых ветров (штилей) и при наличии ветра, соответственно, с·м$^{-3}$;

g - ускорение свободного падения, м/с^2;

H - высота пограничного слоя атмосферы, м;

h_{min}, h_{max} - высота нижней и верхней границ источника выброса, соответственно, м;

I - интенсивность атмосферных осадков, мм/ч;

L - параметр устойчивости ПрСА, длина Монина-Обухова, м;

M(t) - мощность выброса, кг/с (Бк/с);

m, $m_{ЗВ}$ - молекулярный вес воздуха и паров ЗВ, соответственно, кг/кмоль;

N_0, $N_Н$ - общая и нижняя облачность по 10 – балльной шкале, соответственно;

$Q(t_k)$ - масса или активность ЗВ в k-ом облаке, поступившем в атмосферу в момент времени t_k, кг (Бк);

$Q_Н$ - турбулентный поток тепла у поверхности земли, Вт/м^2;

$q(x,y,z,t)$ - концентрация ЗВ, кг/м^3 (Бк/м^3);

$q_0(x,y,z,t;t_k)$ - концентрация ЗВ в k-ом облаке, кг/м^3 (Бк/м^3);

$q^{st}(x,y,0,t)$ - приземная концентрация ЗВ в условиях штиля, кг/м^3 (Бк/м^3);

$q_{пвк}(x,y,t)$ - проинтегрированная по времени приземная концентрация ЗВ (ПВК), кг·с/м^3 (Бк·с /м^3);

P_0 - нормальное атмосферное давление, равное 101,325·10^3 н/м^2;

P - атмосферное давление, н/м^2;

P_H - давление насыщенных паров ЗВ, н/м^2;

$p_т$, $p_п$ - параметры, являющиеся непрерывными аналогами категории устойчивости атмосферы, определенные по методу Тернера и Паскуилла, соответственно;

R_* - универсальная газовая постоянная, равная 8,31·10^3 Дж/(К·кмоль);

R, d^2 - средний радиус и дисперсия размеров аэрозольных частиц, соответственно, см, см^2;

r - альбедо района ПОО;

T - температура воздуха, °К;

T_s - температура выброса, °К;

$T_{1/2}$ - период полураспада радионуклидов, с;

t - текущее время, с;

t_1 - начало действия источника, с;

t_k - время поступления k-го облака в атмосферу, с;

tl_k - время достижения в k-ом облаке концентрации ниже пороговой, или время выхода k-го облака за границы расчетной области, с;

t_{rise}, t_{noon}, t_{set} - время восхода, полдня и захода Солнца, соответственно, ч;

t_{loc} ,$t_{СГВ}$ - среднее местное и среднее Гринвичское время, соответственно, ч;

t_{ob} - время проведения метеорологических наблюдений по Гринвичскому времени, ч;

t_D - время диффузии, с;

t_s - время (длительность) действия источника, с;

U - модуль скорости ветра, м/с;

$U_ф$, $\tilde{U}_ф$ - фактический и модифицированный модули скорости ветра на высоте флюгера, соответственно, м/с;

u, v, w - компоненты скорости ветра в направлении x, y и z, соответственно, м/с ;

u_* - динамическая скорость ветра, м/с;

V_R - скорость гравитационного оседания ЗВ, м/с;

V_{Ra} - скорость гравитационного оседания аэрозольных частиц, м/с;

V_d - скорость сухого осаждения ЗВ, м/с;

v_s, w_s - скорость линейного и объёмного истечения ЗВ из вентиляционной трубы, соответственно, м/с и $м^3/с$;

(x, y, z) - система координат: для мезомасштабной модели – стандартная, для гауссовой модели - локальная;

(x_s, y_s, z_s) - координаты источника выброса;

$\overset{\nu}{x}_c = (x_c, y_c, z_c)$, $(x_{c\,CA}, y_{c\,CA}, z_{c\,CA})$ - координаты центра тяжести облака ЗВ в ПСА и СА, соответственно, м;

z_0 - параметр шероховатости подстилающей поверхности, м;

β - параметр взаимодействия ЗВ с подстилающей поверхностью, м/с;

β_u - параметр в универсальной функции Бюзингера для скорости в приземном слое;

$\delta_{ПСА}$, $\delta_{СА}$ - вертикальные протяженности (далее–толщины) источника выброса ЗВ, находящиеся в ПСА и в СА, соответственно, м,

Δh - высота теплового и динамического подъема ЗВ из источника, м;

Δt - интервал времени между последовательными выбросами облаков, с;

Δt_s - "виртуальное" время диффузии, с;

$\Delta\tau$ - адвективный шаг по времени при расчете движения центра тяжести облака, с;

$\Theta(x) = \begin{cases} 1, \text{при } x \geq 0 \\ 0, \text{при } x < 0 \end{cases}$ - тета-функция;

κ - постоянная Кармана;

λ_1 - постоянная химического превращения или радиоактивного распада, $с^{-1}$;

λ_2 - коэффициент вымывания ЗВ осадками, $с^{-1}$;

μ_0 - параметр устойчивости ПСА Казанского-Монина;

$\mu = H/L$ - обобщенный параметр устойчивости ПСА;

ρ - плотность воздуха, $кг/м^3$;

ρ_a - плотность аэрозольных частиц, $г/см^3$;

$\sigma_x^2(t), \sigma_y^2(t), \sigma_z^2(t)$ - дисперсии координат частиц ЗВ в облаке относительно его центра тяжести в направлении переноса, в поперечном и вертикальном направлении, соответственно, $м^2$;

$\sigma_u^2(t), \sigma_v^2(t), \sigma_w^2(t)$ - дисперсии компонент скорости ветра в направлении переноса, в поперечном и вертикальном направлениях, соответственно, $м^2/с^2$;

$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^x \lambda^{-\tau^2} d\tau$ - интеграл вероятности;

$\varphi(x, y, z, t) = 270° - Fi$ - направление ветра в стандартной системе координат, отсчитываемое от оси x против часовой стрелки, град.;

$\varphi_{sun}(t)$ - высота подъема Солнца над горизонтом, рад.;

ψ, λ - широта и долгота места, град.

5 Порядок расчета по мезомасштабной модели

5.1 Общие положения модели

5.1.1 В мезомасштабной модели [3-8] реализован метод расчета переноса и рассеяния в атмосфере оседающих и осаждающихся химических или радиоактивных ЗВ на расстояния не более 100 км от аварийного выброса на ПОО. ЗВ поступает в атмосферу от мгновенного или конечного времени действия источника на высоты не более 3000 м от поверхности земли в ПСА или нижнюю часть СА, примыкающую к ПСА. Химическое превращение или радиоактивный распад в зависимости от вида ЗВ *учитывается в виде реакций первого порядка без рассмотрения новых химических* образований и дочерних радионуклидов.

5.1.2 Метод, представленный в 5.2, позволяет рассчитать как основные характеристики (траекторию движения ЗВ и поле концентрации q(x,y,z,t)), так и интегральные и локальные характеристики концентрации (например, проинтегрированную по времени приземную концентрацию ЗВ (ПВК), поля выпадений и др.) и их пространственно-временное поведение.

5.1.3 При расчетах определяются концентрации, относящиеся к 10-минутному интервалу осреднения.

5.1.4 В случае действия нескольких источников поля концентрации ЗВ суммируются.

5.1.5 Модель, представленная в разделе 5, позволяет проводить расчеты распространения ЗВ над неоднородной поверхностью при нестационарных метеорологических условиях (далее – метеоусловия), изменения которых учитываются по всей области переноса.

5.1.6 Данная модель не применима в условиях сложного рельефа и при особых метеоусловиях, а именно, при горно-долинной циркуляции, в условиях бриза и т.д.

5.2 Основные положения метода расчета

5.2.1 *Суть метода расчета загрязнения окружающей среды ЗВ, поступающими в* атмосферу в результате аварии на ПОО, заключается в моделировании:

– выброса серией последовательных облаков в соответствии со сценарием аварии;

– переноса, рассеяния и осаждения отдельного облака ЗВ с учетом локальных значений метеорологических параметров;

– концентрации в атмосфере и плотности выпадения ЗВ суммой вкладов от серии облаков.

Эта концепция позволяет учесть изменение метеорологических условий переноса и рассеяния в пространстве и во времени. Учет начальных размеров источника осуществляется введением «виртуального» источника или набором пространственно-распределенных «виртуальных» источников, концентрация ЗВ от которых суммируется.

5.2.2 В основу метода расчета переноса и рассеяния ЗВ отдельного облака положено аналитическое решение [7] полуэмпирического нестационарного трехмерного уравнения турбулентной диффузии для мгновенного точечного источника с координатами (x_s, y_s, z_s). Коэффициенты уравнения относятся к центру тяжести облака и считаются функциями времени, что позволяет учесть не только временную, но, приближенно, за счет изменения со временем положения центра тяжести и пространственную неоднородность метеоусловий. С помощью этого решения моделируется широкий набор сценариев аварий и учитываются основные характерные особенности процесса переноса и рассеяния ЗВ, а именно:

– пространственно-временная неоднородность метеорологических элементов в атмосфере;

– нестационарность источника выброса ЗВ;

– взаимодействие ЗВ с подстилающей поверхностью и верхней границей слоя рассеяния;

– физико-химические свойства выбрасываемого ЗВ (фазовое состояние - газ, аэрозоль; распределение аэрозольных частиц по размерам, химическое превращение или радиоактивный распад);

– оседание, сухое и влажное осаждение ЗВ.

5.2.3 Если ЗВ от источника выброса поступает частично в ПСА и частично в СА (на высоту не более 3000 м), то выброс ЗВ делится соответственно на две части. Вычисления распространения ЗВ проводятся отдельно для каждой части. ЗВ, находящееся в ПСА, в процессе переноса и рассеяния в СА не поступает, так как полностью отражается от верхней границы ПСА (консервативная оценка). ЗВ, находящееся в СА, может поступать в ПСА за счет седиментации, подъёма высоты ПСА и др. Если центр тяжести облака ЗВ, находящегося в СА, в некоторый момент времени переходит в ПСА, то это облако рассматривается как новый объемный источник, возникший в ПСА в это время.

5.3 Входная информация

5.3.1 Входную информацию необходимую для расчетов переноса и рассеяния ЗВ в атмосфере можно подразделить на три основных типа: геоинформация, характеристика источника выброса и метеорологическая информация.

5.3.2 Необходимая геоинформация содержит следующие данные:

а) поля параметра шероховатости $z_0(x,y)$ подстилающей поверхности;

б) альбедо подстилающей поверхности $r(x,y)$.

5.3.3 Параметры, характеризующие источник выброса ЗВ, определяются на основе сценария аварии, либо специальной моделью источника, либо экспертно, и должны содержать следующие данные:

а) координаты источника (x_s,y_s);

б) геометрические характеристики источника выброса:

1) горизонтальный размер источника d_s (диаметр круга с площадью равной площади горизонтальной проекции выброса);

2) высота нижней и верхней границ выброса, соответственно h_{min} и h_{max};

в) временной режим действия источника выброса:

1) время начала выброса t_1;

2) длительность выброса t_s;

г) мощность M(t) или масса (активность) Q выброса;

д) физико-химические свойства и дисперсный состав ЗВ выброса:

1. скорость оседания V_R (для аэрозольных частиц V_{Ra} может быть вычислена по их радиусу и плотности);

2. скорость сухого осаждения V_d;

3. постоянная химического превращения или радиоактивного распада λ_1;

4. параметр, характеризующий вымывающую способность ЗВ дождем, γ_0;

е) при выбросе из вентиляционной трубы (далее – венттруба) необходимы дополнительные данные:

1) скорость истечения ЗВ из венттрубы v_s;

2) геометрическая высота венттрубы z_s, связанная с нижней и верхней границами выброса как $z_s=h_{min}=h_{max}$;

3) температура выбрасываемого ЗВ T_s;

ж) при проливе и испарении ЗВ необходимы дополнительные данные:

1) молекулярный вес ЗВ $m_{ЗВ}$;

2) давление насыщенных паров ЗВ $P_{ЗВ}$ (или параметры A, B, C уравнения Антуана для вычисления $P_{ЗВ}$);

3) температура кипения ЗВ $T_{кип}$.

5.3.4 Следующие параметры, определяемые метеоусловиями во время распространения ЗВ по всей области переноса, поставляются моделью прогноза погоды:

а) поля скорости ветра;

б) поля температуры;

в) поля интегральных характеристик ПСА:

1) динамическая скорость ветра u_*;

2) масштаб длины Монина-Обухова L;

3) параметр устойчивости атмосферы Казанского-Монина μ_0;

4) высота слоя перемешивания H;

г) поля интенсивности I и типов γ_1 осадков (жидкие, твердые или смешанные).

При отсутствии необходимой метеоинформации в настоящем руководящем документе представлена возможность до их получения провести предварительные оценки параметров ПСА по следующим данным стандартных наблюдений на метеорологической станции вблизи ПОО:

– модуль и направление скорости ветра на высоте флюгера (10±2) м;

– температура воздуха на высоте (2±0,1) м;

– общая и нижняя облачность, выраженная в баллах;

– количество, продолжительность и тип осадков.

5.4 Определение концентрации и плотности выпадений ЗВ для точечного источника конечного времени действия

5.4.1 Способ моделирования источника

5.4.1.1 Выброс, связанный с кратковременным резким повышением мощности M(t) поступления ЗВ в атмосферу от точечного источника моделируется совокупностью облаков ЗВ, поступающих в атмосферу с интервалом времени Δt в течение всего времени действия источника t_s, начиная с момента аварийного поступления ЗВ в атмосферу t_1. В атмосферу k-ое облако поступает в момент времени t_k

$$t_k = t_1 + (k-1)\cdot\Delta t \qquad (5.1)$$

с массой (активностью) ЗВ $Q(t_k)$

$$Q(t_k) = M(t_k)\cdot\Delta t \quad \text{или} \quad Q(t_k) = Q/K \qquad (5.2)$$

при общем количестве облаков $K=\max\{1,[t_s/\Delta t]\}$ и соответственно k =1,2, ...K, (где квадратные скобки означают целую часть числа, стоящего в них). Интервал времени Δt между поступлением облаков в атмосферу определяется в приложении Б.

5.4.1.2 Концентрация ЗВ в атмосфере q(x,y,z,t), проинтегрированная по времени приземная концентрация $q_{ПВК}(x,y,t)$ и плотности выпадения ЗВ на подстилающую поверхность D(x,y,t) за время $(t-t_1)$ определяются суммированием соответствующих вкладов от каждого k-го облака,

$$q(x,y,z,t) = \sum_{k=1}^{K} q_0(x,y,z,t;t_k), \quad q_{ПВК}(x,y,t) = \sum_{k=1}^{K} \int_{t_k}^{t} q_0(x,y,\hat{z},\tau;t_k)\,d\tau, \qquad (5.3)$$

$$D(x,y,t) = \sum_{k=1}^{K} D_0(x,y,t;t_k), \qquad (5.4)$$

где $q_0(x,y,z,t;t_k)$ – концентрация ЗВ в k-ом облаке, поступившем в атмосферу в момент времени t_k;

$D_0(x,y,t;t_k)$ –плотность выпадения ЗВ от k-го облака на подстилающую поверхность за время $(t-t_k)$;

$\hat{z}$ - высота уровня дыхания (1,5±0,5) м.

Расчет переноса и рассеяния k-го облака продолжается вплоть до времени tl_k, обусловленного или полным рассеянием, выпадением и распадом ЗВ (концентрация ЗВ в облаке становится не более фоновой) или выходом облака за границы расчетной области.

5.4.2 Расчет концентрации ЗВ в облаке

5.4.2.1 Для оценки негативных последствий прохождения облака ЗВ необходимо вычислить как приземную концентрацию ЗВ, которая определяет ее ингаляционное поступление в организм человека, выпадение на почву и т.д., так и ее вертикальное распределение, позволяющее оценить в случае радиоактивного загрязнения дозу внешнего излучения от прошедшего облака. Концентрация ЗВ в k-м облаке $q_0(x,y,z,t;t_k)$ с массой (активностью) выброса $Q(t_k)$, поступившего в атмосферу в момент времени t_k , определяется формулой, приведенной в [6-8]

$$q_0(x,y,z,t;t_k) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < t_k \\ Q(t_k)\cdot q_1(x,y,t;t_k)\cdot q_2(z,t;t_k), & \text{при } t \ge t_k \end{cases}, \qquad (5.5)$$

где q_1 и q_2 – функции, рассчитываемые по формулам (5.6) и (5.9), соответственно.

5.4.2.2 Функция $q_1(x,y,t;t_k)$ учитывает перенос и рассеяние ЗВ по горизонтали, его химическое превращение или радиоактивный распад и вымывание осадками и имеет вид

$$q_1(x,y,t;t_k) = \frac{\exp\left[-\lambda_1\cdot(t-t_k) - \int_{t_k}^{t}\lambda_2 dt\right]}{2\pi\cdot\sigma_x(t_D)\cdot\sigma_y(t_D)}\cdot\exp\left[-A_x^2(x,y,t;t_k) - A_y^2(x,y,t;t_k)\right], \qquad (5.6)$$

где $A_x(x,y,t;t_k) = \left[(x - x_c(t;t_k))\cdot\cos\varphi_c(t;t_k) + (y - y_c(t;t_k))\cdot\sin\varphi_c(t;t_k)\right] / \left(\sqrt{2}\cdot\sigma_x(t_D)\right)$; (5.7)

$A_y(x,y,t;t_k) = \left[-(x - x_c(t;t_k))\cdot\sin\varphi_c(t;t_k) + (y - y_c(t;t_k))\cdot\cos\varphi_c(t;t_k)\right] / \left(\sqrt{2}\cdot\sigma_y(t_D)\right)$; (5.8)

$x_c(t;t_k), y_c(t;t_k), z_c(t;t_k)$ - координаты центра тяжести k-го облака, вычисляемые по формулам (5.12) - (5.14);

$\varphi_c(t,t_k)$ - направление ветра в центре тяжести k-го облака;

$\sigma_x^2(t_D)$, $\sigma_y^2(t_D)$ - горизонтальные дисперсии координат частиц k-го облака относительно его центра тяжести, вычисляемые по формулам (5.32);

$t_D = t - t_k$ - время диффузии.

5.4.2.3 Функция $q_2(z,t;t_k)$ определяет рассеяние ЗВ по вертикали, его оседание и осаждение и имеет вид

$$q_2(z,t;t_k) = W_{21}(h,\beta,V_R) + W_{22}(2\tilde{H}-h,\beta,V_R) + W_{23}(2\tilde{H}+h,\beta,V_R) + W_{24}(4\tilde{H}-h,\beta,V_R) + W_{25}(4\tilde{H}+h,\beta,V_R), \quad (5.9)$$

где W_{21}, W_{22}, W_{23}, W_{24}, W_{25} – функции, вычисляемые по формулам (А.1) – (А.13) (приложение А);

$h(t; t_k)$ – приведенная высота подъема ЗВ, определяемая как

$$h(t;t_k) = \begin{cases} (z_s + \Delta h)\cdot\dfrac{H(t)}{H(t_k)}, & \text{при } z_c(t_k) \le H(t_k) \text{ и } z_c(t) \le H(t) \\ z_s + \Delta h, & \text{при } z_c(t_k) > H(t_k) \text{ и } z_c(t) > H(t) \\ H(t), & \text{при } z_c(t_k) > H(t_k) \text{ и } z_c(t) \le H(t); \end{cases} \quad (5.10)$$

$\beta = \max\{V_d - V_R, 0\}$ – параметр взаимодействия ЗВ с подстилающей поверхностью;

$\tilde{H}(t)$ - высота области рассеяния ЗВ для k-го облака, определяемая как

$$\tilde{H}(t) = \begin{cases} H(t), & \text{при } z_s \le H(t_k) \\ 3000, & \text{при } z_s > H(t_k); \end{cases} \quad (5.11)$$

$H(t_k)$, $H(t)$ – высота ПСА в моменты времени t_k и t, соответственно;

z_s – начальная высота центра тяжести облака, моделирующего реальный источник, определяется в зависимости от вида источника по формулам (Б.12), (Б.14), (Б.18) или (Б.24) (приложение Б);

Δh – высота начального подъёма ЗВ при выбросе из венттрубы за счет тепловых и динамических факторов, рассчитываемая по формулам (В.2)–(В.5) (приложение В), или $\Delta h=0$ для распределенного по высоте источника с заданными значениями h_{min} и h_{max}.

Отметим, что в формуле (5.9) первое слагаемое $W_{21}(h,\beta,V_R)$ ответственно за перемещение ЗВ по вертикали без учета влияния верхней границы области рассеяния $\tilde{H}(t)$, а следующие слагаемые учитывают влияние на профиль концентрации полного отражения ЗВ от верхней границы области рассеяния и взаимодействие ЗВ с подстилающей поверхностью.

5.4.3 Определение траектории центра тяжести облака

5.4.3.1 Координаты центра тяжести k-го облака x_c, y_c, z_c определяются следующим образом: горизонтальные – интегрированием по времени скорости ветра в изменяющемся со временем центре тяжести k-го облака, вертикальные – отношением первого к нулевому моментов функции $q_2(z,t;t_k)$ по вертикали

$$x_c(t;t_k) = x_s + \sum_{j=0}^{J(t;t_k)-1} \Delta\tau_j \cdot u(\vec{x}_c(t_j;t_k),t_j), \quad (5.12)$$

$$y_c(t;t_k) = y_s + \sum_{j=0}^{J(t;t_k)-1} \Delta\tau_j \cdot v(\vec{x}_c(t_j;t_k),t_j), \quad (5.13)$$

$$z_c(t;t_k) = \frac{M_{1z}(t;t_k)}{M_{0z}(t;t_k)}, \quad (5.14)$$

где $u(\vec{x}_c,t)$, $v(\vec{x}_c,t)$ - компоненты скорости ветра, вычисляемые в центре тяжести облака;

$\Delta\tau_j$ - адвективный шаг по времени. Рекомендации по выбору $\Delta\tau_j$ даны в 5.6;

$$t_j = t_k + \sum_{i=0}^{j} \Delta\tau_i, \quad (5.15)$$

$J(t;t_k)$ - число адвективных шагов на временном интервале от t_k до t, определяемое из условия

$$\sum_{i=0}^{J(t;t_k)-1} \Delta\tau_j = t - t_k, \quad (5.16)$$

$M_{0z}(t;t_k)$, $M_{1z}(t;t_k)$ – функции, определяемые по формулам (5.17) и (5.18).

5.4.3.2 Функция $M_{0z}(t;t_k)$ в зависимости от характеристик среды и параметров ЗВ имеет следующий вид:

$$M_{0z}(t;t_k) = W_{01}(h,\beta,V_R) + W_{02}(2\tilde{H}-h,\beta,V_R) + W_{03}(2\tilde{H}+h,\beta,V_R) + W_{04}(4\tilde{H}-h,\beta,V_R) + W_{05}(4\tilde{H}+h,\beta,V_R). \quad (5.17)$$

Выражения для функций W_{0j} для j=1,...,5 приведены в формулах (А.14) – (А.28) (приложение А).

5.4.3.3 Функция $M_{1z}(t;t_k)$ в зависимости от характеристик среды и параметров ЗВ имеет следующий вид:

$$M_{1z}(t;t_k) = W_{11}(h,\beta,V_R) + W_{12}(\tilde{H}-h,\beta,V_R) + W_{13}(\tilde{H}+h,\beta,V_R) + W_{14}(2\tilde{H}-h,\beta,V_R) + W_{15}(2\tilde{H}+h,\beta,V_R) + W_{16}(3\tilde{H}-h,\beta,V_R) + W_{17}(3\tilde{H}+h,\beta,V_R) + W_{18}(4\tilde{H}-h,\beta,V_R) + W_{19}(4\tilde{H}+h,\beta,V_R) + W_{110}(5\tilde{H}-h,\beta,V_R) + W_{111}(5\tilde{H}+h,\beta,V_R). \quad (5.18)$$

Выражения для функций W_{1j} для j=1,...,11 приведены в формулах (А.29) – (А.69) (приложение А).

5.4.4 Расчет проинтегрированной по времени приземной концентрации

Для оценки последствий загрязнения окружающей среды аварийным выбросом необходимо, кроме концентрации, знать также проинтегрированную за время $(t-t_k)$ приземную концентрацию $q_{0,\text{пвк}}(x,y,t;t_k)$

$$q_{0,\text{пвк}}(x,y,t;t_k)=\int_{t_k}^{t} q_0(x,y,\hat{z},\tau;t_k)\,d\tau, \tag{5.19}$$

где $q_0(x,y,\hat{z},\tau;t_k)$ приземная концентрация на высоте уровня дыхания $\hat{z}$ вычисляется по формуле (5.5). Проинтегрированная по времени концентрация для опасных веществ и боевых отравляющих веществ пропорциональна величине токсодозы, а для радиоактивных ЗВ используется для определения дозы облучения.

Интеграл (5.19) может быть рассчитан численно, например, следующим образом:

$$q_{0,\text{пвк}}(x,y,t;t_k)=\sum_{j=0}^{J(t;t_k)-1}\Delta\tau_j\cdot q_0(x,y,\hat{z},t_j;t_k), \tag{5.20}$$

где t_j и $J(t;t_k)$ определяются по формулам (5.15), (5.16), соответственно.

5.4.5 Расчет плотности выпадения из облака

5.4.5.1 Плотность выпадения ЗВ $D_0(x,y,t;t_k)$ из k-го облака на подстилающую поверхность за время $(t-t_k)$, обусловленная сухим D_{0d} и влажным D_{0w} выведением ЗВ из атмосферы, определяется как:

$$D_0(x,y,t;t_k)=D_{0d}(x,y,t;t_k)+D_{0w}(x,y,t;t_k). \tag{5.21}$$

5.4.5.2 Сухое осаждение $D_{0d}(x,y,t;t_k)$ представляет собой проинтегрированный по времени поток ЗВ на подстилающую поверхность с учетом его химического превращения или радиоактивного распада:

$$\begin{aligned} D_{0d}(x,y,t;t_k) &= V_d\cdot e^{-\lambda_1(t-t_k)}\int_{t_k}^{t} e^{\lambda_1(\tau-t_k)}\cdot q_0(x,y,\hat{z},\tau;t_k)\,d\tau = \\ &= V_d\cdot e^{-\lambda_1(t-t_k)}\sum_{j=0}^{J(t;t_k)-1} e^{\lambda_1(t_j-t_k)}\cdot q_0(x,y,\hat{z},t_j;t_k)\cdot\Delta\tau_j, \end{aligned} \tag{5.22}$$

где λ_1 – параметр, учитывающий химическое превращение или радиоактивный распад, вычисляемый по формуле (В.19) (приложение В).

5.4.5.3 Влажное осаждение ЗВ $D_{0w}(x,y,t;t_k)$ из облака происходит за счет его вымывания атмосферными осадками (при прохождении облаком ЗВ зоны атмосферных осадков) и определяется не приземной концентрацией, как это имеет место при расчете

D_{0d}, а количеством ЗВ в столбе атмосферного воздуха, промываемого осадками. Влажное осаждение ЗВ из k-го облака с учетом химического превращения или радиоактивного распада определяется как

$$D_{0w}(x,y,t;t_k) = e^{-\lambda_1(t-t_k)} \int_{t_k}^{t} d\tau \lambda_2 \int_0^{\tilde{H}} dz\, e^{\lambda_1(\tau-t_k)} \cdot q_0(x,y,z,\tau;t_k), \qquad (5.23)$$

где λ_2 – параметр, учитывающий интенсивность атмосферных осадков, рассчитываемый по формуле (В.20) (приложение В).

Учитывая вид функции $q_0(x,y,z,t;t_k)$, можно представить $D_{0w}(x,y,t;t_k)$ в виде

$$D_{0w}(x,y,t;t_k) = e^{-\lambda_1(t-t_k)} Q(t_k) \int_{t_k}^{t} \lambda_2 \cdot M_{0z}(\tau;t_k) \cdot q_1(x,y,\tau;t_k) \cdot e^{\lambda_1(\tau-t_k)} d\tau, \qquad (5.24)$$

где $M_{0z}(t;t_k)$ и $q_1(x,y,t;t_k)$ вычисляются по формулам (5.17) и (5.6) соответственно.

Расчет интеграла по времени в формуле (5.24) можно провести численно следующим образом:

$$D_{0w}(x,y,t;t_k) = Q(t_k) \cdot e^{-\lambda_1(t-t_k)} \cdot \sum_{j=0}^{J(t;t_k)-1} \Delta\tau_j \cdot \lambda_2 \cdot M_{0z}(t_j;t_k) \cdot q_1(x,y,t_j;t_k) \cdot e^{\lambda_1 j(t_j-t_k)}, \qquad (5.25)$$

где t_j и $J(t;t_k)$ определяются по формулам (5.15) и (5.16), соответственно.

5.5 Учет начальных размеров источника

5.5.1 Метод «виртуального» источника

Алгоритмы расчета концентрации ЗВ в атмосфере, представленные в подразделе 5.4, разработаны для точечного источника. Для учета начальных размеров источника использован так называемый метод «виртуального» источника [9].

Координаты реального источника сдвигаются против ветра на расстояние Δx_s, которое ЗВ от набора точечных источников пройдет за счет адвективного переноса в течение времни Δt_s, и за это время облако ЗВ за счет диффузионного роста достигнет размера реального начального источника. Все виды взаимодействия ЗВ на этом участке траектории не учитываются. Расстояние Δx_s называется «виртуальным» расстоянием, время Δt_s называется «виртуальным» временем, а введенный набор точечных источников - «виртуальным».

Число «виртуальных» источников N равно

$$N = n_x \cdot n_y \cdot n_z, \qquad (5.26)$$

где n_x, n_y, n_z – количество «виртуальных» источников по осям x, y и z соответственно.

Сумма объемов и масса ЗВ от «виртуальных» источников в месте реального выброса должна совпадать с объемом и массой ЗВ в исходном реальном выбросе. Расстояние и время диффузии ЗВ увеличиваются соответственно на величины Δx_s и Δt_s. Для минимизации числа «виртуальных» источников, моделирующих исходный источник, пользователем выбирается некоторое расстояние x_{min} от центра источника (x_s, y_s) по направлению переноса, начиная с которого модельные значения суммарной концентрации от совокупности источников адекватны средним значениям концентрации от реального источника.

5.5.2 Параметры «виртуальных» источников

5.5.2.1 При применении метода «виртуальных» источников необходимо определить:

– «виртуальное» время Δt_s;

– количество «виртуальных» источников (n_x, n_y, n_z);

– координаты центра тяжести облаков, моделирующих реальный источник и образующихся за «виртуальное» время Δt_s из «виртуальных» источников;

– мощность M_n или массу (активность) Q_n выброса от каждого n-го «виртуального» источника (n=1,2,...N);

– интервал времени Δt (скважность) между последовательными поступлениями облаков ЗВ в атмосферу, моделирующими источник конечного времени действия.

5.5.2.2 Источник по высоте может быть протяженным и находиться частично в ПСА и/или частично в СА. В этом случае параметры «виртуальных» источников в ПСА и СА определяются раздельно. В каждом из этих слоев реальный выброс имеет следующие параметры:

а) вертикальные размеры:

1) в ПСА его толщина $\delta_{ПСА}$ равна

$$\delta_{ПСА} = \min\{h_{max}, H\} - \min\{h_{min}, H\} \quad (5.27)$$

2) в СА его толщина $\delta_{СА}$ равна

$$\delta_{СА} = \max\{h_{max}, H\} - \max\{h_{min}, H\}; \quad (5.28)$$

б) масса ЗВ:

1) в ПСА $Q_{ПСА}$

$$Q_{ПСА} = \begin{cases} Q, & \text{при } \delta_{ПСА} = \delta_{СА} = 0, \quad h_{min} < H \\ Q \cdot \dfrac{\delta_{ПСА}}{\delta_{СА} + \delta_{ПСА}}, & \text{при } \delta_{ПСА} \neq 0 \\ 0, & \text{при } h_{min} > H; \end{cases} \tag{5.29}$$

2) в СА $Q_{СА}$

$$Q_{СА} = Q - Q_{ПСА}. \tag{5.30}$$

5.5.2.3 Алгоритмы вычисления параметров «виртуальных» источников, указанных в 5.5.2.1, для каждой из частей реального выброса представлены раздельно по слоям: для ПСА в Б.1 и Б.2 (приложение Б) и для СА в Б.3 (приложение Б). Там же даны рекомендации по выбору x_{min}.

5.5.2.4 В процессе вычисления концентрации ЗВ в облаках, находящихся в СА (центр тяжести которых $z_{c\,СА}$ выше границы ПСА, т.е. $z_{c\,СА}$ более H), часть облаков может переходить в ПСА, например, за счет седиментации, за счет подъема высоты ПСА и др., т.е. в некоторый момент времени t_{k2} может оказаться, что центр тяжести облака ниже высоты ПСА. Тогда это облако при переходе в ПСА рассматривается как новый мгновенный объемный источник, возникший в ПСА, с геометрическими характеристиками идентичными этому облаку. В Б.4 (приложение Б) дан алгоритм генерации облаков ЗВ в ПСА при переходе облака из СА в ПСА.

5.5.2.5 Расчеты концентрации и плотности выпадения ЗВ на подстилающую поверхность проводятся для каждого «виртуального» источника по алгоритму, представленному в 5.4, с увеличением времени диффузии t_D на «виртуальное» время диффузии Δt_s. Рассчитанные поля концентраций и плотности выпадений суммируются по всем «виртуальным» источникам.

5.6 Выбор величины адвективного шага

Величина адвективного шага $\Delta\tau(t)$, с, с которым вычисляется перенос центра тяжести облака, выбирается при $t=t_k$ не более Δt, а со временем по мере увеличения размера облака рассчитывается по соотношению

$$\Delta\tau(t) = \max\left\{\Delta\tau(t_k), \min\left[\frac{2{,}3 \cdot \sigma_x\left(\vec{x}_c, t\right)}{U\left(\vec{x}_c, t\right)}, 600\right]\right\}, \quad \text{при } \Delta\tau(t_k) \le \Delta t \tag{5.31}$$

где σ_x и U определены в центре тяжести облака $\vec{x}_c(t;t_k) = \{x_c(t;t_k), y_c(t;t_k), z_c(t;t_k)\}$.

5.7 Дисперсионные σ-кривые для мезомасштабной модели

5.7.1 Обобщённые дисперсионные σ-кривые в ПСА

5.7.1.1 Аппроксимационные формулы для дисперсий облака ЗВ $\sigma_x^2(t_D), \sigma_y^2(t_D), \sigma_z^2(t_D)$, основанные на характеристиках турбулентности среды с учетом седиментации ЗВ и влиянии сдвигов ветра на горизонтальное рассеяние ЗВ, представляются в ПСА в виде суммы турбулентных и сдвиговых составляющих

$$\begin{aligned}\sigma_x^2(t_D) &= \sigma_{xI}^2(t_D) + \sigma_{xs}^2(t_D)\\ \sigma_y^2(t_D) &= \sigma_{yI}^2(t_D) + \sigma_{ys}^2(t_D)\\ \sigma_z^2(t_D) &= \sigma_{zI}^2(t_D),\end{aligned} \qquad (5.32)$$

где $\sigma_{xt}^2(t_D), \sigma_{yt}^2(t_D), \sigma_{zt}^2(t_D)$ - дисперсии облака с учетом седиментации ЗВ, обусловленные турбулентным перемешиванием;

$\sigma_{xs}^2(t_D), \sigma_{ys}^2(t_D)$ - горизонтальные дисперсии облака ЗВ, обусловленные сдвигом ветра, связанным с изменением модуля скорости и направлением ветра с высотой.

5.7.1.2 При вычислении дисперсий $\sigma_{xt}^2(t_D), \sigma_{yt}^2(t_D), \sigma_{zt}^2(t_D)$, обусловленных турбулентностью среды, входными параметрами являются интегральные характеристики ПСА

u_* – динамическая скорость, м/с;

H – высота ПСА, м;

L – масштаб длины Монина-Обухова, м.

В настоящее время дисперсии $\sigma_{xt}^2(t_D), \sigma_{yt}^2(t_D), \sigma_{zt}^2(t_D)$ для невесомого ЗВ и практически любых поверхностей (равнинная и слабо холмистая местность, сильнопересеченная местность, городские условия), представляются в универсальном виде, предложенным Дрекслером и Арья [10,11]:

$$\begin{aligned}\sigma_{xI}^2(t_D) &= \sigma_u^2 \cdot t_D^2 \Big/ \left(1 + \frac{t_D}{2\cdot\tau_x}\right),\\ \sigma_{yI}^2(t_D) &= \sigma_v^2 \cdot t_D^2 \Big/ \left(1 + \frac{t_D}{2\cdot\tau_y}\right)\\ \sigma_{zI}^2(t_D) &= \sigma_w^2 \cdot t_D^2 \Big/ \left(1 + \frac{t_D}{2\cdot\tau_z}\right),\end{aligned} \qquad (5.33)$$

где $\sigma_u^2, \sigma_v^2, \sigma_w^2$ - дисперсии скорости ветра в продольном, поперечном и вертикальном направлениях соответственно;

τ_x, τ_y, τ_z - лагранжевы временные масштабы.

Дисперсии скорости ветра σ_u^2, σ_v^2, σ_w^2 аппроксимируются выражениями, полученными на основе работ [12–19]:

$$\sigma_u^2 = \sigma_v^2 = (2 \cdot u_*)^2 \cdot \left[0{,}1 \cdot \left(3{,}8 - \frac{z}{H} \right)^{3/2} + \Phi_1 \right], \tag{5.34}$$

$$\sigma_w^2 = (1{,}5 \cdot u_*)^2 \cdot \left(1 - 0{,}9 \cdot \frac{z}{H} \right) \cdot \Phi_2^{-2}(z), \tag{5.35}$$

где $$\Phi_1 = \begin{cases} 0{,}1 \cdot (-\mu)^{2/3}, & \text{при } L^{-1} \le 0 \\ 0, & \text{при } L^{-1} \ge 0; \end{cases} \tag{5.36}$$

$$\Phi_2(z) = \begin{cases} \left(1 - 0{,}26 \cdot \mu \cdot \left(\frac{z}{H} \right)^{2/3} \right)^{-1/3}, & \text{при } L^{-1} \le 0 \\ [1 + 0{,}02 \cdot \beta_u \cdot \mu]^{1/2}, & \text{при } L^{-1} \ge 0; \end{cases} \tag{5.37}$$

β_u=4,7.

Лагранжевы временные масштабы τ_x, τ_y, τ_z представляются соотношениями

$$\tau_z = \frac{\kappa \cdot z \cdot (1 - 0{,}9 \cdot z/H)}{1{,}5^2 \cdot u_*} \cdot \frac{\Phi_2^2(z)}{\Phi_2(\tilde{z})} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + v_g^2}}, \tag{5.38}$$

$$\tau_y = \tau_x = \tau_z \cdot \left(\frac{\sigma_v}{\sigma_w} \right)^2 \cdot c, \tag{5.39}$$

где $$\tilde{z} = \begin{cases} z, & \text{при } z \le 0{,}1 \cdot H \\ 0{,}1 \cdot H, & \text{при } z > 0{,}1 \cdot H; \end{cases} \tag{5.40}$$

v_g - безразмерный параметр, учитывающий влияние гравитационного оседания ЗВ, вычисляемый согласно [18] по формуле

$$v_g = \frac{4 \cdot V_R}{\sigma_w}; \tag{5.41}$$

$$V_R(t_D; t_k) = \begin{cases} V_{Ra}, & \text{для аэрозольных частиц ЗВ} \\ 0, & \text{для невесомого ЗВ} \end{cases} \tag{5.42}$$

V_{Ra} определены в В.2.2 (приложение В);

$$c = 4 \cdot 10^{-0{,}157 \cdot z_0} + \left(0{,}4 \cdot z_0^{-1/7} + 0{,}055 \cdot z_0^{4/3}\right) \cdot \frac{\mu + |\mu|}{2} \qquad (5.43)$$

5.7.1.3 Для вычисления дисперсий $\sigma^2_{xs}(t_D)$, $\sigma^2_{ys}(t_D)$, обусловленных сдвигом ветра в ПСА, входными параметрами являются параметры, которые используются для вычисления $\sigma^2_{xl}(t_D), \sigma^2_{yl}(t_D), \sigma^2_{zl}(t_D)$, дополненные значениями вертикальных профилей модуля U и направления φ ветра в ПСА.

Горизонтальные дисперсии облака ЗВ $\sigma^2_{xs}(t_D), \sigma^2_{ys}(t_D)$, обусловленные влиянием сдвига и поворота ветра с высотой, представляются согласно [18,20,21] в виде

$$\sigma^2_{xs}(t_D) = a_x(t) \cdot t_D^3, \qquad \sigma^2_{ys}(t_D) = a_y(t) \cdot t_D^3, \qquad (5.44)$$

где $a_x(t) = a_0 \cdot \Gamma_u^2 \cdot K_{za} \Big/ \left[1 + \left(t_D / t_\Lambda\right)^3\right]^{2/3}$; $a_y(t) = a_0 \cdot \Gamma_v^2 \cdot K_{za} \Big/ \left[1 + \left(t_D / t_\Lambda\right)^3\right]^{2/3}$;

$\Gamma_u = \frac{\partial u_1}{\partial z}$, $\Gamma_v = \frac{\partial v_1}{\partial z}$ - средние вертикальные градиенты продольной и поперечной компонент скорости ветра в слое $[z_1,z_2]$: $z_1=\max\{z_\phi, z_c-\sigma_z(z_c)\}$; $z_2=\min\{H, z_c+\sigma_z(z_c)\}$);

$K_{za} = \overline{\sigma_w^2 \cdot \tau_z}$ - средний вертикальный коэффициент турбулентности в слое $[z_1,z_2]$;

$t_\Lambda = \frac{H^2}{(a_0 \cdot b_0)^{1/2} \cdot K_{za}}$ - характерное время наступления режима t^2 для $\sigma^2_{xs}(t_D), \sigma^2_{ys}(t_D)$;

a_0=0,09;

b_0=40.

Средние вертикальные градиенты скорости ветра Γ_u, Γ_v с учетом ограничения на наиболее вероятные максимальные значения рассчитываются по следующим формулам:

$$\Gamma_u = \min\{|\Gamma_{ua}|, \Gamma_{max}\}, \qquad \Gamma_v = \min\{|\Gamma_{va}|, \Gamma_{max}\}, \qquad (5.45)$$

где
$$\Gamma_{ua} = \begin{cases} \frac{u_1(z_2) - u_1(z_1)}{z_2 - z_1}, & \text{при } z_2 - z_1 \ge 0{,}1 \cdot H \\ 0, & \text{при } z_2 - z_1 < 0{,}1 \cdot H \quad \text{или} \quad U(z_c) < 1 \text{ м/с}; \end{cases} \qquad (5.46)$$

$$\Gamma_{va} = \begin{cases} \frac{v_1(z_2) - v_1(z_1)}{z_2 - z_1}, & \text{при } z_2 - z_1 \ge 0{,}1 \cdot H \\ 0, & \text{при } z_2 - z_1 < 0{,}1 \cdot H \quad \text{или} \quad U(z_c) < 1 \text{ м/с}; \end{cases} \qquad (5.47)$$

$$\Gamma_{max} = \exp\left(-3{,}34 + 1{,}6 \cdot \operatorname{arctg}\left(7{,}84 \cdot 10^{-2} \cdot \mu + 3{,}77 \cdot 10^{-2} \cdot (\mu + |\mu|)\right)\right); \qquad (5.48)$$

$u_1(z)=U\cdot\cos(\varphi-\varphi_c)$, $v_1(z)=U\cdot\sin(\varphi-\varphi_c)$ – компоненты скорости ветра в системе координат с началом в центре тяжести облака (x_c,y_c,z_c) и направлением оси x_1 по направлению ветра φ_c в центре тяжести облака.

Для определения среднего в слое $[z_1,z_2]$ значения коэффициента турбулентной диффузии K_{za} получены соотношения

при $L^{-1}<0$

$$K_{za}=\begin{cases}\dfrac{1}{\Phi_2\left(\dfrac{z_1+z_2}{2}\right)}\cdot F(z_1,z_2), & \text{при } z_1<z_2\le 0{,}1\cdot H\\ \dfrac{\phi(0{,}1\cdot H,z_1)}{\Phi_2\left(\dfrac{z_1+0{,}1\cdot H}{2}\right)}\cdot F(z_1,0{,}1\cdot H)-\dfrac{\phi(z_2,0{,}1\cdot H)}{\Phi_2(0{,}1\cdot H)}\cdot F(0{,}1\cdot H,z_2), & \text{при } z_1<0{,}1\cdot H<z_2\\ \dfrac{1}{\Phi_2(0{,}1\cdot H)}\cdot F(z_1,z_2), & \text{при } 0{,}1\cdot H\le z_1<z_2;\end{cases} \qquad (5.49)$$

при $L^{-1}\ge 0$

$$K_{za}=\frac{1}{\Phi_2(H)}\cdot F(z_1,z_2), \qquad (5.50)$$

где $F(z_1,z_2)=\dfrac{\kappa\cdot u_*\cdot H}{4}\cdot\left[2\cdot\dfrac{z_1+z_2}{H}-2{,}4\cdot\dfrac{z_1^2+z_1\cdot z_2+z_2^2}{H^2}+0{,}81\cdot\dfrac{(z_1+z_2)\cdot(z_1^2+z_2^2)}{H^3}\right]$,

$$\phi(x,y)=\frac{x-y}{z_2-z_1}$$

5.7.1.4 Поскольку во время переноса облака ЗВ может иметь место пространственно-временное изменение метеоусловий, то расчеты σ-кривых лучше проводить на основе формул (5.32), (5.33) и (5.44) методом накопления. Тогда значения дисперсий для времени $(t_D+\Delta\tau)$ определяются по их значениям во время t_D следующим образом:

$$\sigma_x^2(t_D+\Delta\tau)=\sigma_x^2(t_D)+\frac{2\sigma_u^2\cdot t_D\cdot\left(1+\dfrac{t_D}{4\tau_x}\right)}{\left(1+\dfrac{t_D}{2\tau_x}\right)^2}\cdot\Delta\tau+3a_x(t)\cdot t_D^2\cdot\frac{\left(1+\dfrac{1}{3}\left(\dfrac{t_D}{t_\Lambda}\right)^3\right)}{\left(1+\left(\dfrac{t_D}{t_\Lambda}\right)^3\right)}\cdot\Delta\tau; \qquad (5.51)$$

$$\sigma_y^2(t_D+\Delta\tau)=\sigma_y^2(t_D)+\frac{2\sigma_v^2\cdot t_D\cdot\left(1+\frac{t_D}{4\tau_y}\right)}{\left(1+\frac{t_D}{2\tau_y}\right)^2}\cdot\Delta\tau+3a_y(t)\cdot t_D^2\cdot\frac{\left(1+\frac{1}{3}\left(\frac{t_D}{t_\Lambda}\right)^3\right)}{\left(1+\left(\frac{t_D}{t_\Lambda}\right)^3\right)}\cdot\Delta\tau; \quad (5.52)$$

$$\sigma_z^2(t_D+\Delta\tau)=\sigma_z^2(t_D)+\frac{2\sigma_w^2\cdot t_D\cdot\left(1+\frac{t_D}{4\tau_z}\right)}{\left(1+\frac{t_D}{2\tau_z}\right)^2}\cdot\Delta\tau. \quad (5.53)$$

Начальные значения $\sigma_x^2(t_D),\sigma_y^2(t_D),\sigma_z^2(t_D)$, определяются по (5.33) при $t_D=\Delta t_s$, где Δt_s – «виртуальное» время.

5.7.2 Обобщённые дисперсионные σ-кривые в СА

Аппроксимационные формулы для дисперсий облаков ЗВ $\sigma_x^2,\sigma_y^2,\sigma_z^2$ в СА, примыкающем к ПСА, вычисляются по алгоритму, представленному в 5.7.1 на высоте H, равной высоте верхней границы ПСА и при отсутствии влияния сдвига ветра ($a_x = a_y = 0$), т.е.

$$\sigma_x(x_{CA},y_{CA},z_{CA},t)=\sigma_x(x_{CA},y_{CA},H,t),$$
$$\sigma_y(x_{CA},y_{CA},z_{CA},t)=\sigma_y(x_{CA},y_{CA},H,t), \quad (5.54)$$
$$\sigma_z(x_{CA},y_{CA},z_{CA},t)=\sigma_z(x_{CA},y_{CA},H,t),$$

при условии $a_x = a_y = 0$,

где (x_{CA},y_{CA},z_{CA}) - координаты центра тяжести облака, находящегося в СА ($z_{CA} > H$).

6 Порядок расчета по локальной модели

6.1 Общие положения модели

6.1.1 В качесте локальной модели используется гауссова модель, которая позволяет рассчитывать распространение ЗВ на расстояниях не более 10 км от источника и делать ориентировочную экспресс-оценку переноса ЗВ на расстояния не более 30 км с высотой выброса менее 150 м в ПСА. Химические превращения или радиоактивный распад ЗВ учитывается в виде реакций первого порядка без рассмотрения новых химических образований и дочерних радионуклидов.

параметром, оценивающим вымывающую способность дождя при интенсивности I=1 мм/ч для разных видов ЗВ, и его значения для ряда веществ даны в таблице В.2. Параметр γ_1 характеризует относительную вымывающую способность атмосферных осадков различных типов и его значение дано в таблице В.4. Интенсивности осадков I в моделях переноса и рассеяния ЗВ является входной величиной.

Таблица В.4 – Относительная вымывающая способность γ_1 атмосферных осадков различных типов

Параметр	Относительная вымывающая способность от типа атмосферных осадков				
	дождь	дождь с грозой	дождь со снегом	ливневые осадки	снег
γ_1	1	1,1	2,4	2,8	3,0

6.1.2 Локальная модель позволяет рассчитать поля приземной и проинтегрированной по времени концентрации ЗВ, а также поле выпадения ЗВ на подстилающую поверхность.

6.1.3 При расчетах определяются концентрации, относящиеся к 10-минутному интервалу осреднения.

6.1.4 В случае действия нескольких источников поля концентрации суммируются.

6.1.5 Модель предназначена для расчета распространения ЗВ в ПСА над однородной местностью при стационарных метеоусловиях, которые определяются в месте аварии в момент ее возникновения.

6.2 Основные положения метода расчета

6.2.1 Концептуально в гауссовых моделях предполагается, что рассеяние в атмосфере неоседающго ЗВ по горизонтали и по вертикали происходит по нормальному закону распределения при постоянных направлении и скорости ветра и условиях сохранения устойчивости атмосферы в течение времени переноса.

Фактически гауссовы модели представляют собой набор эмпирических формул для описания многочисленных экспериментальных данных по рассеянию ЗВ в атмосфере и предназначены для расчета приземных концентраций. Хотя формально по ним можно определять вертикальные профили концентрации ЗВ, но точность таких расчетов не высока. Последние используются, как правило, при расчетах интегральных характеристик (например, при учете процессов вымывания ЗВ атмосферными осадками). Необходимость дополнительного учета ряда важных физических процессов, влияющих на перенос, рассеяние и осаждение ЗВ, вынуждает ввести ряд поправок в гауссовы модели [22-25] , ЕК НТД 38.220.56. Поправки касаются учета отражения ЗВ от верхней границы ПСА, его взаимодействия с подстилающей поверхностью, гравитационного оседания, влажного выведения, радиоактивного распада, химических превращений и т.д. В последнее время гауссовы модели дополнены соотношениями, позволяющими использовать их в условиях слабого ветра и штиля ДВ-98, [26].

6.2.2 При оценке уровня загрязнения окружающей среды в аварийных ситуациях на ПОО широко используются гауссовы модели распространения ЗВ в атмосфере от мгновенного или непрерывно действующего точечного источника ДВ–98, МПА–98, РД 03–26, [1]. На основе этих двух типов моделей строятся модели гауссова типа, описывающие перенос и рассеяние ЗВ от источников различной пространственной конфигурации и времени действия.

ЗВ, рапространяющееся в виде облака, моделируется мгновенным источником, а в виде факела - источником непрерывного времени действия. На практике при расчетах приземной концентрации ЗВ по гауссовой модели от источника с координатами (x_s,y_s,z_s) конечного времени действия продолжительностью t_s и с началом выброса в момент времени t_1 используется модель непрерывно действующего источника и приближенно полагается, что в точке наблюдения на оси следа на расстоянии x по направлению ветра со скоростью U ЗВ появляется в момент времени $(t_1 + (x - x_s)/U)$ и уровень концентрации ЗВ сохраняется постоянным в течение всего времени действия t_s источника до времени $(t_1 + t_s + (x - x_s)/U)$.

В гауссовой модели ЗВ от источника распространяется прямолинейно по направлению ветра.

6.3 Входная информация

По входной информации, которую можно разделить на три основных типа (геоинформация, характеристика источника и метеорологическая информация), проводится определение и расчет параметров для локальной модели. Геоинформация и характеристика источника те же, что и для мезомасштабной модели, описание которых представлено в 5.3.2 и 5.3.3. Набор параметров, определяемый метеорологическими условиями во время распространения ЗВ, следущий:

а) скорость U и направление ветра Fi на высоте выброса;

б) температуры окружающей среды T_2, $T(z_s)$ на высоте (2±0,1) м и на высоте выброса z_s, соответственно;

в) интенсивность I и тип γ_1 осадков или эффективная величина осадков ($I \cdot \gamma_1$);

г) интегральные характеристики ПСА:

1) категория устойчивости атмосферы;

2) высота слоя перемешивания H.

В приложении Г дан способ оценки этих параметров по данным приземных наблюдений на метеостанциях в районе ПОО, которым можно воспользоваться для определения перечисленных метеопараметров.

6.4 Расчеты полей концентрации и плотности выпадения из факела и облака ЗВ при наличии ветра

6.4.1 Вычисления концентрации ЗВ в атмосфере

6.4.1.1 Концентрация ЗВ q(x,y,z,t) рассчитывается с учетом как его взаимодействия с подстилающей поверхностью и верхней границей ПСА, так и гравитационного оседания, влажного выведения и, в зависимости от физико-химических свойств ЗВ, его химического превращения или радиоактивного распада для $t>t_1$, где t_1 – начало действия источника, по формулам:

– для мгновенного источника

$$q(x,y,z,t) = Q \cdot F(x) \cdot G_{мгн}(x,y,z,t), \qquad (6.1)$$

– *для источника конечного времени действия* t_s

$$q(x,y,z,t) = M \cdot F(x) \cdot G_{дл}(x,y,z) \cdot \theta\left(t - t_1 - \frac{x - x_s}{U}\right) \cdot \theta\left(t_s + \frac{x - x_s}{U} + t_1 - t\right), \qquad (6.2)$$

где F(x) – функция обеднения источника;

$G_{мгн}(x,y,z,t)$ – фактор разбавления для мгновенного источника, $м^{-3}$, вычисляемый по формуле (6.3);

$G_{дл}(x,y,z)$ – фактор разбавления ЗВ в атмосфере для источника непрерывного действия, $с/м^3$, вычисляемый по формуле (6.4).

6.4.1.2 Фактор разбавления ЗВ в атмосфере определяется:

– для мгновенного источника $G_{мгн}(x,y,z,t)$ по формуле

$$G_{мгн}(x,y,z,t) = \frac{e^{-\frac{(x-x_s-U\cdot(t-t_1))^2}{2\cdot\sigma_x^2(x_D)} - \frac{(y-y_s)^2}{2\cdot\sigma_y^2(x_D)}}}{(2\pi)^{3/2}\cdot\sigma_x(x_D)\cdot\sigma_y(x_D)\cdot\sigma_z(x_D)} \cdot \left[e^{-\frac{(z-h)^2}{2\cdot\sigma_z^2(x_D)}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{2\cdot\sigma_z^2(x_D)}} + A_J(x,z)\right], \qquad (6.3)$$

– для источника непрерывного действия $G_{дл}(x,y,z)$

$$G_{дл}(x,y,z) = \frac{e^{-\frac{(y-y_s)^2}{2\sigma_y^2(x_D)}}}{2\pi\cdot\sigma_y(x_D)\cdot\sigma_z(x_D)\cdot U} \cdot \left[e^{-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2(x_D)}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2(x_D)}} + A_J(x,z)\right], \qquad (6.4)$$

где h - высота начального подъема ЗВ из источника, м, вычисляемая по формуле (6.6);

$\sigma_x^2(x_D)$, $\sigma_y^2(x_D)$, $\sigma_z^2(x_D)$ - дисперсии распределения ЗВ в продольном, поперечном и вертикальном направлениях соответственно, вычисляемые в подразделе 6.6;

$x_D = x - x_s$ – длина пути диффузии;

$A_J(x,z)$ - выражение, учитывающее полное отражение ЗВ от верхней границы ПСА.

Расчет отражения от верхней границы ПСА $A_J(x,z)$ осуществляется как

$$A_J(x,z)=\sum_{j=1}^{J}\left[e^{-\frac{(z-h-2\cdot j\cdot H)^2}{2\cdot\sigma_z^2(x_D)}}+e^{-\frac{(z-h+2\cdot j\cdot H)^2}{2\cdot\sigma_z^2(x_D)}}+e^{-\frac{(z+h-2\cdot j\cdot H)^2}{2\cdot\sigma_z^2(x_D)}}+e^{-\frac{(z+h+2\cdot j\cdot H)^2}{2\cdot\sigma_z^2(x_D)}}\right], \quad (6.5)$$

где J - число волн отражения ЗВ от верхней границы ПСА, в локальной зоне ПОО, как правило, принимается равным 1 или 2.

6.4.1.3 Высота подъема ЗВ из источника h, м, рассчитывается по формуле

$$h=\max\{2,\ z_s+\Delta h-\Delta h_R\}, \quad (6.6)$$

где z_s – начальная высота источника, определяемая согласно формуле (Е.9) (приложение Е);

Δh – высота начального подъема ЗВ при выбросе из венттрубы за счет тепловых и динамических факторов, рассчитываемая по формулам (В.2) – (В.4) (приложение В) с заменой $(t-t_k)$ на x_D/U, а для источников, распределение которых по высоте задано $(h_{min}\neq h_{max})$, полагается $\Delta h=0$, м;

$\Delta h_R=V_R\cdot x_D/U$ – понижение центра тяжести облака за счет гравитационного оседания, м;

$V_R = V_R(x-x_s)$ – скорость оседания;

$$V_R(x-x_s)=\begin{cases}V_{Ra}, & \text{для аэрозольных частиц}\\ 0, & \text{для невесомого ЗВ;}\end{cases} \quad (6.7)$$

V_{Ra} – определено в В.2.2.1 (приложение В).

6.4.1.4 Функция обеднения источника F(x) представляется в виде

$$F(x)=f_r(x)\cdot f_w(x)\cdot f_{V_d}(x), \quad (6.8)$$

где $f_{V_d}(x)$, $f_w(x)$, $f_r(x)$ – факторы обеднения источника за счет сухого осаждения, вымывания осадками и химического превращения или радиоактивного распада, соответственно,

$$f_{V_d}(x)=\exp\left[-\sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{V_d}{U}\int_0^{x-x_s}\frac{1}{\sigma_z(\chi)}\cdot\exp\left(-\frac{h^2}{2\cdot\sigma_z^2(\chi)}\right)d\chi\right], \quad (6.9)$$

$$f_w(x)=\exp\left(-\lambda_2\cdot\frac{x-x_s}{U}\right),\qquad f_r(x)=\exp\left(-\lambda_1\cdot\frac{x-x_s}{U}\right), \quad (6.10)$$

где V_d – скорость сухого осаждения, м/с;

λ_1 – постоянная химического превращения или радиоактивного распада, $с^{-1}$;

λ_2 – коэффициент вымывания осадками, $с^{-1}$.

Для вычисления $f_{V_d}(x)$ можно воспользоваться аппроксимационной формулой, полученной приближенным интегрированием выражения (6.9) и имеющей следующий вид, представленный в [26],

$$f_{V_d}(x)=\exp\left\{-\sqrt{\frac{2}{\pi}}\cdot\frac{V_d\cdot(x-x_s)}{U\cdot\sigma_z(x_D)}\cdot\sqrt{\left(-Ei\left(-\frac{h^2}{2\cdot\sigma_z^2(x_D)}\right)\right)\cdot\left[e^{-\frac{h^2}{2\cdot\sigma_z^2(x_D)}}-\sqrt{\frac{\pi}{2}}\cdot\frac{h}{\sigma_z(x_D)}\cdot\left(1-\Phi\left(\frac{h}{\sqrt{2}\cdot\sigma_z(x_D)}\right)\right)\right]}\right\}, \quad (6.11)$$

где $Ei(-a)=\int_a^{\infty}\frac{e^{-\tau}}{\tau}d\tau$ - интегральная показательная функция;

$\Phi(a)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\cdot\int_0^a e^{-\tau^2}d\tau$ - интеграл вероятности.

Определение V_R, V_d, λ_1, λ_2 проводится по алгоритмам, приведенным в В.2 (приложение В).

6.4.2 Проинтегрированная по времени приземная концентрация

Проинтегрированная по времени приземная концентрация $q_{пвк}$ за интервал времени $(t-t_1)$ используется для оценки ряда последствий прохождения ЗВ в точке наблюдения и вычисляется по формулам:

– для мгновенного источника

$$q_{пвк}(x,y,t)=\begin{cases}0, & \text{при } t<t_1+\frac{x-x_s}{U}\\ Q\cdot F(x)\cdot G_{дл}(x,y,0) & \text{при } t>t_1+\frac{x-x_s}{U},\end{cases} \quad (6.12)$$

– для источника конечного времени действия

$$q_{пвк}(x,y,t)=\begin{cases}q(x,y,0,t)\cdot\left(t-t_1-\frac{x-x_s}{U}\right) & \text{при } t\le t_1+t_s+\frac{x-x_s}{U}\\ q\left(x,y,0,t_1+t_s+\frac{x-x_s}{U}\right)\cdot t_s, & \text{при } t>t_1+t_s+\frac{x-x_s}{U}.\end{cases} \quad (6.13)$$

6.4.3 Плотность выпадения ЗВ

6.4.3.1 Плотность выпадения ЗВ на подстилающую поверхность D(x,y,t) за интервал времени $(t-t_1)$, обусловленная сухим $D_d(x,y,t)$ и влажным $D_w(x,y,t)$ выведением ЗВ, определяется по формуле

$$D(x,y,t) = D_d(x,y,t) + D_w(x,y,t). \qquad (6.14)$$

6.4.3.2 Сухое осаждение ЗВ $D_d(x,y,t)$ рассчитывается по формуле

$$D_d(x,y,t) = V_d \cdot q_{пвк}(x,y,t) \cdot e^{-\lambda_1\left(t-t_1-\frac{x-x_s}{U}\right)}, \qquad (6.15)$$

где $q_{пвк}$ вычисляется по формуле (6.12) для мгновенного источника, и по формуле (6.13) для источника конечного времени действия.

6.4.3.3 Влажное выведение ЗВ $D_w(x,y,t)$ вычисляется по формулам:

– для мгновенного источника

$$D_w(x,y,t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < t_1 + \dfrac{x-x_s}{U} \\ \dfrac{Q \cdot F(x) \cdot e^{-\frac{(y-y_s)^2}{2\cdot\sigma_y^2(x_D)}} \cdot e^{-\lambda_1\left(t-t_1-\frac{x-x_s}{U}\right)}}{\sqrt{2\pi}\cdot U \cdot \sigma_y(x_D)}\lambda_2, & \text{при } t > t_1 + \dfrac{x-x_s}{U}, \end{cases} \qquad (6.16)$$

– для источника конечного времени действия

$$D_w(x,y,t) = \frac{\lambda_2 \cdot M \cdot F(x)}{2\cdot\sqrt{2\pi}\cdot U \cdot \sigma_y(x_D)} \cdot e^{-\frac{(y-y_s)^2}{2\cdot\sigma_y^2(x_D)}} \cdot e^{-\lambda_1\left(t-t_1-\frac{x-x_s}{U}\right)} \times \times\left(t_s + \left|t-t_1-\frac{x-x_s}{U}\right| - \left|t-t_1-t_s-\frac{x-x_s}{U}\right|\right). \qquad (6.17)$$

Напомним, что расчеты по формулам (6.1) – (6.17) гауссовых моделей применимы только при скоростях ветра U не менее 1 м/с.

6.5 Расчет приземной концентрации и плотности выпадения ЗВ в условиях слабого ветра и штиля

6.5.1 Особенности рассеяния ЗВ при слабом ветре и штиле

Ветровой режим оказывает существенное влияние на перенос и рассеяние ЗВ в атмосфере. При ослаблении ветра до U < 1 м/с возникают предпосылки формирования повышенного уровня загрязнения ПСА, причем продолжительность штилей оказывает существенное влияние на повышение концентрации вблизи источника. При слабых

ветрах и штилях рассеяние ЗВ за счет диффузии начинает превалировать над его адвективным переносом, что приводит как для мгновенного, так и для источника конечного времени действия к накоплению ЗВ вблизи источника в форме облака, расширение которого происходит в основном за счет диффузии и определяется временем диффузии $t_D=t-t_1$. Слабый ветер только несколько искажает форму штилевого облака, деформируя и вытягивая его в направлении ветра.

В условиях слабого ветра и штиля вычисления полей приземной концентрации, ПВК и плотности выпадения ЗВ на подстилающую поверхность не реализуется стандартными гауссовыми моделями, алгоритмы которых представлены в 6.4. Поэтому *были разработаны алгоритмы для гауссовых моделей при слабом ветре и штиле ДВ-98*, [26].

6.5.2 Расчет приземной концентрации в условиях слабого ветра и штиля

6.5.2.1 Приземная концентрация в условиях слабого ветра и штилей $q^{st}(x,y,0,t)$ в рамках гауссовых моделей определяется следующим образом:

– для мгновенного источника

$$q^{st}(x,y,0,t)=Q\cdot F(t_x)\cdot G^{st}_{мгн}(x,y,0,t), \tag{6.18}$$

– для источника конечного времени действия t_s

$$q^{st}(x,y,0,t)=M\cdot F(t_x)\cdot\left|G^{st}_{дл}(x,y,0,t_D)-G^{st}_{дл}(x,y,0,t_\Delta)\right|, \tag{6.19}$$

где $t_x=\dfrac{x-x_s}{2\cdot c_3}$ (при U = 1 м/с); (6.20)

c_3 – определяется по формуле (6.44);

$$t_D=t-t_1;\quad t_\Delta=\max\{0,\ t_D-t_s\}; \tag{6.21}$$

$G^{st}_{мгн}$, $G^{st}_{дл}$ – факторы разбавления для мгновенного по формуле (6.22), $м^{-3}$, и непрерывно действующего по формуле (6.23), $с\cdot м^{-3}$, источника при штилях и слабом ветре, соответственно.

6.5.2.2 Штилевые факторы разбавления $G^{st}_{мгн}(x,y,z,t)$, $G^{st}_{дл}(x,y,z,t)$ без учета влияния верхней границы ПСА представляются в виде:

– для мгновенного источника

$$G^{st}_{мгн}(x,y,z,t)=\frac{e^{-\frac{(x-x_s-U\cdot(t-t_1))^2}{2\cdot\sigma_x^2(t_D)}-\frac{(y-y_s)^2}{2\cdot\sigma_y^2(t_D)}}}{(2\pi)^{3/2}\cdot\sigma_x(t_D)\cdot\sigma_y(t_D)\cdot\sigma_z(t_D)}\left[e^{-\frac{(z-h)^2}{2\cdot\sigma_z^2(t_D)}}+e^{-\frac{(z+h)^2}{2\cdot\sigma_z^2(t_D)}}\right], \tag{6.22}$$

– для источника конечного времени действия

$$G^{st}_{дл}(x,y,z;t_D) = \int_0^{t_D} G^{st}_{мгн}(x,y,z,\tau)\,d\tau. \qquad (6.23)$$

Для приземной концентрации интеграл в формуле (6.23) можно вычислять или численно, или по аппроксимационной формуле ДВ-98, [26]

$$G^{st}_{дл}(x,y,0;t_D) = \left(\max\left\{G^{st}_1(x,y,0;t_D), G^{st}_2(x,y,0;t_D)\right\}\right)^{\alpha_1} \cdot \left(\min\left\{G^{st}_1(x,y,0;t_D), G^{st}_2(x,y,0;t_D)\right\}\right)^{1-\alpha_1}, \qquad (6.24)$$

где $G^{st}_1(x,y,0;t)$, $G^{st}_2(x,y,0;t)$, α_1 – вспомогательные функции, выражения для которых представлены в формулах (Д.1) – (Д.3) (приложение Д).

6.5.2.3 Для расчета дисперсии штилевого облака ЗВ на практике используются обычные функциональные выражения для σ-кривых, данные в формулах (6.40), в которых делается замена переменных $x_D = t_D \cdot U$, полагая U = 1 м/с.

6.5.2.4 Функция обеднения источника F(t) в штилевых условиях представляется в виде

$$F(t) = f_r(t) \cdot f_w(t) \cdot f_{V_d}(t), \qquad (6.25)$$

где f_r, f_w, f_{V_d} – факторы обеднения за счёт сухого осаждения, вымывания осадками и химического превращения или радиоактивного распада, соответственно.

6.5.2.5 Факторы обеднения источника $f_{V_d}(t)$, $f_w(t)$, $f_r(t)$ в штилевых условиях определяются выражениями

$$f_{V_d}(t) = \exp\left[-\sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot V_d \cdot \int_0^t \frac{1}{\sigma_z(\tau)} \cdot \exp\left(-\frac{h^2}{2\cdot\sigma_z^2(\tau)}\right) d\tau\right], \qquad (6.26)$$

$$f_w(t) = \exp(-\lambda_2 \cdot t), \qquad (6.27)$$

$$f_r(t) = \exp(-\lambda_1 \cdot t). \qquad (6.28)$$

Для вычисления $f_{V_d}(t)$ можно воспользоваться аппроксимационной формулой (6.11), сделав замену $x_D = t_D \cdot U$, полагая U = 1 м/с.

6.5.3 Проинтегрированная по времени приземная концентрация

Проинтегрированная по времени приземная концентрация $q^{st}_{пвк}$ за интервал времени $(t-t_1)$ при штилевых условиях вычисляется следующим образом:

– для мгновенного источника

$$q^{st}_{пвк}(x,y,t) = Q \cdot F(t_x) \cdot G^{st}_{дл}(x,y,0,t_D), \quad (6.29)$$

– для источника конечного времени действия

$$q^{st}_{пвк}(x,y,t) = M \cdot F(t_x) \cdot \left[t_D \cdot G^{st}_{дл}(x,y,0,t_D) - t_s \cdot G^{st}_{дл}(x,y,0,t_\Delta) - G^{st}_{дл\,\tau}(x,y,0,t_D) + G^{st}_{дл\,\tau}(x,y,0,t_\Delta)\right], \quad (6.30)$$

где $G^{st}_{дл}(x,y,0,t_D)$ – определяется формулой (6.23) и может вычисляться по формуле (6.24);

$$G^{st}_{дл\,\tau}(x,y,0,t_D) = \int_0^{t_D} \tau \cdot G^{st}_{мгн}(x,y,0,\tau) \cdot d\tau, \quad (6.31)$$

причем $G^{st}_{дл\,\tau}$ вычисляется по формуле (6.31) численно, или по аппроксимационной формуле

$$G^{st}_{дл\,\tau}(x,y,0;t_D) = \left(\max\left\{G^{st}_{дл\,\tau 1}(x,y,0;t_D), G^{st}_{дл\,\tau 2}(x,y,0;t_D)\right\}\right)^{\alpha_2} \cdot \left(\min\left\{G^{st}_{дл\,\tau 1}(x,y,0;t_D), G^{st}_{дл\,\tau 2}(x,y,0;t_D)\right\}\right)^{1-\alpha_2}, \quad (6.32)$$

где $G^{st}_{дл\,\tau 1}(x,y,0;t)$, $G^{st}_{дл\,\tau 2}(x,y,0;t)$, α_2 – вспомогательные функции, выражения для которых представлены в формулах (Д.4) – (Д.6) (приложение Д);

t_x, t_D, t_Δ – вычисляются по формулам (6.20), (6.21).

6.5.4 Плотность выпадения ЗВ

6.5.4.1 Плотность выпадения ЗВ на подстилающую поверхность $D^{st}(x,y,t)$ за время $(t-t_1)$, обусловленная сухим $D^{st}_d(x,y,t)$ и влажным $D^{st}_w(x,y,t)$ выведением ЗВ из атмосферы, определяется аналогично формуле (6.14)

$$D^{st}(x,y,t) = D^{st}_d(x,y,t) + D^{st}_w(x,y,t). \quad (6.33)$$

6.5.4.2 Сухое осаждение ЗВ $D^{st}_d(x,y,t)$ на подстилающую поверхность определяется проинтегрированным по времени потоком ЗВ на нее

$$D^{st}_d(x,y,t) = V_d \cdot q^{st}_{пвк}(x,y,t) \cdot e^{-\lambda_1 \cdot (t_D - t_x)}. \quad (6.34)$$

6.5.4.3 Влажное осаждение ЗВ $D^{st}_w(x,y,t)$ происходит за счет его вымывания атмосферными осадками и определяется не приземной концентрацией, как это имеет место при расчете $D^{st}_d(x,y,t)$, а количеством ЗВ в столбе воздуха, промываемого осадками. Для вычисления $D^{st}_w(x,y,t)$ требуется знание проинтегрированной по вертикали концентрации

– для мгновенного источника

$$D_w^{st}(x,y,t)=\lambda_2\cdot Q\cdot F(t_x)\cdot e^{-\lambda_1\cdot(t_D-t_x)}\cdot G_{дл\ z}^{st}(x,y,t), \tag{6.35}$$

– для источника конечного времени действия

$$D_w^{st}(x,y,t-t_1)=\lambda_2\cdot M\cdot F(t_x)\cdot e^{-\lambda_1\cdot(t_D-t_x)}\cdot\left[t_D\cdot G_{дл\ z}^{st}(x,y,t_D)-t_\Delta\cdot G_{дл\ z}^{st}(x,y,t_\Delta)-\right.$$
$$\left.-G_{дл\ z\tau}^{st}(x,y,t_D)+G_{дл\ z\tau}^{st}(x,y,t_\Delta)\right], \tag{6.36}$$

где $$G_{дл\ z}^{st}(x,y,t_D)=\int_0^{t_D}G_{мгн\ z}^{st}(x,y,\tau)d\tau; \tag{6.37}$$

$$G_{мгн\ z}^{st}(x,y,t)=\frac{\exp\left(-\frac{(x-x_s-U\cdot(t-t_1))^2}{2\cdot\sigma_x^2(t_D)}-\frac{(y-y_s)^2}{2\cdot\sigma_y^2(t_D)}\right)}{2\cdot\pi\cdot\sigma_x(t_D)\cdot\sigma_y(t_D)}; \tag{6.38}$$

$$G_{дл\ z\tau}^{st}(x,y,t)=\int_0^{t_D}\tau\cdot G_{мгн\ z}^{st}(x,y,z,\tau)d\tau. \tag{6.39}$$

Интегралы (6.37) и (6.39) вычисляются численно.

6.6 Горизонтальные и вертикальные дисперсии облака ЗВ

В настоящее время для вычисления дисперсий $\sigma_x^2(x_D)$, $\sigma_y^2(x_D)$, $\sigma_z^2(x_D)$, обусловленных турбулентностью среды, в условиях равнинной местности и для городских условий широко применяются в практических инженерных расчетах, использующих гауссовы модели [13,15,16,18,19,], дисперсионные σ-кривые Бриггса для $\sigma_y(x_D)$ в комбинации с кривыми Смита-Хоскера для $\sigma_z(x_D)$

$$\begin{cases}\sigma_y(x_D)=\dfrac{c_3\cdot x_D}{\sqrt{1+c_4\cdot 10^{-4}x_D}}\\ \sigma_z(x_D)=\dfrac{F(z_0,x_D)\cdot g(x_D)}{\sqrt{1+\nu_g^2}},\end{cases} \tag{6.40}$$

где

$$F(z_0,x_D)=\begin{cases}\ln\left[c_1\cdot x_D^{d_1}\cdot\left(1+\left(c_2\cdot x_D^{d_2}\right)^{-1}\right)\right] & \text{при } z_0>0{,}1\text{ м}\\ \ln\left[c_1\cdot x_D^{d_1}\cdot\left(1+c_2\cdot x_D^{d_2}\right)^{-1}\right] & \text{при } z_0\le 0{,}1\text{ м};\end{cases} \tag{6.41}$$

$$g(x_D)=\frac{a_1\cdot x_D^{b_1}}{1+a_2\cdot x_D^{b_2}}; \tag{6.42}$$

$v_g = \frac{4 \cdot V_R}{\sigma_w}$ – поправочный коэффициент, учитывающий влияние седиментации ЗВ;

V_R – определяется согласно соотношению (6.7);

$\sigma_w = \sqrt{2} \cdot c_{z1} \cdot u$ при u=max{1 м/с, U};

c_{z1} – вычисляется по аппроксимационной формуле согласно МПА-98;

$$c_{z1} = \frac{1}{12} \cdot \frac{(100 \cdot z_0)^{0,15+0,028 \cdot p_П}}{p_П^{0,20+0,12 \cdot p_П}}; \qquad (6.43)$$

$p_П$ – параметр устойчивости атмосферы по Паскуиллу.

Значения параметров c_3, a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, d_1, c_2, d_2 приведены [19], ЕК НТД 38.220.56 и представлены в таблицах 6.1 и 6.2.

Таблица 6.1 - Значения параметров, используемых в формулах (6.40) и (6.42) для расчета $\sigma_y(x_D)$ и $\sigma_z(x_D)$

Категория устойчивости по Паскуиллу $p_П$		Значения c_3 при			a_1	a_2	b_1	b_2
Обозначение	Значение	z_0=0,1 м	z_0=0,4 м	z_0=1 м				
A	0,5	0,22	0,27	0,33	0,112	$5{,}38 \cdot 10^{-4}$	1,06	0,815
B	1,5	0,16	0,20	0,24	0,130	$6{,}52 \cdot 10^{-4}$	0,950	0,750
C	2,5	0,11	0,14	0,17	0,112	$9{,}05 \cdot 10^{-4}$	0,920	0,718
D	3,5	0,08	0,10	0,12	0,098	$1{,}35 \cdot 10^{-3}$	0,889	0,688
E	4,5	0,06	0,07	0,09	0,0609	$1{,}96 \cdot 10^{-3}$	0,895	0,684
F	5,5	0,04	0,05	0,06	0,0638	$1{,}36 \cdot 10^{-3}$	0,783	0,672

Таблица 6.2 - Значения параметров, используемых в формуле (6.41) для расчета $\sigma_z(x_D)$

Параметр шероховатости z_0, м	Значения параметров для расчета $\sigma_z(x_D)$			
	c_1	d_1	c_2	d_2
0,01	1,56	0,0480	$6{,}25 \cdot 10^{-4}$	0,45
0,04	2,02	0,0269	$7{,}76 \cdot 10^{-4}$	0,37
0,1	2,72	0	0	0
0,4	5,16	-0,098	18,6	-0,225
1,0	7,37	-0,0957	$4{,}29 \cdot 10^{3}$	-0,60
4,0	11,7	-0,128	$4{,}59 \cdot 10^{4}$	-0,78

Параметр c_3 для $0{,}1 \le z_0 \le 3$ можно также вычислять по следующей интерполяционной формуле:

$$c_3 = 10^{a+b\left(\lg\frac{z_0}{4}\right)^2}, \qquad (6.44)$$

где $a = -3{,}85\cdot10^{-1} - 1{,}07\cdot10^{-1}\cdot p_п - 1{,}39\cdot10^{-3}\cdot p_п^2$;

$b = -7{,}16\cdot10^{-2} - 2{,}03\cdot10^{-2}\cdot p_п + 1{,}42\cdot10^{-3}\cdot p_п^2$.

Параметр c_4 учитывает характер местности [19] и равен

$$c_4 = \begin{cases} 1 & \text{- открытое поле } (z_0 = 0{,}1\text{ м}) \\ 1{,}5 & \text{- сельская застройка } (z_0 = 0{,}4\text{ м}) \\ 4 & \text{- городская застройка } (z_0 = 3\text{ м}) \end{cases} \qquad (6.45)$$

или представляется интерполяционной формулой

$$c_4 = (10\cdot z_0)^{0{,}21+0{,}13\cdot\lg(10z_0)}.$$

Дисперсия облака ЗВ по направлению переноса $\sigma_x^2(x_D)$ связана с дисперсией в поперечном направлении $\sigma_y^2(x_D)$ соотношением, полученным на основе данных диффузионных экспериментов [12],

$$\sigma_x(x_D) = a\cdot\sigma_y(x_D), \qquad (6.46)$$

где значение параметра *a* в зависимости от категории устойчивости даны в таблице 6.3.

Таблица 6.3 - Значения параметра *a* в зависимости от категорий устойчивости Паскуилла

Параметр	Значения параметра *a* в зависимости от категорий устойчивости Паскуилла					
	A	B	C	D	E	F
a	1	1,1	1,2	1,3	1,3	1,5

Отметим, что формула Бриггса для $\sigma_y(x_D)$ применима только до расстояний не более 10км [19], [27], однако на практике она часто используется для расстояний более 10 км.

6.7 Учет начальных размеров источника

6.7.1 Гауссова модель разработана для точечного источника. Для учета начальных размеров источника в локальной модели используется метод «виртуальных» источников, концентрация ЗВ от которых суммируется. Описание данного метода находится в 5.5.1.

6.7.2 При применении метода «виртуального» источника необходимо определить:

– «виртуальный» сдвиг источника Δx_s по оси x от реального источника против ветра;

– количество «виртуальных» источников $N=n_x\cdot n_y\cdot n_z$, где n_x, n_y, n_z – число делений источника по осям x, y, z, соответственно;

– координаты источников, моделирующих реальный источник и образующихся из «виртуальных» источников со сдвигом по ветру на Δx_s;

– массу (активность) Q_n выброса каждого n-го «виртуального» источника (n=1,2,...N).

6.7.3 Источник по высоте может быть протяженным с вертикальным размером

$$\delta_{ПСА}=h_{max}-h_{min}, \quad (6.58)$$

где его верхняя граница, ограниченная областью применимости гауссовой модели, должна удовлетворять неравенству:

$$h_{max} \le \min\{H,150м\}.$$

6.7.4 Алгоритмы вычисления параметров «виртуальных» источников даны в приложении Е.

6.7.5 Расчет концентрации ЗВ и плотности выпадения на подстилающую поверхность проводятся для каждого «виртуального» источника по алгоритмам, представленным в 6.4 и 6.5 с увеличением длины пути диффузии x_D на Δx_s и времени диффузии t_D на Δt_s. Рассчитанные поля концентраций и плотности выпадения ЗВ суммируются по всем «виртуальным» источникам.

7 Порядок расчета по модели «тяжелых» газов

7.1 Общие положения модели

7.1.1 При аварийном поступлении в атмосферу токсичных ЗВ, приводящих к образованию «тяжелых» газов, возникает необходимость оценки загрязнения ими окружающей среды. «Тяжелый» газ характеризуется отрицательной плавучестью, обусловленной или более высокой плотностью газа по сравнению с плотностью атмосферного воздуха, или низкой температурой. Для характеристики «тяжелого» газа вводится параметр δ, определяемый как $\delta = \rho_{эфф}/\rho - 1$ (при плотности «тяжелого» газа $\rho_{эфф}$ выше плотности атмосферного воздуха ρ и температуре $T_{эфф}$ равной температуре окружающей среды T), либо как $\delta = T/T_{эфф} - 1$ (при плотности $\rho_{эфф}$ равной плотности атмосферного воздуха ρ и температуре «тяжелого» газа $T_{эфф}$ ниже температуры окружающей среды). Оба определения δ идентичны в предположении, что уравнение состояния атмосферного воздуха ($P = R_. \cdot T \cdot \rho/m$) выполняется для облака или факела «тяжелого» газа. Для «тяжелого» газа значение δ больше нуля ($\delta > 0$). Расчет рассеяния облака или факела «тяжелого» газа, проводится по модели «тяжелых» газов.

7.1.2 Модель «тяжелых» газов рассчитывает распространение облака или факела «тяжелого» газа, которые перемещаются по направлению ветра. Модель «тяжелых» газов применима до тех пор, пока плотность и температура «тяжелого» газа не станут равны значениям соответствующих параметров окружающего атмосферного воздуха.

7.1.3 Модель «тяжелых» газов позволяет рассчитать пространственно-временные поля концентрации «тяжелых» газов в атмосфере от приземного аварийного источника.

7.1.4 Модель «тяжелых» газов применима для расчета распространения «тяжелых» газов над однородной поверхностью при стационарных метеоусловиях.

7.2 Общие положения метода расчета

7.2.1 Модель «тяжелых» газов основана на разработках [28,29], РД 03-26 рассчитывающих установившееся рассеяние «тяжелых» газов вблизи поверхности земли от приземного источника. В модели «тяжелых» газов полагается, что

– перенос «тяжелых» газов происходит вдоль оси x по направлению приземного ветра со средней скоростью в слое переноса;

– профиль концентрации «тяжелых» газов описывается модифицированной Гауссовой моделью облака для мгновенного источника или факела для конечного времени действия источника, используя значения приземной осевой концентрации $C_A(x)$, параметров поперечного $S_y(x)$, $r_y(x)$ и вертикального $S_z(x)$ рассеяния;

– значения неизвестных ($C_A(x)$, $S_y(x)$, $r_y(x)$, $S_z(x)$) определяются из уравнений, описывающих сохранение массы ЗВ, вовлечение окружающего атмосферного воздуха в облако (или факел), поперечное турбулентное рассеяние и гравитационное растекание «тяжелых» газов;

– на некотором удалении от источника, когда облако или факел «тяжелых» газов теряет свойство отрицальной плавучести, модель «тяжелых» газов плавно трансформируется в Гауссовую модель рассеяния ЗВ.

7.2.2 Модель «тяжелых» газов учитывает следующие процессы:

– адвективное движение облака или факела с переменной по высоте скоростью ветра;

– рассеяние облака или факела по вертикали за счет турбулентной диффузии;

– рассеяние облака или факела по горизонтали за счет турбулентной диффузии и гравитационного растекания;

– нагрев или охлаждение облака или факела за счет вовлечения окружающего воздуха.

7.2.3 В модель «тяжелых» газов введены следующие упрощающие предположения:

– ЗВ в атмосферу поступает в виде газа и/или жидкого аэрозоля. При температуре окружающей среды, Т, выше температуры кипения ЗВ, $T_{кип}$, аэрозоль мгновенно испаряется. При температуре окружающей среды Т ниже $T_{кип}$ жидкий аэрозоль сохраняется и расчет его рассеяния в атмосфере проводится по локальной или мезомасштабной модели, т.е. отсутствует учет фазовых переходов ЗВ в облаке или факеле в течение его распространения;

– осаждение «тяжелых» газов на подстилающую поверхность и его химические превращения при рассеянии не учитываются;

– отсутствует теплообмен с подстилающей поверхностью.

7.3 Входная информация

7.3.1 Входную информацию необходимую для расчетов переноса и рассеяния облака или факела «тяжелого» газа, в атмосфере можно подразделить на три основных типа: геоинформация, характеристика источника выброса и метеорологическая информация.

7.3.2 Необходимая геоинформация – это параметр шероховатости $z_0(x,y)$ подстилающей поверхности.

7.3.3 Параметры, характеризующие источник выброса «тяжелого» газа, определяются на основе сценария аварии либо специальной моделью источника, либо экспертно, и должны содержать следующие данные:

а) координаты источника выброса «тяжелого» газа (x_s,y_s);

б) геометрические характеристики источника выброса:

1) горизонтальный размер источника $B_{эфф}(0)$ равный или радиусу первоначального облака, или горизонтальной полуширине сечения плоскостью x=const факела выброса, м;

2) начальную высоту нижней h_{min}, м, и верхней h_{max} м, границ выброса;

в) временной режим действия источника выброса:

1) время начала выброса t_1, с;

2) длительность выброса t_s, с;

г) масса, кг, или скорость истечения, кг/с, ЗВ;

д) физико-химические свойства ЗВ:

1) молекулярный вес ЗВ $m_{ЗВ}$, кг/кмоль;

2) давление насыщенных паров ЗВ $P_н$, н/м^2, (или параметры A, B, C уравнения Антуана для вычисления $P_н$);

3) температура кипения ЗВ $T_{кип}$, К;

4) плотность газообразного ЗВ в выбросе $\rho_{эфф}(0)$, кг/м^3.

7.3.4 Параметры, определяющие метеоусловия во время распространения облака или факела «тяжелого» газа, в области переноса следующие:

а) скорость U , м/с, и направление Fi (откуда дует), град., ветра;

б) показатель в степенном профиле скорости ветра $b(p_T,z_0)$;

в) категория устойчивости атмосферы p_T;

г) динамическая скорость ветра u_*, м/с.

7.4 Расчет полей концентрации в облаке или факеле «тяжелых» газов

7.4.1 Концентрация «тяжелых» газов q(x,y,z,t) рассчитывается в зависимости от длительности t_s действия источника по формулам:

– для мгновенного источника

$$q(x,y,z,t) = q_A \cdot \exp\left[-\left(\frac{z}{S_z}\right)^{\beta_z}\right] \times \exp\left[-\frac{(x - x_s - U\cdot(t-t_1))^2 + (y-y_s)^2 - r_y^2 + \left|(x - x_s - U\cdot(t-t_1))^2 + (y-y_s)^2 - r_y^2\right|}{2\cdot S_y^2}\right], \quad (7.1)$$

– для источника конечного времени действия

$$q(x,y,z,t) = q_A \cdot \exp\left[-\left(\frac{z}{S_z}\right)^{\beta_z}\right] \cdot \exp\left[-\frac{\left(|y-y_s| - r_y + \left||y-y_s| - r_y\right|\right)^2}{4\cdot S_y^2}\right] \times \Theta\left((t-t_1)\cdot U_{эфф} - (x - x_s - r_y)\right) \cdot \Theta\left((t_1 + t_s - t)\cdot U_{эфф} + (x - x_s - r_y)\right), \quad (7.2)$$

где q_A – концентрация «тяжелого» газа для мгновенного источника в центре облака и на оси факела для источника конечного времени действия, кг/м^3;

S_y, S_z – поперечный и вертикальный коэффициенты дисперсии, соответственно, м;

r_y – поперечная полуширина средней части профиля концентрации, заполненная парами ЗВ с начальной плотностью $\rho_{эфф}(0,t_1)$, м;

β_z – коэффициент в профиле концентрации, определяемый показателем $b(p_T,z_0)$ в степенном профиле ветра (приложение Г), равный β_z=1+ b;

$U_{эфф}$ – средняя скорость движения облака или факела в слое переноса, м/с.

7.4.2 Источник «тяжелого» газа имеет форму:

– мгновенный источник – цилиндр с радиусом основания $B_{эфф}(0)$ и высотой h_{max} ($h_{min}=0$);

– источник конечного времени действия (например, испарение с пролива «тяжелого» газа) – прямоугольный параллелепипед со стороной основания квадрата, ориентированной по ветру, равной $B_{эфф}(0)$ и высотой h_{max} ($h_{min}=0$).

7.4.3 Для вычисления концентрации q(x,y,z,t) необходимо определить параметры q_A, S_y, r_y, S_z. В модели «тяжелых» газов эти переменные выражаются через эффективные характеристики облака или факела «тяжелого» газа:

$$B_{эфф} = \frac{1}{q(x,0,z)} \cdot \int_0^{\infty} q(x,y,z)dy = r_y + 0{,}5 \cdot \sqrt{\pi} \cdot S_y , \tag{7.3}$$

$$H_{эфф} = \frac{1}{q(x,y,0)} \cdot \int_0^{\infty} q(x,y,z)dz = \frac{1}{\beta_z} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta_z}\right) \cdot S_z , \tag{7.4}$$

$$U_{эфф} = \left(\int_0^{\infty} q(x,y,z)dz\right)^{-1} \cdot \int_0^{\infty} U \cdot q(x,y,z)dz = \frac{\Gamma\left(\frac{1+b}{\beta_z}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{\beta_z}\right)} \cdot U_ф \cdot \left(\frac{S_z}{z_ф}\right)^b , \tag{7.5}$$

$$M_{эфф} = \begin{cases} \frac{\rho_{эфф}}{q_A} \cdot \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\int_0^{\infty} q\,dx\,dy\,dz & \text{– для мгновенного источника} \\ \frac{\rho_{эфф}}{q_A} \cdot \int_{-\infty}^{\infty}\int_0^{\infty} U \cdot q\,dy\,dz & \text{– для источника конечного времени действия} \end{cases} =$$

$$= \eta_1 \cdot B_{эфф} \cdot H_{эфф} \cdot U_{эфф} \cdot \rho_{эфф} , \tag{7.6}$$

где $B_{эфф}$ – эффективный радиус облака или горизонтальная полуширина сечения факела поперек ветра, м;

$H_{эфф}$ – эффективная высота облака или факела, м;

$M_{эфф}$ – эффективная масса облака, кг, или эффективный расход через поперечное сечение факела «тяжелого» газа, кг/с;

$$\eta_1 = \begin{cases} \pi \cdot B_{эфф}/U_{эфф} & \text{– для мгновенного источника} \\ 2 & \text{– для источника конечного времени действия} \end{cases} ; \tag{7.7}$$

$\rho_{эфф}$ – эффективная плотность «тяжелого» газа в облаке или поперечном сечении факела, кг/м^3.

7.4.4 Для переменных q_A, S_y, r_y, S_z используются следующие уравнения:

– сохранения массы ЗВ в облаке или расхода ЗВ в факеле через сечение плоскостью x=const

$$E = \begin{cases} \int\limits_{-\infty}^{\infty}\int\limits_{-\infty}^{\infty}\int\limits_{0}^{\infty} q\,dx\,dy\,dz & \text{– для мгновенного источника} \\ \int\limits_{-\infty}^{\infty}\int\limits_{0}^{\infty} U \cdot q\,dy\,dz & \text{– для источника конечного времени действия} \end{cases} =$$

$$= q_A \cdot \eta_l \cdot B_{эфф} \cdot H_{эфф} \cdot U_{эфф}, \qquad (7.8)$$

– гравитационного растекания

$$\frac{dB_{эфф}}{dx} = C_E \cdot \frac{u_*}{U_{эфф}} \cdot \sqrt{Ri}, \quad \text{при } r_y > 0, \qquad (7.9)$$

$$B_{эфф} = 0{,}5 \cdot \sqrt{\pi} \cdot S_y, \quad \text{при } r_y = 0, \qquad (7.10)$$

– вовлечение воздуха в облако или факел через верхнюю границу

$$\frac{dM^{моль}_{эфф}}{dx} = \eta_l \cdot B_{эфф} \cdot U_{вовл} \cdot \rho / V_0, \qquad (7.11)$$

– поперечного рассеяния

$$\frac{dS_y}{dx} = \frac{4 \cdot c_3^2}{S_y \cdot c_4 \cdot 10^{-4}} \cdot \left(S^{-1} - S^{-2}\right), \quad \text{при } r_y > 0, \qquad (7.12)$$

$$S_y = \sqrt{2} \cdot \sigma_y (x + x_v), \quad \text{при } r_y = 0, \qquad (7.13)$$

где E – масса поступившего в атмосферу ЗВ, кг, для мгновенного источника или скорость (мощность), кг/с, поступления ЗВ в атмосферу для источника конечного времени действия;

$$C_E = \begin{cases} 1.15 & \text{при } \dfrac{U_{вовл}}{U_{эфф}} \cdot \dfrac{H_{эфф}}{d \ln B_{эфф}/dt} \le 1 \\ \dfrac{\sqrt{Ri} \cdot \sqrt{1 + 0{,}8 \cdot Ri_*}}{15 \cdot \kappa} & \text{при } \dfrac{U_{вовл}}{U_{эфф}} \cdot \dfrac{H_{эфф}}{d \ln B_{эфф}/dt} > 1, \\ 0 & \text{при } Ri_* < 0 \text{ и } r_y > 0, \end{cases} \qquad (7.14)$$

$$Ri = \frac{g \cdot H_{эфф}}{u_*^2} \cdot \delta, \qquad (7.15)$$

$M^{моль}_{эфф}$ - эффективная молярная масса облака, кмоль, или эффективный молярный расход «тяжелого» газа в факеле через сечение x=const, кмоль/с, определяемые как

$$M^{моль}_{эфф} = M_{эфф} / m_{эфф}; \qquad (7.16)$$

$U_{вовл}$ – скорость вовлечения в облако или факел окружающего воздуха через верхнюю поверхность, определяемая как

$$U_{возд} = \frac{к \cdot u.}{\tilde{\Phi}(Ri.)}; \qquad (7.17)$$

V_0=22,4 м^3/кмоль – молярный объем идеального газа при 0°С и 100 кПа;

c_3, c_4 – параметры σ_y – кривой Бригса (6.40);

$$S = 1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{c_3}{c_4 \cdot 10^{-4} \cdot B_{эфф}} \right)^2}; \qquad (7.18)$$

x_v – сдвиг по оси x, отсчитываемый от положения x_t, при котором r_y становится равным нулю, по формуле

$$S_y(x_t) = \sqrt{2} \cdot \sigma_y^2(x_t + x_v), \qquad \text{при } r_y(x_t) = 0; \qquad (7.19)$$

$$Ri_* = Ri \cdot \eta_2; \qquad (7.20)$$

$m_{эфф}$ – эффективный молекулярный вес «тяжелого» газа в облаке или факеле, кг/кмоль;

$$\tilde{\Phi}(Ri.) = \begin{cases} (1 + 0{,}8 \cdot Ri.)^{0.5}/(1+b) & - \text{при } Ri. \geq 0 \\ (1 - 0{,}6 \cdot Ri.)^{-0.5}/(1+b) & - \text{при } Ri. < 0; \end{cases} \qquad (7.21)$$

$$\eta_2 = \begin{cases} \rho_{эфф}/\rho & - \text{для ЗВ, имеющего плотность больше плотности воздуха} \\ T_{эфф}/T & - \text{для переохлажденного ЗВ.} \end{cases}$$

Для дифференциальных уравнений (7.9), (7.11) и (7.12) используются следующие начальные значения:

$B_{эфф}(0)=r_y(0)$;

$$M_{эфф}^{моль}(0) = \eta_1 \cdot B_{эфф}(0) \cdot H_{эфф}(0) \cdot U_{эфф}(0) \cdot \rho_{эфф}(0)/m_{эфф}(0); \qquad (7.22)$$

$S_y(0)=0$,

где E, $r_y(0)$, $H_{эфф}(0)$, $\rho_{эфф}(0)$ – входные величины, определяемые по сценарию аварии моделью источника.

7.4.5 Термодинамические соотношения для «тяжелого» газа по [28] имеют вид:

– эффективная температура, К

$$T_{эфф} = \frac{E \cdot c_{v_{ЗВ}} \cdot T_s + (M_{эфф} - E) \cdot c_v \cdot T}{E \cdot c_{v_{ЗВ}} + (M_{эфф} - E) \cdot c_v}; \qquad (7.23)$$

– эффективный молекулярный вес, кг/кмоль

$$m_{эфф} = \frac{M_{эфф} \cdot m_{ЗВ} \cdot m}{E \cdot m + (M_{эфф} - E) \cdot m_{ЗВ}}; \qquad (7.24)$$

– эффективная плотность, кг/м^3

$$\rho_{эфф} = \frac{P_0 \cdot m_{эфф}}{T_{эфф} \cdot Ri_*}; \qquad (7.25)$$

где $c_{v_{ЗВ}}$, c_v – теплоемкость опасного ЗВ и воздуха при постоянном объеме, соответственно, кДж/(кг·град), их значения представлены в таблице 7.1.

7.4.6 Последовательность расчетов в модели «тяжелых» газов следующая:

а) по значениям входных параметров, характеризующих источник поступления ЗВ в атмосферу в месте аварии (E, $r_y(0)=B_{эфф}(0)$, $H_{эфф}(0)$, $S_y(0)$, T_s), и метеопараметров, измеренных на ближайшей метеостанции ($U_ф$, T, N_o, $N_н$ и наличие или отсутствие тумана), рассчитываются характеристики приземного слоя атмосферы и начальные значения эффективных параметров облака или факела:

1) категория устойчивости атмосферы p_T по алгоритму, представленному в Г.2.2 (приложение Г);

2) показатель $b(p_T,z_0)$ в степенном профиле скорости ветра по алгоритму Г.3.4.2 (приложение Г);

3) динамическая скорость u_* по алгоритму Г.3.2.2 (приложение Г);

4) вертикальный коэффициент дисперсии $S_z(0)$ по формуле (7.4);

5) эффективная скорость $U_{эфф}(0)$ по формуле (7.5);

6) эффективная плотность $\rho_{эфф}(0)$:

$$\rho_{эфф}(0) = \begin{cases} \rho_H, & \text{при } E \geq E_{max} \\ \dfrac{E}{\eta_1 \cdot B_{эфф}(0) \cdot U_{эфф}(0) \cdot H_{эфф}(0)}, & \text{при } E < E_{max} \end{cases}, \qquad (7.26)$$

где ρ_H - плотность насыщенных паров ЗВ, кг/м^3, равная

$$\rho_H = \frac{P_H \cdot m_{ЗВ}}{T_s \cdot R_*}, \qquad (7.27)$$

E_{max} – максимально возможное значение E равное

$$E_{max}=\eta_1 \cdot B_{эфф} \cdot H_{эфф} \cdot U_{эфф} \cdot \rho_H, \qquad (7.28)$$

P_H – давление насыщенных паров ЗВ, н/м^2, определяемое по формуле Антуана

$$P_H = 10^{2,125+A-\frac{B}{T-C}}, \qquad (7.29)$$

A, B, C – коэффициенты уравнения Антуана, задаваемые для ЗВ согласно таблиц 7.1 и 7.2;

7) *эффективное значение $B_{эфф}(0)$ при $E > E_{max}$ корректируется для учета процесса задымления*

$$B_{эфф}(0) = \frac{B_{эфф}(0)}{\eta_1 \cdot H_{эфф}(0) \cdot U_{эфф}(0) \cdot \rho_H}; \qquad (7.30)$$

8) эффективный молекулярный вес $m_{эфф}(0)$ по формуле (7.23);

9) эффективная молярная масса облака «тяжелого» газа или эффективный молярный расход «тяжелого» газа через сечение факела плоскостью x=const по соотношению

$$M_{эфф}^{моль}(0) = M_{эфф}/m_{эфф}(0). \qquad (7.31)$$

Значения основных параметров, характеризующих свойства опасных веществ, способных привести к образованию «тяжелых» газов и отравляющих боевых веществ, список которых определен Федеральными законами [30,31], даны в таблицах 7.1 и 7.2.

Таблица 7.1 – Свойства опасных веществ согласно РД-03-26-2007, [32]

Вещество	Код	Химическая формула	Молекулярный вес, кг/кмоль	Температура кипения, °С	Коэффициенты уравнения Антуана			C_V зв, кДж/(кг·°С)	Величина ПДК, мг/м³	Токсодоза	
					A	B	C			Пороговая PCt_{50}, г·мин/м³	Смертельная LCt_{50}, г·мин/м³
Акрилонитрил	2001	C_3H_3N	53,0	77,0	6,95161	1270,16	39,4454	1,04	0,030	-*	-
Акролеин	1301	C_3H_4O	56,0	53,0	6,88719	1123,64	45,2740	0,95	0,030	0,200	-
Аммиак	0303	NH_3	17,0	-33,4	7,46032	828,972	52,9425	1,57	0,200	15,0	150,0
Бензол	0602	C_6H_6	78,0	80,0	6,06452	773,989	108,934	0,89	0,300	60,00	250,0
Бутадиен	0503	C_4H_6	54,0	-4,5	6,46847	877,241	48,5420	1,25	3,000	-	-
Бутан	0402	C_4H_{10}	58,0	-0,5	6,78788	931,112	34,4873	1,45	200,0	-	-
Винилхлорид (хлорэтилен)	0827	C_2H_3Cl	62,5	-13,0	7,09303	946,474	34,1228	0,71	0,010	-	-
Водород бромистый	0313	HBr	80,9	-67,8	6,78874	668,070	35,9515	0,25	1,000	2,40	24,0
Водород фтористый	0342	HF	20,4	19,4	7,19626	1239,60	6,30387	1,09	0,020	4,0	40,0
Водород хлористый	0316	HCl	36,5	-85,1	6,41176	520,484	41,1835	0,57	0,200	2,00	20,0
Водород цианистый	0317	HC	27,0	25,6	8,64706	1494,42	29,5364	1,02	0,010	0,20	6,00
Диметиламин	1819	C_2H_7N	45,0	7,0	7,19101	1028,40	42,4476	1,32	0,005	1,00	-
Метан	0410	CH_4	16,0	-162,0	7,62162	524,862	-1,60486	1,25	50,00	-	-
Метанол	1052	CH_3OH	32,0	64,0	7,79167	1471,13	40,3516	1,05	1,000	-	-
Пентан	0405	C_5H_{12}	72,0	36,0	6,81818	1051,24	42,3782	1,48	100,0	-	-
Пропан	1401	C_3H_8	44,0	-42,0	6,80000	804,576	25,9400	1,42	0,350	-	-
Пропилен (пропен)	0521	C_3H_6	42,0	-48,0	6,83202	788,998	25,7747	1,29	3,000	-	-
Сероводород	0333	H_2S	34,1	-60,4	7,37314	845,820	24,1436	0,80	0,008	1,00	15,00
Сероуглерод	0334	CS_2	76,1	46,2	7,54286	1436,14	8,96283	0,54	0,030	30,00	500,0
Углерода оксид	0337	CO	28,0	-191,6	8,08696	401,184	1,55129	0,81	5,000	10,00	37,50
Формальдегид	1325	CH_2O	30,0	-19,3	7,60792	1137,64	12,9968	1,02	0,035	0,60	6,00
Фосген	0347	CCl_2O	98,9	8,2	6,67327	843,478	46,3709	0,52	0,003	0,55	3,20
Хлор	0349	Cl_2	70,9	-34,1	4,42963	249,149	98,9141	0,37	0,100	0,60	6,00
Хлорциан	0362	CClN	61,5	12,6	9,63334	1404,54	-1,24339	0,56	0,003	0,75	11,00
Этилен	0526	C_2H_4	28,0	-104,0	6,79365	594,337	17,3759	1,00	3,000	-	-
Этилена оксид	1611	C_2H_4O	44,0	10,7	7,00000	1008,00	39,46	1,32	0,300	2,20	25,00

* Отсутствие данных.

Примечание – 2 c_v =0,72 кДж/(кг·°С).

Таблица 7.2 – Свойства боевых отравляющих веществ согласно [33]

Вещество	Международный код вещества	Молекулярный вес, кг/кмоль	Температура кипения, °С	Коэффициенты уравнения Антуана			ПДК		Токсодоза	
				A	B	C	Вид	Величина, мг/м³	Пороговая PCt_{50}, г·мин/м³	Смертельная LCt_{50}, г·мин/м³
Зарин	GB	140,10	151	9,8990	2850,9	-0,12098	ОБУВ	$2 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-2}$
Зоман	CD	182,18	190	9,8374	3058,3	-2,03475	ОБУВ	$1 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-2}$
Иприт	HD	159,68	217	10,61	3467,6	-1,58188	ОБУВ	$2 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	1,5
Люизит	L	207,32	190	8,5544	2683,3	16,7962	ОБУВ	$4 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	1,5
НПГ	VX	267,37	298	11,69	4427,0	-91,1369	ОБУВ	$5 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Примечание – $\rho = 1,29$ кг/м³ – плотность воздуха.										

б) по вычисленным начальным значениям эффективных параметров облака или факела решаются уравнения (7.8)-(7.13). Дифференциальные уравнения решаются на конечно-разностной сетке с шагом Δx ($\Delta t=\Delta x/U_\Phi$). Значения правых частей уравнений берутся с предыдущего шага.

По полученным эффективным параметрам облака или факела по формулам (7.3) - (7.6), (7.8) вычисляются основные параметры q_A, S_y, r_y, S_z.

Концентрация «тяжелого» газа рассчитывается либо по формуле (7.1), либо по формуле (7.2).

Расчет ведется до тех пор пока не станут равными нулю r_y ($r_y=0$) и δ (с точностью ε, т.е. $\delta-\varepsilon<0$). Это означает, что ЗВ в облаке или факеле «тяжелого» газа разбавлено до состояния нейтральной плавучести. В этом случае расчет концентрации по формулам (7.1) и (7.2) при $\beta_z=2$ переходит в расчет по Гауссовой модели для рассеяния ЗВ.

8 Определение вероятности превышения концентрацией порогового уровня

При переносе ЗВ в реальных атмосферных условиях отмечается наличие флуктуаций его концентрации относительно средних значений (так называемое меандрирование центра тяжести облака или оси факела ЗВ). Источником флуктуаций концентрации могут служить флуктуации скорости ветра. Для оценки распределения ЗВ в атмосфере, кроме средней за 10 мин. концентрации ЗВ q(x,y,z,t) (определенной, например, по алгоритмам раздела 5 или 6) может быть вычислена вероятность превышения концентрацией в данной точке пространства в заданный момент времени некоторого заданного порогового уровня концентрации q^*. Эта вероятность $P(C>q^*)$ определяется по формуле, представленной в [34]

$$P(C>q^*)=\frac{1}{2}\left[\Phi\left(\beta_0\left(\frac{q^*}{q}+1\right)\right)-\Phi\left(\beta_0\left(\frac{q^*}{q}-1\right)\right)\right], \qquad (8.1)$$

где C – возможное значение концентрации ЗВ в точке (x,y,z,t);

q^* - заданный пороговый уровень ЗВ, вероятность превышения которого определяется;

q - средняя концентрация ЗВ в точке (x,y,z,t), определенная по алгоритмам разделов 5 или 6;

$$\beta_0 = \frac{c_1}{\sqrt{2} \cdot I_q^{1+c_2}}; \qquad (8.2)$$

I_q – интенсивность флуктуаций концентрации ЗВ за счет флуктуаций скорости ветра на интервале времени [t, t+600];

$$c_1 = \exp\left\{\left(\ln\frac{2\sqrt{2}}{\pi}\right)\cdot\frac{2}{\pi}\operatorname{arctg}\left(a_1 \cdot I_q^2\right) - \frac{a_2 \cdot I_q^2}{1 + a_1^2 \cdot I_q^4}\right\}; \qquad (8.3)$$

$$c_2 = \frac{2}{\pi}\operatorname{arctg}\left(b_1 \cdot I_q^{b_2}\right);$$

a_i, b_i приведены в таблице 8.1.

Таблица 8.1 - Значения констант для расчета β_0 по формуле (8.2) и $f(\sigma_U,\sigma_\varphi)$ по формуле (8.5)

i	Значения констант				
	a_i	b_i	α_i	δ_i	γ_i
1	$5{,}2777102 \cdot 10^{-1}$	$4{,}5503975 \cdot 10^{-1}$	36,909738	16,703827	7,0177161
2	$3{,}1568905 \cdot 10^{-1}$	1,7213212	3,602973	2,7503226	2,9648854

В предположении, что флуктуации модуля и направления скорости ветра на интервале времени [t,t+600] имеют нормальное распределение с нулевым средним и дисперсией σ_U^2 и σ_y^2, соответственно, значение I_q приближенно определяется формулой

$$I_q^2 = f^2\left(\sigma_u,\sigma_\varphi\right)\left\{\frac{1+a}{\sqrt{1+2a}}\exp\left(\frac{a\left[\left(x - x_C(t+\Delta t)\right)\cos\vartheta(t) + \left(y - y_C(t+\Delta t)\right)\sin\vartheta(t) - \frac{\sigma_\varphi^2}{2}r\right]^2}{(1+a)\cdot(1+2a)\cdot\sigma_y^2(t+\Delta t)}\right) - 1\right\}, \qquad (8.4)$$

где $a = \left(1 - \sigma_\varphi^2\right)\cdot\left(\frac{\sigma_u \cdot \Delta\tau}{\sigma_y(t+\Delta\tau)}\right)^2$;

$$r^2 = \left(x_c(t+\Delta t) - x_c(t)\right)^2 + \left(y_c(t+\Delta\tau) - y_c(t)\right)^2;$$

$$\sin\vartheta(t)=\frac{y_c(t+\Delta\tau)-y_c(t)}{r};$$

$$\cos\vartheta(t)=\frac{x_c(t+\Delta\tau)-x_c(t)}{r};$$

$\sigma_\varphi^2=\left(\frac{\sigma_v}{U}\right)^2$ - дисперсия направления ветра;

$$f(\sigma_u,\sigma_\varphi)=e^{\alpha_0\cdot\sigma_\varphi^2+\delta_0\cdot\sigma_\varphi+\gamma_0}; \qquad (8.5)$$

$$\alpha_0=-3{,}1+e^{-\alpha_1\cdot\sigma_u^2+\alpha_2};$$

$$\delta_0=3{,}2+e^{-\delta_1\cdot\sigma_u^2+\delta_2};$$

$$\gamma_0=-0{,}01\cdot\left(6{,}9+e^{-\gamma_1\cdot\sigma_u^2+\gamma_2}\right).$$

Значения констант α_i, δ_i, γ_i приведены в таблице 8.1.

При наличии в момент времени t в расчетной области n облаков ЗВ вероятность P(x,y,z,t) превышения суммарной концентрацией в точке (x,y,z,t) от всех облаков заданного порогового уровня q^* определяется формулой

$$P(x,y,z,t)=1-\prod_{i=1}^{n}\left(1-P_i(x,y,z,t)\right), \qquad (8.6)$$

где $P_i(x,y,z,t)$ – вероятность превышения концентрацией ЗВ заданного порогового уровня q^* в точке (x,y,z,t) для i-го облака, определяемая по (8.1).

Приложение А

(обязательное)

Расчетные формулы для мезомасштабной модели

А.1 Вспомогательные функции

Для удобства вычисления $q_2(z,t)$, $M_{0z}(t;t_k)$ и $M_{1z}(t;t_k)$ введены следующие вспомогательные функции:

$$\Phi(x)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\cdot\int_0^x e^{-\tau^2}d\tau$$ - интеграл вероятности,

$$\overline{w}=\frac{1}{t-t_k}\cdot\sum_{j=0}^{J(t;t_k)-1}\Delta\tau_j\cdot w\left(\rho_{x_c}(t_j;t_k),t_j\right),\qquad \text{при}\quad t_j=t_k+\sum_{i=0}^{j}\Delta\tau_i\quad\text{и}\quad\sum_{j=0}^{J(t;t_k)-1}\Delta\tau_j=t-t_k,$$

$$c_1=\frac{V_d-\overline{w}}{\beta},\quad c_2=\frac{V_d+\beta-\overline{w}}{\beta},\quad c_3=\frac{V_d-\beta-\overline{w}}{\beta},$$

$$\beta=\max\{0,V_d-V_R\},$$

$$a_1=\frac{(V_R-\overline{w})\cdot(t-t_k)}{\sqrt{2}\cdot\sigma_z},\quad a_2=\frac{(2\beta+V_R-\overline{w})\cdot(t-t_k)}{\sqrt{2}\cdot\sigma_z},$$

$$b_1=\frac{2\cdot(V_R-\overline{w})\cdot(t-t_k)\cdot h}{\sigma_z^2},\quad b_2=\frac{2\cdot(V_R-\overline{w})\cdot(t-t_k)\cdot\tilde{H}}{\sigma_z^2},$$

$\tilde{H}$ - вычисляется по формуле (5.11),

$$A_z(Z)=\frac{Z}{2\sigma_z},$$

$$P_n(Z)=\frac{2}{n-1}[P_{n-2}(Z)-Z\cdot P_{n-1}(Z)],\quad n=2,3,.....,$$

где $P_0(Z)\equiv P_0=\frac{1}{\sqrt{\pi}}$,

$$P_1(Z)=\exp(Z^2)\cdot(1-\Phi(Z)).$$

$$R_0(\zeta,z)=P_0\cdot\left[1+e^{-4\cdot A_z(\zeta)A_z(z)}\right],$$

$$R_1(\zeta,z)=2\cdot c_1\cdot[a_1\cdot P_1(A_z(\zeta+z)+a_1)-a_2\cdot P_1(A_z(\zeta+z)+a_2)],$$

$$R_2(\zeta,z)=4\cdot c_1\cdot\left[(c_1+c_2\cdot c_3)\cdot a_1\cdot P_1(A_z(\zeta+z)+a_1)+a_2\cdot(c_1-c_2\cdot c_3)\cdot P_1(A_z(\zeta+z)+a_2)-\right.$$
$$\left.-a_1^2\cdot c_1P_2(A_z(\zeta+z)+a_1)-a_2^2\cdot c_1\cdot P_2(A_z(\zeta+z)+a_2)\right],$$

$$R_3(\zeta,z)=-2\cdot\left[(a_1+a_2)\cdot P_1(A_z(\zeta+z)+a_1)-a_1\cdot(3a_2-a_1)\cdot P_2(A_z(\zeta+z)+a_1)+\right.$$
$$\left.+2a_1^2\cdot(a_2-a_1)\cdot P_3(A_z(\zeta+z)+a_1)\right],$$

$$R_4(\zeta,z)=-4\cdot\left[(a_2+a_1)\cdot P_1(A_z(\zeta+z))-a_1\cdot(7a_2-a_1)\cdot P_2(A_z(\zeta+z))+2a_1^2(9a_2-5a_1)\times\right.$$
$$\left.\times P_3(A_z(\zeta+z))-4a_1^3(5a_2-4a_1)\cdot P_4(A_z(\zeta+z))+8a_1^4\cdot(a_2-a_1)\cdot P_5(A_z(\zeta+z))\right].$$

А.2 Рабочие формулы для расчета концентрации ЗВ в атмосфере для точечного источника

А.2.1 Для вычисления $q_2(z,t;t_k)$ по формуле (5.9) используется ряд выражений для функций W_{2j} при j=1,...,5. Для всех W_{2j} ниже представлены не только их выражения в общем случае, но и для частных случаев содержащих устранимые особенности при малых ($\beta \le 0{,}001$ м/с) и больших ($\beta > 3$ м/с) значениях β.

А.2.2 Функция W_{21} имеет следующий вид:

а) при $\beta \le 3$ м/с

$$W_{21}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{1}{\sqrt{2}\cdot\sigma_z}e^{-(A_z(\zeta-z)-a_1)^2}\cdot\left(R_0(\zeta,z)-e^{-4\cdot A_z(\zeta)A_z(z)}\cdot 2a_2P_1(A_z(\zeta+z)+a_2)\right); \qquad (А.1)$$

б) при $\beta > 3$ м/с

$$W_{21}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{1}{\sqrt{2}\cdot\sigma_z}e^{-(A_z(\zeta-z)-a_1)^2}\cdot\left(P_0+e^{-4\cdot A_z(\zeta)A_z(z)}\cdot\left(2\cdot\frac{A_z(\zeta+z)}{a_2-a_1}-1\right)\cdot P_0\right). \qquad (А.2)$$

А.2.3 Функция W_{22} имеет вид

а) при $0{,}001$ м/с $\le \beta \le 3$ м/с

$$W_{22}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{1}{\sqrt{2}\cdot\sigma_z}e^{-(A_z(\zeta-z)-a_1)^2-b_2+b_1}\cdot\left\{R_0(\zeta,z)-2a_1\cdot P_1(A_z(\zeta-z)+a_1)+e^{-4\cdot A_z(\zeta)A_z(z)}\cdot R_1(\zeta,z)\right\}; \qquad (А.3)$$

б) при $\beta < 0{,}001$ м/с

$$W_{22}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{1}{\sqrt{2}\cdot\sigma_z}e^{-(A_z(\zeta-z)-a_1)^2-b_2+b_1}\cdot\left\{R_0(\zeta,z)-2a_1\cdot P_1(A_z(\zeta-z)+a_1)+e^{-4\cdot A_z(\zeta)A_z(z)}\cdot R_3(\zeta,z)\right\}; \qquad (А.4)$$

в) при $\beta > 3$ м/с

$$W_{22}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{1}{\sqrt{2}\cdot\sigma_z}e^{-(A_z(\zeta-z)-a_1)^2-b_2+b_1}\left\{P_0-2a_1\cdot P_1(A_z(\zeta-z)+a_1)+\right.$$
$$\left.+e^{-4\cdot A_z(\zeta)A_z(z)}\cdot\left[\left(2\frac{A_z(\zeta+z)}{a_2-a_1}-c_1-c_3\right)\cdot P_0+2a_1\cdot c_1\cdot P_1(A_z(\zeta+z)+a_1)\right]\right\}. \qquad (А.5)$$

А.2.4 Функция W_{23} имеет следующий вид:

а) при 0,001 м/с ≤ β ≤ 3 м/с

$$W_{23}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{1}{\sqrt{2}\cdot\sigma_z}e^{-(A_z(\zeta-z)-a_1)^2-b_2}\left\{R_0(\zeta,z)+R_1(\zeta,-z)+2\cdot e^{-4\cdot A_z(\zeta)A_z(z)}\times\right.$$
$$\left.\times\left[(c_3^2-2)\cdot a_2\cdot P_1(A_z(\zeta+z)+a_2)-a_1\cdot c_1^2\cdot P_1(A_z(\zeta+z)+a_1)+c_1\cdot a_1^2\cdot P_2(A_z(\zeta+z)+a_2)\right]\right\}; \quad (A.6)$$

б) при β < 0,001 м/с

$$W_{23}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{1}{\sqrt{2}\cdot\sigma_z}e^{-(A_z(\zeta-z)-a_1)^2-b_2}\left\{R_0(\zeta)+R_3(\zeta,-z)-2\cdot e^{-4\cdot A_z(\zeta)A_z(z)}\times\right.$$
$$\times\left[(2a_2+a_1)\cdot P_1(A_z(\zeta+z))-2a_1(5a_2-2a_1)\cdot P_2(A_z(\zeta+z))+\right.;$$
$$\left.\left.+4a_1^2(4a_2-3a_1)\cdot P_3(A_z(\zeta+z))+8a_1^3(a_2-a_1)\cdot P_4(A_z(\zeta+z))\right]\right\} \quad (A.7)$$

в) при β > 3 м/с

$$W_{23}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{1}{\sqrt{2}\cdot\sigma_z}e^{-(A_z(\zeta-z)-a_1)^2-b_2}\left\{\left(2\frac{A_z(\zeta-z)}{a_2-a_1}-c_1-c_3\right)\cdot P_0+2a_1\cdot c_1\cdot P_1(A_z(\zeta-z)+a_1)+\right.$$
$$\left.+e^{-4\cdot A_z(\zeta)A_z(z)}\cdot\left[\left(-4\frac{A_z(\zeta+z)}{a_2-a_1}+c_1+3c_3\right)\cdot P_0-2a_1\cdot(c_1+c_3)\cdot P_1(A_z(\zeta+z)+a_1)\right]\right\}. \quad (A.8)$$

А.2.5 Функции W_{24} имеет следующий вид:

а) при 0,001 м/с ≤ β ≤ 3 м/с

$$W_{24}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{1}{\sqrt{2}\cdot\sigma_z}e^{-(A_z(\zeta-z)-a_1)^2-2b_2+b_1}\cdot\left\{R_0(\zeta)-2\cdot\left[a_1\cdot(2-c_3^2)\cdot P_1(A_z(\zeta-z)+a_1)+\right.\right.$$
$$\left.\left.+a_2\cdot c_1^2\cdot P_1(A_z(\zeta-z)+a_2)+2a_1^2\cdot c_1\cdot P_2(A_z(\zeta-z)+a_1)\right]-e^{-4\cdot A_z(\zeta)A_z(z)}\cdot R_2(\zeta,z)\right\}; \quad (A.8)$$

б) при β < 0,001 м/с

$$W_{24}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{1}{\sqrt{2}\cdot\sigma_z}e^{-(A_z(\zeta-z)-a_1)^2-2b_2+b_1}\left\{R_0(\zeta)-2\cdot\left[(a_1+2\cdot a_2)\cdot P_1(A_z(\zeta-z)+a_1)-\right.\right.$$
$$-a_1\cdot(5a_2+a_1)\cdot P_2(A_z(\zeta-z)+a_1)+4\cdot a_1^2\cdot(2a_2-a_1)\cdot P_3(A_z(\zeta-z)+a_1)-$$
$$\left.\left.-4\cdot a_1^3\cdot(a_2-a_1)\cdot P_4(A_z(\zeta-z)+a_1)\right]+e^{-4\cdot A_z(\zeta)A_z(z)}\cdot R_4(A_z(\zeta,z))\right\}; \quad (A.9)$$

в) при β > 3 м/с

$$W_{24}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{1}{\sqrt{2}\cdot\sigma_z}e^{-(A_z(\zeta-z)-a_1)^2-2b_2+b_1}\left\{\left(2\frac{A_z(\zeta-z)}{a_2-a_1}-c_1-3c_3\right)\cdot P_0+\right.$$
$$+4a_1\cdot(c_1+c_3)\cdot P_1(A_z(\zeta-z)+a_1)-4a_1^2\cdot c_1\cdot P_2(A_z(\zeta-z)+a_1)-e^{-4\cdot A_z(\zeta)A_z(z)}\times \quad (A.10)$$
$$\left.\times\left[\left(4\frac{A_z(\zeta+z)}{a_2-a_1}-c_1-7c_3\right)\cdot P_0+4a_1\cdot(c_1+3c_3)\cdot P_1(A_z(\zeta+z)+a_1)-4a_1^2\cdot(c_1+c_3)\cdot P_2(A_z(\zeta+z)+a_1)\right]\right\};$$

А.2.6 Функции W_{25} имеет следующий вид:

а) при 0,001 м/с ≤ β ≤ 3 м/с

$$W_{25}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{1}{\sqrt{2}\cdot\sigma_z}e^{-(A_z(\zeta-z)-a_1)^2-2b_2}\cdot\left\{R_0(\zeta,z)-R_2(\zeta,-z)+2\cdot e^{-4\cdot A_z(\zeta)A_z(z)}\times\right.$$
$$\times\left[c_1^2\cdot a_1\cdot(2c_1+3c_2\cdot c_3)\cdot P_1(A_z(\zeta+z)+a_1)-\right. \quad (A.11)$$
$$-a_2\cdot\left(3-2c_3^2+c_1^2\cdot c_3\cdot(2c_1+c_3)\right)\cdot P_1(A_z(\zeta+z)+a_2)-2a_1^2\cdot c_1^3\cdot P_2(A_z(\zeta+z)+a_1)+$$
$$\left.\left.+2a_2^2\cdot c_1(3c_1-2c_2\cdot c_3)\cdot P_2(A_z(\zeta+z)+a_2)-4a_2^3\cdot c_1^2\cdot P_3(A_z(\zeta+z)+a_2)\right]\right\};$$

б) при $\beta < 0{,}001$ м/с

$$W_{25}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{1}{\sqrt{2}\cdot\sigma_z}e^{-(A_z(\zeta-z)-a_1)^2-2b_2}\left\{R_0(\zeta,z)+R_4(\zeta,-z)-2\cdot e^{-4\cdot A_z(\zeta)A_z(z)}\times\right.$$
$$\times\left[\left(3\cdot a_2+2\cdot a_1\right)\cdot P_1(A_z(\zeta+z)+a_1)-2\cdot a_1\cdot(27\cdot a_2-17\cdot a_1)\cdot P_2(A_z(\zeta+z)+a_1)+\right. \quad (A.12)$$
$$+8\cdot a_1^2\cdot\left((12\cdot a_2-7\cdot a_1)\cdot P_3(A_z(\zeta+z)+a_1)-a_1\cdot(21\cdot a_2-16\cdot a_1)\cdot P_4(A_z(\zeta+z)+a_1)-\right.$$
$$\left.\left.\left.-12\cdot a_1^2\cdot(19\cdot a_2-18\cdot a_1)\cdot P_5(A_z(\zeta+z)+a_1)+46\cdot a_1^3(a_2-a_1)\cdot P_6(A_z(\zeta+z)+a_1)\right)\right]\right\};$$

в) при $\beta > 3$ м/с

$$W_{25}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{1}{\sqrt{2}\cdot\sigma_z}e^{-(A_z(\zeta-z)-a_1)^2-2b_2}\left\{\left(-4\frac{A_z(\zeta-z)}{a_2-a_1}+c_1+7c_3\right)\cdot P_0-\right.$$
$$-4a_1\cdot(c_1+3c_3)\cdot P_1(A_z(\zeta-z)+a_1)+4a_1^2\cdot(c_1+c_3)\cdot P_2(A_z(\zeta-z)+a_1)+$$
$$+e^{-4\cdot A_z(\zeta)A_z(z)}\cdot\left[\left(6\frac{A_z(\zeta+z)}{a_2-a_1}-c_1-11\cdot c_3\right)\cdot P_0+\right. \quad (A.13)$$
$$\left.\left.+4a_1\cdot(c_1+5c_3)\cdot P_1(A_z(\zeta+z)+a_1)-4a_1^2\cdot(c_1+2c_3)\cdot P_2(A_z(\zeta+z)+a_1)\right]\right\}.$$

Используемые здесь для удобства записи вспомогательные функции a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, c_3, A_z, P_n и b_n ($n=1,2,3.....$) приведены в А.1 (приложение А).

А.3 Рабочие формулы для расчета вертикальной составляющей траектории центра тяжести облака

А.3.1 Для расчета по формуле (5.17) функции $M_{0z}(t;t_k)$, являющейся нулевым моментом функции $q_2(z,t)$, используются выражения для функций W_{0j} при $j=1,...,5$. Для всех W_{0j} ниже представлены не только их выражения в общем случае, но и для частных случаев, содержащих особенности при малых ($\beta \le 0{,}001$ м/с) и больших ($\beta > 3$ м/с) значениях β и малых значениях $|V_R - \bar{w}| < 0{,}01$ м/с.

А.3.1.1 Функция W_{01} имеет следующий вид:

а) при $0{,}001 \text{ м/с} \le \beta \le 3$ м/с

$$W_{01}(\zeta,\beta,V_R)=1-\frac{1}{2}e^{-(A_z(\zeta)-a_1)^2}\cdot\left[c_1\cdot P_1(A_z(\zeta)+a_1)-c_2\cdot P_1(A_z(\zeta)+a_2)+P_1(A_z(\zeta)-a_1)\right]; \quad (A.14)$$

б) при β < 0,001 м/с

$$W_{01}(\zeta,\beta,V_R)=1+\frac{1}{2}e^{-(A_z(\zeta)-a_1)^2}\cdot[P_1(A_z(\zeta)+a_1)-P_1(A_z(\zeta)-a_1)-2a_2\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)+ \\ +2a_1\cdot(a_2-a_1)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)]; \quad (A.15)$$

в) при β > 3 м/с

$$W_{01}(\zeta,\beta,V_R)=1+\frac{1}{2}e^{-(A_z(\zeta)-a_1)^2}\cdot\left[\frac{2}{a_2-a_1}\cdot P_0-c_1\cdot P_1(A_z(\zeta)+a_1)-P_1(A_z(\zeta)-a_1)\right]. \quad (A.16)$$

А.3.1.2 Функция W_{02} имеет следующий вид:

а) при 0,001 м/с ≤ β ≤ 3 м/с

$$W_{02}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{c_1}{2}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_2}\cdot[2a_1\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)-c_2\cdot P_1(A_z(\zeta)+a_1)+c_2\cdot P_1(A_z(\zeta)+a_2)]; \quad (A.17)$$

б) при β < 0,001 м/с

$$W_{02}(\zeta,\beta,V_R)=-e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_2}\cdot[(a_2+a_1)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)-a_1\cdot(3a_2-a_1)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)+ \\ +2a_1^2\cdot(a_2-a_1)\cdot P_4(A_z(\zeta)+a_1)]; \quad (A.18)$$

в) при β > 3 м/с

$$W_{02}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{1}{2}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_2}\left[\frac{2}{a_2-a_1}\cdot P_0-(c_2+2c_3)\cdot P_1(A_z(\zeta)+a_1)+2a_1\cdot c_1\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)\right]. \quad (A.19)$$

А.3.1.3 Функция W_{03} имеет следующий вид:

а) при 0,001 м/с ≤ β ≤ 3 м/с

$$W_{03}(\zeta,\beta,V_R)=-\frac{c_1}{2}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_1}[2a_1\cdot c_1\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)+2a_2\cdot c_2\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_2)+ \\ +c_2\cdot(c_1+c_3)\cdot(P_1(A_z(\zeta)+a_2)-P_1(A_z(\zeta)+a_1))]; \quad (A.20)$$

б) при β < 0,001 м/с

$$W_{03}(\zeta,\beta,V_R)=-e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_2+b_1}\cdot[(a_2+a_1)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)-3a_1\cdot(3a_2-a_1)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)+ \\ +4a_1^2\cdot(4a_2-3a_1)\cdot P_4(A_z(\zeta)+a_1)-8a_1^3\cdot(a_2-a_1)\cdot P_5(A_z(\zeta)+a_1)]; \quad (A.21)$$

в) при β > 3 м/с

$$W_{03}(\zeta,\beta,V_R)=-\frac{1}{2}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_2+b_1}\left[\frac{6}{a_2-a_1}\cdot P_0-(c_2+6c_3)\cdot P_1(A_z(\zeta)+a_1)+2a_1\cdot(c_1+c_3)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)\right]; \quad (A.22)$$

А.3.1.4 Функция W_{04} имеет следующий вид:

а) при 0,001 м/с ≤ β ≤ 3 м/с

$$W_{04}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{c_1}{2}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+2b_2}\left[4a_1^2\cdot c_1\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)-2a_1\cdot(c_1+c_2\cdot(c_1+c_3))\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)-\right.$$
$$\left.-2a_2\cdot c_1\cdot c_2\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_2)+c_2\cdot\left(c_1^2+c_3\cdot(c_1+c_2)\right)\cdot(P_1(A_z(\zeta)+a_1)-P_1(A_z(\zeta)+a_2))\right]; \quad (A.23)$$

б) при $\beta < 0{,}001$ м/с

$$W_{04}(\zeta,\beta,V_R)=-e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+2b_2}\cdot\left[(a_2+a_1)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)-a_1\cdot(11a_2-a_1)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)+\right.$$
$$+2a_1^2\cdot(17a_2-9a_1)\cdot P_4(A_z(\zeta)+a_1)-8a_1^3\cdot(5a_2-4a_1)\cdot P_5(A_z(\zeta)+a_1)+$$
$$\left.+8a_1^4\cdot(a_2-a_1)\cdot P_6(A_z(\zeta)+a_1)\right]; \quad (A.24)$$

в) при $\beta > 3$ м/с

$$W_{04}(\zeta,\beta,V_R)=-\frac{1}{2}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+2b_2}\left[\frac{6}{a_2-a_1}\cdot P_0-(c_2+12c_3)\cdot P_1(A_z(\zeta)+a_1)+\right.$$
$$\left.+6a_1\cdot(c_1+2c_3)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)-4a_1^2\cdot(c_1+c_3)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)\right]. \quad (A.25)$$

А.3.1.5 Функция W_{05} имеет следующий вид:

а) при $0{,}001 \text{ м/с} \le \beta \le 3$ м/с

$$W_{05}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{c_1}{2}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+2b_2+b_1}\left[4a_2^2\cdot c_1\cdot c_2\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_2)-4a_1^2\cdot c_1^2\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)+\right.$$
$$+2a_2\cdot c_2\cdot c_3\cdot(c_2+2c_1)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_2)+2a_1\cdot c_1\cdot(c_2+c_1+3c_2\cdot c_3)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)-$$
$$\left.-c_2\cdot\left(c_1^3+2c_3\cdot c_1^2+c_2\cdot c_3\cdot(c_2+2c_3)\right)\cdot(P_1(A_z(\zeta)+a_1)-P_1(A_z(\zeta)+a_2))\right]; \quad (A.26)$$

б) при $\beta < 0{,}001$ м/с

$$W_{05}(\zeta,\beta,V_R)=-e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+2b_2+b_1}\left[(a_2+a_1)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)-a_1\cdot(17a_2-3a_1)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)+\right.$$
$$+4a_1^2\cdot(20a_2-11a_1)\cdot P_4(A_z(\zeta)+a_1)-40a_1^3\cdot(4a_2-3a_1)\cdot P_5(A_z(\zeta)+a_1)+$$
$$\left.+16a_1^4\cdot(9a_2-8a_1)\cdot P_6(A_z(\zeta)+a_1)-48a_1^5\cdot(a_2-a_1)\cdot P_7(A_z(\zeta)+a_1)\right]; \quad (A.27)$$

в) при $\beta > 3$ м/с

$$W_{05}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{1}{2}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+2b_2+b_1}\left[\frac{10}{a_2-a_1}\cdot P_0-(c_2+20c_3)\cdot P_1(A_z(\zeta)+a_1)+\right.$$
$$\left.+a_1\cdot(3c_2+25c_3)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)-4a_1^2\cdot(c_1+2c_3)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)\right]. \quad (A.28)$$

А.3.2 Для расчета по формуле (5.18) функции $M_{1z}(t;t_k)$, являющейся первым моментом функции $q_2(z,t)$, используется ряд выражений для функций W_{1j} при $j=1,\ldots,11$. Для всех W_{1j} представлены не только их выражения в общем случае, но и для частных

случаев, содержащих устранимые особенности при малых (β<0,001м/с) и больших (β>3м/с) значениях β и малых значениях $|V_R - \overline{w}| < 0{,}01$ м/с.

А.3.2.1 Функция W_{11} имеет следующий вид:

а) при 0,001 м/с ≤ β ≤ 3 м/с

$$W_{11}(\zeta,\beta,V_R) = h - (V_R - \overline{w})\cdot t + \frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}} e^{-(A_z(\zeta)-a_1)^2}\cdot\left[P_2(A_z(\zeta)-a_1) - c_1\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1) + \right.$$
$$\left. + \frac{c_2}{a_2 - a_1}\cdot(P_1(A_z(\zeta)+a_1) - P_1(A_z(\zeta)+a_2))\right]; \quad (А.29)$$

б) при β < 0,001 м/с

$$W_{11}(\zeta,\beta,V_R) = h - (V_R - \overline{w})\cdot t + \frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}} e^{-(A_z(\zeta)-a_1)^2}[P_2(A_z(\zeta)-a_1) + P_2(A_z(\zeta)+a_1) -$$
$$- 2a_2\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1) + 2a_1\cdot(a_2 - a_1)\cdot P_4(A_z(\zeta)+a_1)]; \quad (А.30)$$

в) при β > 3 м/с

$$W_{11}(\zeta,\beta,V_R) = h - (V_R - \overline{w})\cdot t + \frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}} e^{-(A_z(\zeta)-a_1)^2}\left[\frac{2}{a_2 - a_1} P_1(A_z(\zeta)+a_1) + \right.$$
$$\left. + P_2(A_z(\zeta)-a_1) - c_1\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)\right]; \quad (А.31)$$

А.3.2.2 Функция W_{12} имеет следующий вид:

а) при $|V_R - \overline{w}| \geq 0{,}01$ м/с

$$W_{12}(\zeta,\beta,V_R) = -\frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}} e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2}\cdot\left[P_2(A_z(\zeta)+a_1) + \frac{1}{2a_1}\cdot(P_1(A_z(\zeta)-a_1) - P_1(A_z(\zeta)+a_1))\right]; \quad (А.32)$$

б) при $|V_R - \overline{w}| < 0{,}01$ м/с

$$W_{12}(\zeta,\beta,V_R) = -\frac{\sigma_z}{\sqrt{2}} e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2}\cdot[P_2(A_z(\zeta)+a_1) + a_1\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)]. \quad (А.33)$$

А.3.2.3 Функция W_{13} имеет следующий вид:

а) при 0,001 м/с ≤ β ≤ 3 м/с и $|V_R - \overline{w}| \geq 0{,}01$ м/с

$$W_{13}(\zeta,\beta,V_R) = \frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}} e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_1}\left[c_1\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1) - \frac{1}{2a_1}\cdot(P_1(A_z(\zeta)-a_1) - P_1(A_z(\zeta)+a_1)) + \right.$$
$$\left. + \frac{c_2}{2a_1\cdot c_1}\cdot(P_1(A_z(\zeta)-a_1) - P_1(A_z(\zeta)+a_2)) + \frac{c_1\cdot c_2}{2a_1}\cdot(P_1(A_z(\zeta)+a_2) - P_1(A_z(\zeta)+a_1))\right]; \quad (А.34)$$

б) при 0,001 м/с ≤ β ≤ 3 м/с и $|V_R - \overline{w}| < 0{,}01$ м/с

$$W_{13}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_1}\left[\frac{c_2}{a_2-a_1}\cdot(c_2-2c_3)\cdot(P_1(A_z(\zeta)+a_2)-P_1(A_z(\zeta)+a_1))-\right.$$
$$\left.-(c_2\cdot c_3-2c_1)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)+2a_1\cdot c_1\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)\right]; \quad (A.35)$$

в) при $\beta < 0{,}001$ м/с и $|V_R-\overline{w}| \geq 0{,}01$ м/с

$$W_{13}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_1}\left[\frac{a_2-a_1}{4a_1^2}\cdot(P_1(A_z(\zeta)-a_1)-P_1(A_z(\zeta)+a_1))-\right.$$
$$\left.-\frac{a_2+3a_1}{2a_1}\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)+(3a_2-a_1)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)-2\cdot a_1\cdot(a_2-a_1)\cdot P_4(A_z(\zeta)+a_1)\right]; \quad (A.36)$$

г) при $\beta < 0{,}001$ м/с и $|V_R-\overline{w}| < 0{,}01$ м/с

$$W_{13}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{\sigma_z}{\sqrt{2}}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_1}\cdot[-P_2(A_z(\zeta)+a_1)+(2a_2-a_1)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)]; \quad (A.37)$$

д) при $\beta > 3$ м/с и $|V_R-\overline{w}| \geq 0{,}01$ м/с

$$W_{13}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_1}\left[\frac{c_2-3c_3}{4a_1}\cdot P_1(A_z(\zeta)-a_1)-\right.$$
$$\left.-\frac{c_1+2c_3}{2a_1}\cdot P_1(A_z(\zeta)+a_1)+c_1\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)\right]; \quad (A.38)$$

е) при $\beta > 3$ м/с и $|V_R-\overline{w}| < 0{,}01$ м/с

$$W_{13}(\zeta,\beta,V_R)=-\frac{\sigma_z}{\sqrt{2}}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_1}\left[\frac{2}{a_2-a_1}\cdot P_1(A_z(\zeta)+a_1)-P_2(A_z(\zeta)+a_1)-a_1\cdot c_1\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)\right]. \quad (A.39)$$

А.3.2.4 Функция W_{14} имеет следующий вид:

а) при $0{,}001$ м/с $\leq \beta \leq 3$ м/с и $|V_R-\overline{w}| \geq 0{,}01$ м/с

$$W_{14}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_2}\left[2a_1\cdot c_1\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)-(c_1+c_2\cdot c_3)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)+\right.$$
$$\left.+\frac{1}{2a_1}\cdot(P_1(A_z(\zeta)-a_1)-P_1(A_z(\zeta)+a_1))+\frac{c_1\cdot c_2}{a_2-a_1}\cdot(P_1(A_z(\zeta)+a_1)-P_1(A_z(\zeta)+a_2))\right]; \quad (A.40)$$

б) при $0{,}001$ м/с $\leq \beta \leq 3$ м/с и $|V_R-\overline{w}| < 0{,}01$ м/с

$$W_{14}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_2}\left[\frac{c_1\cdot c_2}{a_2-a_1}\cdot(P_1(A_z(\zeta)+a_1)-P_1(A_z(\zeta)+a_2))-\right.$$
$$\left.-c_3\cdot(c_1+c_2-c_3)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)+2a_1\cdot c_2\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)\right]; \quad (A.41)$$

в) при $\beta < 0{,}001$ м/с и $|V_R - \overline{w}| \geq 0{,}01$ м/с

$$W_{14}(\zeta,\beta,V_R) = \frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}} e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_2}\left[\frac{1}{2a_1}\cdot(P_1(A_z(\zeta)-a_1) - P_1(A_z(\zeta)+a_1)) + P_2(A_z(\zeta)+a_1) - \right.$$
$$\left. - 2(a_2+a_1)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1) + 2a_1\cdot(3a_2-a_1)\cdot P_4(A_z(\zeta)+a_1) - 4a_1^2\cdot(a_2-a_1)\cdot P_5(A_z(\zeta)+a_1)\right]; \quad (A.42)$$

г) при $\beta < 0{,}001$ м/с и $|V_R - \overline{w}| < 0{,}01$ м/с

$$W_{14}(\zeta,\beta,V_R) = \frac{\sigma_z}{\sqrt{2}} e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_2}\cdot[P_2(A_z(\zeta)+a_1) - (a_2+a_1)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)]; \quad (A.43)$$

д) при $\beta > 3$ м/с и $|V_R - \overline{w}| \geq 0{,}01$ м/с

$$W_{14}(\zeta,\beta,V_R) = \frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}} e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_2}\left[\frac{1}{2a_1}\cdot P_1(A_z(\zeta)-a_1) - \frac{c_1-3c_3}{2a_1} P_1(A_z(\zeta)+a_1) - \right.$$
$$\left. - (c_1+2c_3)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1) + 2a_1\cdot c_1\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)\right]; \quad (A.44)$$

е) при $\beta > 3$ м/с и $|V_R - \overline{w}| < 0{,}01$ м/с

$$W_{14}(\zeta,\beta,V_R) = \frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}} e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_2}\left[\frac{2}{a_2-a_1}\cdot P_1(A_z(\zeta)+a_1) - 3\cdot c_3\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1) + \right.$$
$$\left. + 2a_1\cdot c_1\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)\right]. \quad (A.45)$$

А.3.2.5 Функция W_{15} имеет следующий вид:

а) при $0{,}001 \text{ м/с} \leq \beta \leq 3$ м/с и $|V_R - \overline{w}| \geq 0{,}01$ м/с

$$W_{15}(\zeta,\beta,V_R) = -\frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}} e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_1+b_2}\left[2a_1\cdot c_1^2\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1) - c_1\cdot c_2^2\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_2) - \right.$$
$$- c_1\cdot(c_1+2c_2\cdot c_3)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1) - \frac{c_2}{c_1\cdot(a_2-a_1)}\cdot(P_1(A_z(\zeta)-a_1) - P_1(A_z(\zeta)+a_2)) + \quad (A.46)$$
$$\left. + \frac{c_1}{2a_1}\cdot(P_1(A_z(\zeta)-a_1) - P_1(A_z(\zeta)+a_1)) + \frac{c_2}{a_2-a_1}\cdot(2c_1^2+c_2\cdot c_3)\cdot(P_1(A_z(\zeta)+a_1) - P_1(A_z(\zeta)+a_2))\right];$$

б) при $0{,}001 \text{ м/с} \leq \beta \leq 3$ м/с и $|V_R - \overline{w}| < 0{,}01$ м/с

$$W_{15}(\zeta,\beta,V_R) = -\frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}} e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_2+b_1}\left[\frac{c_2}{a_2-a_1}\cdot(c_1+3c_2\cdot c_3)\cdot(P_1(A_z(\zeta)+a_1) - P_1(A_z(\zeta)+a_2)) - \right.$$
$$\left. - c_1\cdot c_2^2\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_2) - c_3\cdot(2c_2^2-1)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1) + 2a_1\cdot c_1\cdot c_2\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)\right]; \quad (A.47)$$

в) при $\beta < 0{,}001$ м/с и $|V_R - \overline{w}| \geq 0{,}01$ м/с

$$W_{15}(\zeta,\beta,V_R) = \frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}} e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_1+b_2}\left[\frac{a_2-a_1}{4a_1^2}\cdot(P_1(A_z(\zeta)+a_1)-P_1(A_z(\zeta)-a_1))+\right.$$
$$+\frac{a_2+3a_1}{2a_1}\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)-(5a_2+a_1)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)+4a_1\cdot(5a_2-2a_1)\cdot P_4(A_z(\zeta)+a_1)- \quad (A.48)$$
$$\left.-8a_1^2(4a_2-3a_1)\cdot P_5(A_z(\zeta)+a_1)+16a_1^3(a_2-a_1)\cdot P_6(A_z(\zeta)+a_1)\right];$$

г) при $\beta < 0{,}001$ м/с и $|V_R - \overline{w}| < 0{,}01$ м/с

$$W_{15}(\zeta,\beta,V_R) = \frac{\sigma_z}{\sqrt{2}} e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_1+b_2}[P_2(A_z(\zeta)+a_1)-3a_2\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)]; \quad (A.49)$$

д) при $\beta > 3$ м/с и $|V_R - \overline{w}| \geq 0{,}01$ м/с

$$W_{15}(\zeta,\beta,V_R) = \frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}} e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_2+b_1}\left[\frac{2c_3-c_1}{2a_1}\cdot P_1(A_z(\zeta)-a_1)+\frac{c_1-4c_3}{2a_1}P_1(A_z(\zeta)+a_1)+\right.$$
$$\left.+(c_1+5c_3)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)-2a_1\cdot(c_1+c_3)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)\right]; \quad (A.50)$$

е) при $\beta > 3$ м/с и $|V_R - \overline{w}| < 0{,}01$ м/с

$$W_{15}(\zeta,\beta,V_R) = \frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}} e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_2+b_1}\left[\frac{2}{a_1-a_2}P_1(A_z(\zeta)+a_1)+7c_3\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)-\right.$$
$$\left.-2a_1\cdot(c_2+2c_3)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)\right] \quad (A.51)$$

А.3.2.6 Функция W_{16} имеет следующий вид:

а) при $0{,}001 \text{ м/с} \leq \beta \leq 3$ м/с

$$W_{16}(\zeta,\beta,V_R) = -\frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}} e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_2}\left[2a_1\cdot c_1\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)-(2c_1+c_2\cdot c_3)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)+\right.$$
$$\left.+\frac{c_2^2}{a_2-a_1}\cdot\left(P_1(A_z(\zeta)+a_1)-P_1(A_z(\zeta)+a_2)\right)\right]; \quad (A.52)$$

б) при $\beta < 0{,}001$ м/с

$$W_{16}(\zeta,\beta,V_R) = -\frac{\sigma_z}{\sqrt{2}} e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_2}\left[P_2(A_z(\zeta)+a_1)-(a_1+2a_2)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)+\right.$$
$$\left.+2a_1\cdot(2a_2-a_1)\cdot P_4(A_z(\zeta)+a_1)-2a_1^2\cdot(a_2-a_1)\cdot P_5(A_z(\zeta)+a_1)\right]; \quad (A.53)$$

в) при $\beta > 3$ м/с

$$W_{16}(\zeta,\beta,V_R)=-\frac{\sigma_z}{\sqrt{2}}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_2}\left[\frac{2}{a_2-a_1}P_1(A_z(\zeta)+a_1)-(c_1+c_3)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)+\right.$$
$$\left.+a_1\cdot c_1\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)\right]. \quad (A.54)$$

А.3.2.7 Функция W_{17} имеет следующий вид:

а) при 0,001 м/с ≤ β ≤ 3 м/с

$$W_{17}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_2+b_1}\left[2a_1\cdot c_1^2\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)-2c_1\cdot(c_1+c_2\cdot c_3)\times\right.$$
$$\left.\times P_2(A_z(\zeta)+a_1)-c_2^3\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_2)+\frac{c_2^2}{a_2-a_1}\cdot(2c_1+c_3)\cdot\left(P_1(A_z(\zeta)+a_1)-P_1(A_z(\zeta)+a_2)\right)\right]; \quad (A.55)$$

б) при β < 0,001 м/с

$$W_{17}(\zeta,\beta,V_R)=-\frac{\sigma_z}{\sqrt{2}}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_2+b_1}\left[P_2(A_z(\zeta)+a_1)-(a_1+4a_2)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)+\right.$$
$$+8a_1\cdot(2a_2-a_1)\cdot P_4(A_z(\zeta)+a_1)-4a_1^2\cdot(5a_2-4a_1)\cdot P_5(A_z(\zeta)+a_1)+$$
$$\left.+8a_1^3\cdot(a_2-a_1)\cdot P_6(A_z(\zeta)+a_1)\right]; \quad (A.56)$$

в) при β > 3 м/с

$$W_{17}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{\sigma_z}{\sqrt{2}}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+b_2+b_1}\left[a_1\cdot(c_1+c_3)P_3(A_z(\zeta)+a_1)-(c_1+3c_3)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)+\right.$$
$$\left.+\frac{4}{a_2-a_1}P_1(A_z(\zeta)+a_1)\right]. \quad (A.57)$$

А.3.2.8 Функция W_{18} имеет следующий вид:

а) при 0,001 м/с ≤ β ≤ 3 м/с

$$W_{18}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{\sigma_z}{2\sqrt{2}}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+2b_2}\left[4a_1^2\cdot c_1^2\cdot P_4(A_z(\zeta)+a_1)-4a_1\cdot c_1\cdot(c_1+c_2\cdot c_3)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)+\right.$$
$$+\left(2c_1^2-c_1\cdot c_2+c_2^2\cdot c_3\cdot(2c_1+c_3)\right)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)+c_1^2\cdot c_2^2\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_2)-$$
$$\left.-\frac{c_2}{a_2-a_1}\cdot\left(c_1^2\cdot(c_1+c_3)+c_2\cdot c_3\cdot(c_1+c_2)\right)\cdot\left(P_1(A_z(\zeta)+a_1)-P_1(A_z(\zeta)+a_2)\right)\right]; \quad (A.58)$$

б) при β < 0,001 м/с

$$W_{18}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{\sigma_z}{\sqrt{2}}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+2b_2}\left[P_2(A_z(\zeta)+a_1)-(2a_1+3a_2)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)+\right.$$
$$+3a_1\cdot(5a_2-a_1)\cdot P_4(A_z(\zeta)+a_1)-4a_1^2\cdot(9a_2-5a_1)\cdot P_5(A_z(\zeta)+a_1)+$$
$$\left.+8a_1^3\cdot(5a_2-4a_1)\cdot P_6(A_z(\zeta)+a_1)-16a_1^4\cdot(a_2-a_1)\cdot P_7(A_z(\zeta)+a_1)\right]; \quad (A.59)$$

в) при β > 3 м/с

$$W_{18}(\zeta,\beta,V_R)=-\frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+2b_2}\left[\frac{2}{a_2-a_1}P_1(A_z(\zeta)+a_1)-9c_3\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)+\right.$$
$$\left.+4a_1\cdot(c_1+3c_3)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)-4a_1^2\cdot(c_1+c_3)\cdot P_4(A_z(\zeta)+a_1)\right]. \quad (A.60)$$

А.3.2.9 Функция W_{19} имеет следующий вид:

а) при 0,001 м/с ≤ β ≤ 3 м/с

$$W_{19}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+2b_2+b_1}\left[-4a_1^2\cdot c_1^3\cdot P_4(A_z(\zeta)+a_1)-\right.$$
$$-2a_2\cdot c_1^2\cdot c_2^2\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_2)+2a_1\cdot c_1^2\cdot(2c_1+3c_2\cdot c_3)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)-$$
$$-c_1\cdot c_3\cdot\left(c_1+3c_2^2\cdot(c_1+c_3)\right)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)+ \quad (A.61)$$
$$+c_2^2\cdot\left(1-c_1^3-c_3\cdot c_1^2-2c_1\cdot c_2\cdot c_3\right)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_2)-$$
$$\left.-\frac{c_2}{a_2-a_1}\cdot\left(2c_1-3c_1^4-6c_1^2\cdot c_2\cdot c_3-c_2^2\cdot c_3^2\right)\cdot(P_1(A_z(\zeta)+a_1)-P_1(A_z(\zeta)+a_2))\right];$$

б) при β < 0,001 м/с

$$W_{19}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{\sigma_z}{\sqrt{2}}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+2b_2+b_1}\left[P_2(A_z(\zeta)+a_1)-(2a_1+5a_2)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)+\right.$$
$$+11a_1\cdot(3a_2-a_1)\cdot P_4(A_z(\zeta)+a_1)-20a_1^2\cdot(5a_2-3a_1)\cdot P_5(A_z(\zeta)+a_1)+8a_1^3\cdot(21a_2-16a_1)\times \quad (A.62)$$
$$\left.\times P_6(A_z(\zeta)+a_1)-16a_1^4\cdot(9a_2-8a_1)\cdot P_7(A_z(\zeta)+a_1)+48a_1^5\cdot(a_2-a_1)\cdot P_8(A_z(\zeta)+a_1)\right];$$

в) при β > 3 м/с

$$W_{19}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+2b_2+b_1}\left[\frac{2}{a_2-a_1}P_1(A_z(\zeta)+a_1)-13c_3\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)+\right.$$
$$\left.+4a_1\cdot(c_1+5c_3)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)-4a_1^2\cdot(c_1+2c_3)\cdot P_4(A_z(\zeta)+a_1)\right]. \quad (A.63)$$

А.3.2.10 Функция $W_{1\,10}$ имеет следующий вид:

а) при 0,001 м/с ≤ β ≤ 3 м/с

$$W_{1\,10}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}}e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+2b_2}\left[-4a_1^2\cdot c_1^2\cdot P_4(A_z(\zeta)+a_1)+2a_1\cdot c_1\cdot(3\cdot c_1+2\cdot c_2\cdot c_3)P_3(A_z(\zeta)+a_1)+\right.$$
$$+(2c_1^2+c_2\cdot c_3\cdot(3c_1\cdot c_2+c_3))\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)+c_1\cdot c_2^3\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_2)+ \quad (A.64)$$
$$\left.+\frac{c_2}{a_2-a_1}\cdot(2c_1^3+2c_1^2+c_2\cdot c_3\cdot(c_1+c_2))\cdot(P_1(A_z(\zeta)+a_1)-P_1(A_z(\zeta)+a_2))\right];$$

б) при β < 0,001 м/с

$$W_{1\,10}(\zeta,\beta,V_R)=-\frac{\sigma_z}{\sqrt{2}}\cdot e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+2b_2}\cdot\left[P_2(A_z(\zeta)+a_1)-(4a_2+3a_1)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)+\right.$$
$$+2a_1\cdot(12a_2-3a_1)\cdot P_4(A_z(\zeta)+a_1)-4a_1^2\cdot(13a_2-8a_1)\cdot P_5(A_z(\zeta)+a_1)+$$
$$\left.+8a_1^3\cdot(6a_2-5a_1)\cdot P_6(A_z(\zeta)+a_1)-16a_1^4\cdot(a_2-a_1)\cdot P_7(A_z(\zeta)+a_1)\right]; \quad (A.65)$$

в) при β > 3 м/с

$$W_{1\,10}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{\sigma_z}{\sqrt{2}}\cdot e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+2b_2}\cdot\left[\frac{4}{a_2-a_1}P_1(A_z(\zeta)+a_1)-(c_1+7c_3)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)+\right.$$
$$\left.+a_1\cdot(c_1+9c_3)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)-2a_1^2\cdot(c_1+c_3)\cdot P_4(A_z(\zeta)+a_1)\right]. \quad (A.66)$$

А.3.2.11 Функция $W_{1\,11}$ имеет следующий вид:

а) при 0,001 м/с ≤ β ≤ 3 м/с

$$W_{1\,11}(\zeta,\beta,V_R)=\frac{\sigma_z}{2\cdot\sqrt{2}}\cdot e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+2b_2+b_1}\cdot\left[2a_1^2\cdot c_1^3\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_2)+2a_2\cdot c_1\cdot c_2^3\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_2)-\right.$$
$$-6a_1\cdot c_1^2\cdot(c_1+c_2\cdot c_3)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)+c_1(2c_1^2+3c_3\cdot c_2(c_2\cdot(c_1+c_3)+c_1))\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)+$$
$$+c_2^2\cdot(2c_1^2+2c_1\cdot c_2\cdot c_3+c_2^2\cdot c_3)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_2)+$$
$$\left.+\frac{c_2}{a_2-a_1}\cdot(-10c_1^4-8c_1^2-1+3c_1^3+3c_1\cdot c_2\cdot c_3)\cdot(P_1(A_z(\zeta)+a_1)-P_1(A_z(\zeta)+a_2))\right]; \quad (A.67)$$

б) при β < 0,001 м/с

$$W_{1\,11}(\zeta,\beta,V_R)=-\frac{\sigma_z}{\sqrt{2}}\cdot e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+2b_2+b_1}\cdot\left[P_2(A_z(\zeta)+a_1)-3(2a_2+a_1)\cdot P_3(A_z(\zeta)+a_1)+\right.$$
$$+16a_1(3a_2-a_1)\cdot P_4(A_z(\zeta)+a_1)-2a_1^2\cdot(75a_2-47a_1)\cdot P_5(A_z(\zeta)+a_1)+$$
$$+12a_1^3\cdot(19a_2-15a_1)\cdot P_6(A_z(\zeta)+a_1)-$$
$$\left.-8a_1^4\cdot(21a_2-19a_1)\cdot P_7(A_z(\zeta)+a_1)+48a_1^5\cdot(a_2-a_1)\cdot P_8(A_z(\zeta)+a_1)\right]; \quad (A.68)$$

в) при β > 3 м/с

$$W_{1\,11}(\zeta,\beta,V_R)=-e^{-(A_z(\zeta)+a_1)^2+2b_2+b_1}\frac{\sigma_z}{\sqrt{2}}\cdot\left[\frac{6}{a_2-a_1}P_1(A_z(\zeta)+a_1)-(c_1+11c_3)\cdot P_2(A_z(\zeta)+a_1)+\right.$$
$$\left.+3a_1\cdot(c_1+4c_3)\cdot P_3(A_z(\varsigma)+a_1)-2a_1^2\cdot(c_1+2c_3)\cdot P_4(A(\varsigma)+a_1)\right]. \quad (A.69)$$

Здесь для удобства записи используются вспомогательные функции a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, c_3, A_z, P_n (n=0,1,2,3.....), определенные в А.1.

Приложение Б
(рекомендуемое)

Генерация облаков для мезомасштабной модели

Б.1 Генерация облаков в ПСА для объемного источника

Б.1.1 Объемные источники различной конфигурации

Объемный источник моделируется цилиндром с верхней h_{max} и нижней h_{min} границами по вертикали и диаметром основания d_s.

Б.1.1.1 Для атмосферного выброса (исключая выбросы из венттрубы), вертикальный размер $\delta_{ПСА}$ которого меньше горизонтального d_s, т.е.

$$\frac{\delta_{ПСА}}{d_s} \le \frac{2}{3},$$

где $\delta_{ПСА}$ определено по формуле (5.27),

вычисления Δt_s, n_x, n_y, n_z и Δt проводятся следующим образом:

а) «виртуальное» время Δt_s и число «виртуальных» источников по вертикали n_z определяются из условий:

$$\sigma_z(\Delta t_s) = \frac{\delta_{ПСА}}{2(n_z + 1)} \quad ; \quad \Delta t_s \le 600\ с, \tag{Б.1}$$

где $$\sigma_z(\Delta t_s) = \frac{\sigma_w \cdot \Delta t_s}{\sqrt{1 + \frac{\Delta t_s}{2\tau_z}}}, \tag{Б.2}$$

σ_w, τ_z - определяются в момент времени t_k в точке $(x_s, y_s, \bar{z}_s)$,

$\bar{z}_s$ - средняя высота источника выброса в ПСА,

$$\bar{z}_s = \max\left\{\frac{\min\{h_{max}, H\} + h_{min}}{2}, 2м\right\}. \tag{Б.3}$$

Вычисление Δt_s и n_z можно проводить методом итераций, если n_z меньше 1, то n_z берется равным 1;

б) интервал времени между поступлением облаков в атмосферу ("скважность" поступления облаков в атмосферу) Δt и количество «виртуальных» источников n_x, n_y по осям x, y, соответственно, определяются таким образом, чтобы на расстоянии x_{min} от источника пересечение облаков следующих друг за другом обеспечивало гладкий профиль концентрации ЗВ, и вычисляются по соотношениям:

$$\Delta t = \frac{2{,}3 \cdot \sigma_x \left(\Delta t_s + \frac{x_{min}}{\varsigma(z_1)} \right)}{\varsigma(z_1)}, \qquad (Б.4)$$

$$n_x = n_y = \max\left\{1, \left[\frac{d_s}{\varsigma(z_1) \cdot \Delta t} \right] \right\}, \qquad (Б.5)$$

где x_{min} – выбирается пользователем и рекомендуется брать равным

$$x_{min} = \min\{100м; \max\{\Delta x; 20м\}\}, \qquad (Б.6)$$

Δx – шаг сетки, на которой проводится вычисление приземной концентрации ЗВ;

$\zeta(z_1)=\max\{U(z_1),\sigma_u(z_1)\}$;

$U(z_1)$, $\sigma_u(z_1)$ – модуль и дисперсия скорости ветра в момент времени t_k в точке (x_s,y_s,z_1);

$$z_1 = \max\{h_{min}, 2\} + \frac{\delta_{ПСА}}{2 \cdot n_z}. \qquad (Б.7)$$

Примечание – квадратные скобки в формуле (Б.5) означают целую часть числа.

Б.1.1.2 Для атмосферного выброса (исключая выбросы из венттрубы), вертикальный размер $\delta_{ПСА}$ которого больше горизонтального d_s, т.е.

$$\frac{\delta_{ПСА}}{d_s} > \frac{2}{3},$$

где $\delta_{ПСА}$ определенно по формуле (5.27),

вычисления Δt_s, n_x, n_y, n_z и Δt проводятся следующим образом:

а) «виртуальное» время Δt_s и количество «виртуальных» источников n_x, n_y по направлению осей x, y определяются из условий:

$$\sigma_y(\Delta t_s) = \frac{d_s}{2(n_y + 1)}; \qquad \Delta t_s \le 600\,с; \qquad n_x = n_y, \qquad (Б.8)$$

где $$\sigma_y(\Delta t_s) = \frac{\sigma_v \cdot \Delta t_s}{\sqrt{1 + \frac{\Delta t_s}{2\tau_y}}}, \qquad (Б.9)$$

σ_v, τ_y - определяются в момент времени t_k в точке $(x_s, y_s, \bar{z}_s)$,

$\bar{z}_s$ вычисляется по формуле (Б.3).

Вычисление Δt_s и n_y можно проводить методом итераций, если n_y меньше 1, то n_y берется равным 1;

б) интервал времени Δt между поступающими в атмосферу облаками определяется по формуле (Б.4), а количество «виртуальных» источников по вертикали n_z равно

$$n_z = \left[\frac{\delta_{ПСА}}{d_s} + \frac{1}{2}\right]. \qquad (Б.10)$$

Примечание – квадратные скобки в формуле (Б.10) означают целую часть числа.

Б.1.1.3 Для выброса ЗВ из венттрубы высотой ниже границы ПСА ($h_{max}=h_{min}=z_s \le H$; $d_s<50$м).

а) «виртуальное» время Δt_s определяется из условия

$$\sigma_y(\Delta t_s) = \frac{d_s}{4}$$

и имеет вид

$$\Delta t_s = \frac{d_s^2}{64 \cdot \tau_y \cdot \sigma_v^2}\left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{16\tau_y \cdot \sigma_v}{d_s}\right)^2}\right), \qquad (Б.11)$$

где σ_v, τ_y вычисляются в момент времени t_k в точке (x_s, y_s, z_s),

б) количество «виртуальных» источников по осям x, y, z равно

$n_x=n_y=n_z=1$.

в) интервал времени Δt между последовательно поступающими облаками, моделирующими выброс из венттрубы, определяется по формуле (Б.4) на высоте $z_1=z_s=h_{max}=h_{min}$.

Б.1.2 Координаты центров тяжести облаков $x_{s\,i,j,m}$, $y_{s\,i,j,m}$, $z_{s\,i,j,m}$, моделирующие реальный объемный источник, в ПСА и образовавшиеся за «виртульное» время Δt_s из «виртуальных» источников, определяются соотношениями

$$x_{s\,i,j,m} = x_s - \frac{d_s}{2n_y}(2j - 1 - n_y)\cdot \sin\varphi(z_{s\,i,j,m}) + \frac{d_s}{2n_x}(2i - 1 - n_x)\cdot \cos\varphi(z_{s\,i,j,m})$$

$$y_{s\,i,j,m} = y_s + \frac{d_s}{2n_y}(2j - 1 - n_y)\cdot \cos\varphi(z_{s\,i,j,m}) + \frac{d_s}{2n_x}(2i - 1 - n_x)\cdot \sin\varphi(z_{s\,i,j,m}) \qquad (Б.12)$$

$$z_{s\,i,j,m} = \frac{\delta_{ПСА}}{2n_z}(2m - 1) + \max\{h_{min}, 2\},$$

где $i=1,\ldots,n_x$; $j=1,\ldots,n_y$; $m=1,\ldots,n_z$.

Эти координаты используются при расчете переноса и рассеяния ЗВ от «виртуальных» источников вместо (x_s, y_s, z_s) в формулах (5.12), (5.13), (5.10).

Б.1.3 Масса ЗВ $Q_{ПСА,n}$, поступающего в атмосферу от каждого n–ого «виртуального» источника, находящегося в ПСА, определяется следующим образом:

$$Q_{ПСА,n} = \begin{cases} \dfrac{Q_{ПСА}}{N_{ПСА}} \cdot \dfrac{\Delta t}{t_s} & \text{для источника конечного времени действия } t_s \\ \dfrac{Q_{ПСА}}{N_{ПСА}} & \text{для мгновенного источника } (t_s < 180\,с), \end{cases} \quad (Б.13)$$

где $Q_{ПСА}$ – определяется по формуле (5.29);

$n = 1, 2, \ldots, N_{ПСА}$;

$N_{ПСА}=n_x \cdot n_y \cdot n_z$ – количество «виртуальных» источников, моделирующих реальный источник, находящийся в ПСА.

При вычислении переноса и рассеяния ЗВ для каждого n-го «виртуального» источника по алгоритму, представленному в 5.4, в формулу (5.5) вместо Q подставляется $Q_{ПСА,n}$.

Б.2 Генерация облаков в ПСА при проливе и испарении с плоской поверхности

Б.2.1 Поступление ЗВ в атмосферу при испарении с пролива моделируется источником в виде прямоугольного параллелепипеда, в основании которого лежит квадрат со стороной λ, ориентированной по направлению ветра, и высотой равной слою испарения $\delta=h_{max}-h_{min}$,

Для аварийного пролива и испарения ЗВ вычисления Δt_s, n_x, n_y, n_z, Δt проводятся следующим образом:

а) «виртуальное» время Δt_s и количество «виртуальных» источников по вертикали n_z для аварийного пролива ЗВ рассчитываются аналогично их определению для объемного источника по формуле (Б.1) при замене $\bar{z}_s$, вычисленной по формуле (Б.3), на

$$\bar{z}_s = \max\{h_{min}, 2м\}. \quad (Б.14)$$

б) при испарении ЗВ интервал времени Δt между поступлениями модельных облаков в атмосферу и количество «виртуальных» источников n_x, n_y по осям x, y, соответственно, определяются из условий, обеспечивающих на расстоянии x_{min} от источника по ветру гладкий профиль концентрации, и вычисляются по соотношениям

$$n_x=1, \quad n_y = \max\left\{\left[\frac{\lambda}{2{,}3 \cdot \sigma_y\left(\Delta t_s + \dfrac{x_{min}}{\varsigma(\bar{z}_{s1})}\right)}\right], 1\right\}, \quad (Б.15)$$

$$\Delta t = \frac{2{,}3 \cdot \sigma_x\left(\Delta t_s + \frac{x_{min}}{\varsigma(\bar{z}_{s1})}\right)}{\varsigma(\bar{z}_{s1})}, \qquad (Б.16)$$

где $\zeta(z)$ – определяется по формуле (Б.6);

$$\bar{z}_{s1} = \max\left\{\frac{h_{max} + h_{min}}{2}, 2\text{м}\right\};$$

x_{min} – выбирается пользователем и рекомендуется брать равным

$$x_{min} = \min\{100\text{м}, \max\{\Delta x; 20\text{м}\}\},$$

Δx – шаг сетки, на которой проводится вычисление приземной концентрации ЗВ.

Примечание – Квадратные скобки в (Б.15) означают целую часть числа.

в) Если при расчетах на подветренной стороне пролива приземная концентрация $q(\Delta t_s)$ превышает плотность насыщенных паров ρ_H ($q(\Delta t_s) > \rho_H$), то происходит процесс задымления, приводящий к эффективному увеличению размера источника λ. Приземная концентрация вычисляется по формуле $q(\Delta t_s) = \frac{Q_{ПСА,n} \cdot n_x \cdot n_y \cdot n_z}{\lambda^2 \cdot \delta}$, ρ_H – по формуле (7.27), $Q_{ПСА,n}$ (масса ЗВ в n-ом «виртуальном» облаке) – по соотношению (Б.13). Значение λ корректируется по формуле

$$\lambda = \sqrt{\frac{Q_{ПСА,n} \cdot n_x \cdot n_y \cdot n_z}{\rho_H \cdot \delta}} \qquad (Б.17)$$

и с новым значением λ пересчитывается n_y по формуле (Б.15).

Б.2.2 Координаты центра тяжести облаков $x_{s\,j,k}$, $y_{s\,j,k}$, $z_{s\,j,k}$, моделирующие испарение ЗВ при проливе и формирующиеся за «виртуальное» время Δt_s из «виртуальных» источников определяются соотношениями

$$x_{s\,j,k} = x_s + \frac{l}{2} \cdot \cos\varphi(z_{s\,j,k}) - \frac{l}{2n_y}(2j - 1 - n_y) \cdot \sin\varphi(z_{s\,j,k}),$$

$$y_{s\,j,k} = y_s + \frac{l}{2} \cdot \sin\varphi(z_{s\,j,k}) + \frac{l}{2n_y}(2j - 1 - n_y) \cdot \cos\varphi(z_{s\,j,k}), \qquad (Б.18)$$

$$z_{s\,j,k} = \max\{h_{min}, 2\text{м}\} + \frac{k \cdot (k-1)}{n_z^2} \cdot h_{max},$$

где $j=1,2,\ldots,n_y$; $k=1,2,\ldots,n_z$.

Эти координаты используются при расчете переноса и рассеяния ЗВ от «виртуальных» источников вместо x_s, y_s, z_s в формулах (5.12), (5.13), (5.10).

Б.2.3 При испарении ЗВ масса $Q_{ПСА,n}$, поступающая в атмосферу от каждого n-го «виртуального» источника, находящегося в ПСА, определяется следующим образом:

$$Q_{ПСА,n} = \frac{M_{ПСА}}{N_{ПСА}} \cdot \frac{\Delta t}{t_s}, \qquad (Б.19)$$

где $N_{ПСА} = n_x \cdot n_y \cdot n_z$;

$n=1,2,\ldots,N_{ПСА}$.

Вычисление переноса и рассеяния ЗВ в атмосфере для каждого n-го «виртуального» источника проводится по алгоритму, представленному в 5.4, где в формуле (5.5) вместо Q подставляется $Q_{ПСА,n}$.

Б.3 Генерация облаков в СА для объемного источника

Б.3.1 Количество «виртуальных» источников по вертикали $n_{z\,CA}$ рекомендуется определять следующим образом:

$$n_{z\,CA} = \max\left\{\left[\frac{2\delta_{CA}}{\sqrt{\frac{\delta_{max}^2 + \delta_{min}^2}{2}}}\right]; 1\right\}, \qquad (Б.20)$$

где δ_{CA} – вертикальный размер источника выброса в СА, определяемый по формуле (5.27);

$\delta_{min} = 20 \cdot i$, причем i определяется из условия

$\max\{h_{min}, H\} \in [10 \cdot (1 + i \cdot (i-1)); 10 \cdot (1 + i \cdot (i+1))]$, $i = 1,2,\ldots$;

$\delta_{max} = 20 \cdot j$, причем j определяется из условия;

$h_{max} \in [10 \cdot (1 + j \cdot (j-1)); 10 \cdot (1 + j \cdot (j+1))]$, $j = 1,2,\ldots$.

Б.3.2 Число «виртуальных» источников по горизонтали $n_{x\,CA}$, $n_{y\,CA}$ равно

$$n_{x\,CA} = n_{y\,CA} = 1. \qquad (Б.21)$$

Б.3.3 «Виртуальное» время $\Delta t_{s\,CA}$ определяется из условия:

$$\sigma_y(\Delta t_{s\,CA}) = \frac{d_s}{4}, \qquad (Б.22)$$

где $\sigma_y(\Delta t_{s\,CA})$ представляется в виде (Б.9),

σ_v, τ_y в (Б.9) определяются по формулам (5.34), (5.39) на высоте ПСА H.

Б.3.4 Интервал времени Δt_{CA} между поступлением облаков в атмосферу («скважность облаков») определяется из условия

$$\Delta t_{CA} = \frac{2{,}3 \cdot \sigma_x \left(\Delta t_{s\ CA} + \frac{x_{min}}{\varsigma(z_{s\ CA,1})} \right)}{\varsigma(z_{s\ CA,1})}, \qquad (Б.23)$$

где σ_x – определяется в точке (x_s, y_s, H) по формуле (5.33);

$$z_{s\ CA,1} = \max\{h_{min}, H\} + \frac{1}{2n_{z\ CA}} \cdot \delta_{CA};$$

$$x_{min} = \min\{100\text{м}, \max\{\Delta x; 100\text{м}\}\},$$

δ_{CA} определяется по формуле (5.28).

Б.3.5 Координаты центра тяжести облаков $x_{s\,CA,m}$, $y_{s\,CA,m}$, $z_{s\,CA,m}$, моделирующих реальный источник в СА и образующихся за «виртуальное» время $\Delta t_{s\,CA}$ из «виртуальных» источников определяются соотношениями

$$x_{s\,CA,m} = x_s$$

$$y_{s\,CA,m} = y_s \qquad (Б.24)$$

$$z_{s\,CA,m} = \frac{\delta_{CA}}{2n_{zCA}^2}\left(n_{zCA} + 2m \cdot (m-1)\right) + \max\{h_{min}, H\},$$

где $m=1,\ldots,n_{z\,CA}$.

Эти координаты используются при расчете переноса и рассеяния ЗВ от «виртуальных» источников вместо x_s, y_s, z_s в формулах (5.12), (5.13), (5.10).

Б.3.6 Масса ЗВ $Q_{CA,n}$, поступающая в атмосферу от каждого n–ого «виртуального» точечного источника, находящегося в СА, определяется следующим образом:

$$Q_{CA,n} = \begin{cases} \frac{M_{CA}}{N_{CA}} \cdot \frac{\Delta t_{CA}}{t_s} & \text{для источника конечного времени действия } t_s \\ \frac{Q_{CA}}{N_{CA}} & \text{для мгновенного источника,} \end{cases} \qquad (Б.25)$$

где Q_{CA} – определяется по формуле (5.30);

$n=1,2,\ldots,N_{CA}$;

$N_{CA}=n_{x\,CA} \cdot n_{y\,CA} \cdot n_{z\,CA}$ – количество «виртуальных» источников, моделирующих реальный источник, находящийся в СА.

При вычислении переноса и рассеяния ЗВ от каждого n-го точечного «виртуального» источника по алгоритмам подраздела 5.4 в формулу (5.5) вместо Q подставляется $Q_{CA,n}$.

Б.4 Генерация облаков ЗВ в ПСА при переходе облака из СА в ПСА

Б.4.1 Облака ЗВ могут переходить из СА в ПСА. Если в процессе счета в момент времени t_{k2} высота центра тяжести облака $z_{c\,CA}(t_{k2})$, находящегося в СА, окажется ниже высоты ПСА, т.е. $z_{c\,CA}(t_{k2})$ менее H, то это облако переходит в ПСА и далее моделируется в виде нового мгновенного объемного источника, возникнувшего в ПСА в момент времени t_{k2}, со следующими геометрическими характеристиками:

а) координаты центра нового мгновенного источника (x_{s2}, y_{s2}, z_{s2}) совпадают с координатами центра тяжести облака, вошедшего в ПСА:

1) $x_{s2}(t_{k2})=x_{c\,CA}(t_{k2})$;

2) $y_{s2}(t_{k2})=y_{c\,CA}(t_{k2})$;

3) $z_{s2}(t_{k2})=\min\{H(t_{k2})-2;\ z_{c\,CA}(t_{k2})\}$;

б) вертикальный размер нового мгновенного источника $\delta_{ПСА2}$ определяется вертикальной дисперсией облака ЗВ, вошедшего в ПСА:

$$\delta_{ПСА2} = 4 \cdot \sigma_{z\,CA}(t_{k2});$$

в) горизонтальный размер нового мгновенного источника d_{s2} определяется горизонтальной дисперсией облака ЗВ, вошедшего в ПСА:

$$d_{s2} = 2 \cdot \sigma_{y\,CA}(t_{k2}).$$

Б.4.2 Виртуальное время Δt_{s2} и количество «виртуальных» источников, моделирующих новый мгновенный источник, n_{x2}, n_{y2}, n_{z2} по осям x,y,z, соответственно, определяются из условий

$$\sigma_y(\Delta t_{s2}) = \frac{d_{s2}}{8 \cdot (n_{y2}+1)}; \qquad \Delta t_{s2} = 600\ \text{с}; \qquad n_{x2}=n_{y2}, \tag{Б.26}$$

где $\sigma_y(\Delta t_{s2})$ представляется в виде $\sigma_y(\Delta t_{s2}) = \dfrac{\sigma_v \cdot \Delta t_{s2}}{\sqrt{1+\dfrac{\Delta t_{s2}}{2\tau_y}}}$;

σ_v, τ_y - определяются в момент времени t_{k2} на высоте $z_{s2}(t_{k2})$.

Вычисление Δt_{s2} и n_{y2} можно проводить методом итераций. Если n_{y2} меньше 1, то n_{y2} берется равным 1.

Количество «виртуальных» источников по вертикали

$$n_{z2}=1. \qquad (Б.27)$$

Б.4.3 *Координаты центра тяжести* облаков $x_{s2\ i,j}$, $y_{s2\ i,j}$, $z_{s2\ i,j}$, моделирующих новый мгновенный объемный источник, возникший в ПСА при переходе ЗВ из СА в ПСА и образовавшийся за «виртуальное» время Δt_{s2} из «виртуальных» источников определяются соотношениями

$$x_{s2\ i,j} = x_{s2} - \frac{d_{s2}}{2n_{y2}}(2j-1-n_{y2})\cdot\sin\varphi(z_{s2\ i,j}) + \frac{d_{s2}}{2n_{x2}}(2i-1-n_{x2})\cdot\cos\varphi(z_{s2\ i,j}),$$

$$y_{s2\ i,j} = y_{s2} + \frac{d_{s2}}{2n_{y2}}(2j-1-n_{y2})\cdot\cos\varphi(z_{s2\ i,j}) + \frac{d_{s2}}{2n_{x2}}(2i-1-n_{x2})\cdot\sin\varphi(z_{s2\ i,j}), \qquad (Б.28)$$

$$z_{s2\ i,j} = z_{s2}\ ,$$

где x_{s2}, y_{s2}, z_{s2} – координаты центра тяжести облака, перешедшего из СА в ПСА;

$i=1,\ldots,n_{x2}$, $j=1,\ldots,n_{y2}$;

d_{s2} – эффективный горизонтальный размер облака;

n_{x2}, n_{y2} – количество «виртуальных» источников, моделирующее новый мгновенный источник, поступивший в ПСА, по осям x и y, соответственно.

Эти координаты используются при расчете переноса и рассеяния ЗВ от *рассматриваемых источников в формулах* (5.12), (5.13), (5.10) *вместо* x_s, y_s, z_s, соответственно.

Б.4.4 Масса ЗВ $Q_{ПСА,n2}$, поступающая в атмосферу от каждого n_2–ого «виртуального» источника, возникшего в ПСА в момент времени t_{k2}, следующая:

$$Q_{ПСА,n2} = \frac{Q_{CA}}{N_{CA}}, \qquad (Б.29)$$

где $N_{CA}=n_{x2}\cdot n_{y2}$;

$n_2=1,2,\ldots, N_{CA}$.

Вычисление переноса и рассеяния ЗВ в атмосфере для каждого n_2–ого «виртуального» источника проводится по алгоритму данному в разделе 5.4, где в формулу (5.5) вместо Q подставляется $Q_{ПСА,n2}$.

Приложение В

(обязательное)

Определение параметров ЗВ

В.1 Расчет траектории начального подъема ЗВ

В.1.1 Если аварийный выброс произошел через венттрубу ПОО, то высота начального подъема ЗВ Δh над геометрической высотой источника $z_s=h_{max}=h_{min}$ за счет скорости истечения ЗВ из источника и его перегрева относительно окружающей среды на основании многочисленных экспериментальных данных для различных погодных условий вычисляется по модифицированным формулам Неттервилла [35]. Длительность $\hat{t}$ начального подъема из венттрубы за счет тепловых и динамических факторов ЗВ рассчитывается по следующей аппроксимационной формуле

$$\hat{t} = 100 \cdot \ln(1 + v_s + |\Delta T|), \qquad (В.1)$$

где $\Delta T = T_s - T$ – разность температур выбрасываемого T_s и атмосферного $T(z_s)$ воздуха на высоте источника z_s, °К;

v_s - скорость истечения газо-аэрозольной смеси из венттрубы, м/с.

В.1.1.1 Для $t - t_k \le \hat{t}$ при вычислении Δh рекомендуется использовать следующие формулы:

а) для категорий A, B и C (неустойчивые условия атмосферы) –

$$\Delta h(t-t_k) = \left\{ \frac{3}{2\beta_h^2 \cdot u \cdot s^2} \left[F_0 \cdot \left(s \cdot (t-t_k) - \frac{1-e^{-2s\cdot(t-t_k)}}{2} \right) + \right. \right.$$
$$\left. \left. + M_0 \cdot s \cdot \left(s \cdot (t-t_k) + \frac{1-e^{-2s\cdot(t-t_k)}}{2} \right) \right] + \left(\frac{R_0}{\beta_h} \right)^3 \right\}^{1/3} - \frac{R_0}{\beta_h}; \qquad (В.2)$$

б) для категории D (нейтральные условия) –

$$\Delta h(t-t_k) = \left\{ \frac{3}{\beta_h^2 \cdot u \cdot s^2} \left[F_0 + s \cdot M_0 - (s \cdot M_0 + F_0 \cdot (1 + s \cdot (t-t_k))) e^{-s\cdot(t-t_k)} \right] + \left(\frac{R_0}{\beta_h} \right)^3 \right\}^{\frac{1}{3}} - \frac{R_0}{\beta_h}; \qquad (В.3)$$

в) для категорий E, F и G (устойчивые условия) –

$$\Delta h(t-t_k)=\left\{\frac{3}{2\beta_h^2\cdot uU\cdot s^2}\left[F_0+s\cdot M_0-\left(s\cdot M_0(\cos(s\cdot(t-t_k))-\sin(s\cdot(t-t_k)))+\right.\right.\right.$$
$$\left.\left.\left.+F_0\cdot(\cos(s\cdot(t-t_k))+\sin(s\cdot(t-t_k)))\right)\cdot e^{-s\cdot(t-t_k)}\right]+\left(\frac{R_0}{\beta_h}\right)^3\right\}^{1/3}-\frac{R_0}{\beta_h}; \quad (B.4)$$

где $F_0=\frac{\Delta T}{T}\cdot g\cdot v_s\cdot\left(\frac{d_s}{2}\right)^2$; (B.5)

$s=\left|\frac{g}{T}\left(\frac{\partial T}{\partial z}+10^{-2}\right)\right|^{1/2}$ – параметр, определяемый по таблице В.1 в зависимости от устойчивости атмосферы;

$$M_0=\left(v_s\cdot\frac{d_s}{2}\right)^2; \quad (B.6)$$

$$R_0=d_s\cdot\left(\frac{v_s}{2U}\right)^{1/2}; \quad (B.7)$$

β_h - определяется по таблице В.1;

$u=\max\{U(z_s), 1\}$;

d_s - диаметр венттрубы, м.

Таблица В.1 – Значения параметров s и β_h для различных категорий устойчивости

Параметр	Значения параметров s и β_h для различных категорий устойчивости						
	A	B	C	D	E	F	G
s, c^{-1}	$2\cdot10^{-2}$	$1{,}7\cdot10^{-2}$	$1{,}47\cdot10^{-2}$	$0{,}7\cdot10^{-2}$	$2{,}95\cdot10^{-2}$	$4{,}2\cdot10^{-2}$	$5{,}0\cdot10^{-2}$
β_h	0,25	0,35	0,45	0,45	0,25	0,25	0,25

В.1.1.2 Для $t-t_k>\hat{t}$ начальный подъем ЗВ из венттрубы за счет тепловых и динамических факторов прекращается и

$$\Delta h(t-t_k)=\Delta h(\hat{t}-t_k). \quad (B.8)$$

В.2 Параметры ЗВ

В.2.1 Набор используемых параметров ЗВ

Параметры выведения ЗВ из атмосферы, определяемые процессами гравитационного оседания аэрозольных частиц, взаимодействия с подстилающей поверхностью (вследствие инерционного осаждения, электростатического осаждения и

т.п.), химического превращения или радиоактивного распада и вымывания осадками, описываются соответственно скоростью оседания (седиментации) аэрозольных частиц V_{Ra}, скоростью сухого осаждения V_d, параметром химического превращения или радиоактивного распада λ_1 и коэффициентом вымывания λ_2. Их определение основывается как на данных об источнике ЗВ, так и на метеорологических данных и данных о типе подстилающей поверхности. Они могут оцениваться экспертно или алгоритмически.

В.2.2 Скорость оседания

Скорость оседания аэрозольных частиц ЗВ V_{Ra}, м/с, определяется их радиусом R, см, и плотностью ρ_a, г/см^3 и вычисляется по формуле из [36]

$$V_{Ra} = \frac{1.28 \cdot 10^4 \cdot \rho_a \cdot R^2}{\left(1 + 6.6 \cdot 10^2 \cdot R \cdot \sqrt{R \cdot \rho_a}\right)}. \qquad (B.9)$$

В случае отсутствия значений R и ρ_a используют экспертные оценки или эмпирические значения [37] V_{Ra}, представленные в таблице В.2.

Таблица В.2 – Значения параметров V_{Ra}, V_d и γ_0 для ЗВ

Вещество	V_{Ra}, м/с	V_d, м/с	γ_0, ч/(мм·с)
Элементарный йод (I_2)	0	$2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-5}$
Органические соединения йода (CH_3I)	0	$1 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-7}$
Аэрозоль	$7 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	10^{-6}
ИРГ (инертные радиоактивные газы)	0	0	0
Тритий (^3H)	0	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-5}
Углерод-14 (^{14}C)	0	$6 \cdot 10^{-4}$	10^{-5}

В.2.3 Полидисперсность ЗВ

Если аэрозоль, на котором переносится ЗВ, полидисперсный, то делается предположение о виде функции плотности распределения частиц ЗВ f(R) по размерам. Обычно предполагается логарифмически-нормальное распределение со средним радиусом частиц R и стандартным отклонением d, определяемые по сценарию аварии, т.е. R и d – входные параметры. Для проведения расчетов распространения ЗВ в атмосфере непрерывный спектр разбивается на n монодисперсных фракций с сохранением трех первых моментов функции распределения f(R), что позволяет для каждой i-й фракции определить радиус частиц R_i, суммарную массу (активность) частиц данной фракции Q_i. По радиусу R_i, используя формулу (В.6), вычисляется скорость оседания частиц данной фракции. Расчеты концентрации и плотности выпадений для

каждой фракции проводятся по методу, изложенному в разделе 5. Концентрация и плотность выпадения полидисперсного ЗВ определяются суммированием соответственно концентраций и плотностей выпадений частиц каждой фракции. Рекомендуется выбирать от 1 до 5 фракций. Радиус каждой фракции R_i, и масса (активность) частиц каждой фракции в k-ом облаке определяется формулами

$$R_i = R \cdot \left(1 + \frac{a^2}{a^2}\right)^{\cdot 3} \frac{\Delta M_i}{\Delta N_i}, \quad i = 1,...,n, \tag{В.11}$$

$$Q_i = Q(t_k) \cdot \Delta M_i, \tag{В.12}$$

где $$a = \frac{R}{d}; \tag{В.13}$$

$$\Delta M_i = \frac{\Phi(c_{i+1} - 4d_1) - \Phi(c_i - 4d_1)}{2}; \tag{В.14}$$

$$\Delta N_i = \frac{\Phi(c_{i+1} - d_1) - \Phi(c_i - d_1)}{2}; \tag{В.15}$$

R, d^2 - средний радиус и дисперсия функции плотности распределения частиц по размерам f(R);

$$d_1 = 0.5 \ln\left(1 + \frac{a^2}{a^2}\right); \tag{В.16}$$

$$c_i = 3d_1 + b_i; \tag{В.17}$$

b_i - приведены в таблице В.3;

Ф - интеграл вероятности.

Таблица В.3 - Значения b_i для формулы (В.17) в зависимости от числа фракций n

Параметр b_i	Значения b_i в зависимости от числа фракций				
	1	2	3	4	5
b_1	-3	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00
b_2	3	0	-0,43	-0,68	-0,85
b_3	-*	3,00	0,43	0	-0,25
b_4	-	-	3,00	0,68	0,25
b_5	-	-	-	3,00	0,85
b_6	-	-	-	-	3,00
* Не требуются.					

В.2.4 Скорость сухого осаждения

В.2.4.1 Экспериментально известно, что эффективная скорость осаждения V_d аэрозольных частиц на подстилающую поверхность может быть больше, чем их гравитационная скорость V_R. Скорость осаждения V_d обычно определяется как отношение потока ЗВ к его концентрации в атмосфере вблизи подстилающей поверхности.

Физические механизмы взаимодействия частиц и газо-аэрозольного ЗВ с подстилающей поверхностью достаточно сложны и разнообразны. Упрощенно эффективная скорость сухого осаждения для аэрозольных частиц представляется в виде:

$$V_d = V_R + \beta\,, \qquad \text{(В.18)}$$

где β - коэффициент взаимодействия ЗВ с подстилающей поверхностью.

Для невесомого ЗВ при отсутствии его взаимодействия с подстилающей поверхностью $\beta=0$ (полное отражение), а при полном поглощении β стремится к бесконечности, что соответствует для условий атмосферы значениям β более 3 м/с. В случае частичного поглощения значение β зависит от типа ЗВ и характера подстилающей поверхности и возникают сложности его определения. В настоящее время обычно значение V_d задается экспертно. В таблице В.2 даны экспертные оценки V_d для радиоактивной примеси.

В.2.5 Химическое превращение. Радиоактивный распад

Параметр λ_1 учитывает уменьшение концентраций и выпадений ЗВ за счет процессов:

– химического превращения, которое определяется реакцией первого порядка и задаётся, исходя из химических свойств ЗВ, параметром λ_1 (справочные данные);

– радиоактивного распада, который определяется периодом полураспада $T_{1/2}$ радионуклида и вычисляется согласно формуле:

$$\lambda_1 = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}\,, \qquad \text{(В.19)}$$

где $T_{1/2}$ - период полураспада (справочные данные).

В.2.6 Вымывание ЗВ осадками

Одним из наиболее эффективных механизмов самоочистки атмосферы является выведение ЗВ осадками. Процесс обеднения облака ЗВ при выпадении осадков учитывается в расчетах концентрации и плотности выпадения параметром λ_2 вымывания ЗВ из подоблачного слоя атмосферы, характеризующим в целом процесс вымывания,

$$\lambda_2(x,y,t) = \gamma_0 \cdot \gamma_1 \cdot I(x,y,t)\,, \qquad \text{(В.20)}$$

где I – средняя интенсивность осадков за интервал времени $[t_{wb}, t_{we}]$, мм/ч;

t_{wb}, t_{we} – время начала и окончания возникновения атмосферных осадков.

Средняя интенсивность атмосферных осадков I определяется как отношение количества атмосферных осадков к интервалу времени их выпадения. Параметр γ_0 является

Приложение Г

(рекомендуемое)

Оценка параметров пограничного слоя атмосферы

Г.1 Входная и выходная метеорологическая информация

Г.1.1 Метеорологические параметры, необходимые для проведения расчетов переноса и рассеяния ЗВ в атмосфере, готовятся специальной прогностической моделью, описание которой выходит за рамки настоящего документа. Для проведения предварительной экспресс-оценки в помощь эксперту ниже даны способы оценок параметров пограничного слоя атмосферы (ПСА) для текущего времени по данным стандартных приземных наблюдений на метеостанции вблизи ПОО. При этом учет влияния как турбулентного, так и лучистого теплообмена в атмосфере проводится на основе статистических закономерностей. Уровень достоверности значений параметров ПСА понижается в бароклинной атмосфере и при сложной орографии местности, что сказывается в первую очередь на точности определения ветра. Прогноз развития метеоситуации не рассматривается и пользователь должен позаботиться о получении прогноза и необходимых метеопараметров, например, по региональной модели прогноза.

Г.1.2 В данном приложенинии приведен способ параметризации приземного (ПрСА) и пограничного слоев атмосферы, использующий в качестве входных данных минимальный набор метеорологических наблюдений, проводимых на метеостанциях в районе ПОО.

Поскольку в среднем расстояния между метеостанциями сети Росгидромета от 70 до 150 км, а размеры расчетной мезомасштабной области переноса облака не более 100км, то желательно иметь и использовать метеонаблюдения непосредственно в районе ПОО.

Для проведения расчетов по предложенному алгоритму оценки параметров ПрСА и ПСА необходим следующий набор входной приземной метеоинформации:

- скорость $U_ф$ и направление ветра $Fi_ф$ на флюгере (10±2) м;
- приземная температура T_0 на высоте (2±0,1) м;
- общая N_o и нижняя $N_н$ облачность, выраженная в баллах;
- количество осадков Q, время их прохождения и тип осадков (фазовое состояние).

Г.1.3 Выходной информацией блока оценки параметров ПСА являются поля следующих параметров в ПСА:

– скорости ветра;

– температуры;

– интегральных характеристик ПСА (динамическая скорость u_*, высота ПСА H, параметры устойчивости $p_т$, $p_п$, μ, μ_0, L);

– эффективной величины интенсивности осадков ($I \cdot \gamma_1$).

Г.2 Определение категорий устойчивости атмосферы

Г.2.1 Типизация метеорологических условий

Поступающее в атмосферу ЗВ при аварийных выбросах рассеивается и переносится в атмосфере при различных метеорологических условиях и турбулентных характеристиках, классификация которых производится по категориям устойчивости. Любые категории устойчивости, применяемые в метеорологии, основываются на некоторых комбинациях термических и динамических факторов. Категорию устойчивости можно определить несколькими способами, один из которых при наличии только данных приземных измерений на метеорологической станции - метод Тернера, классифицирующий состояние атмосферы как:

а) неустойчивое:

1) сильная неустойчивость (категория A);

2) умеренная неустойчивость (категория B);

3) слабая неустойчивость (категория C);

б) нейтральное (категория D);

в) устойчивое:

1) слабая устойчивость (категория E);

2) умеренная устойчивость (категория F);

3) сильная устойчивость (категория G).

Г.2.2 Метод Тернера для определения категории устойчивости атмосферы

Рекомендуется определение категории устойчивости при наличии только измерений на наземной метеорологической станции проводить по методу Тернера с поправкой ИЭМ (Т-ИЭМ) [18,38]. При этом используются следующие данные:

– ψ, λ - широта и долгота места наблюдения, град.;

- dd, mm, jj - число, месяц, год наблюдения, соответственно;
- $U_Ф$ - скорость ветра на высоте флюгера (10±2) м, м/с;
- N_O, N_H - общая и нижняя облачность, соответственно, по 10-балльной шкале;
- наличие сильного тумана (видимость менее 1 км) и полного снежного покрова.

Термические факторы при выборе категорий устойчивости учитываются по высоте Солнца с поправкой на облачность и на состояние подстилающей поверхности, а динамические факторы - по скорости ветра на флюгере.

Г.2.2.1 Способ определения категории устойчивости

В месте расположения метеорологической станции определяется высота Солнца φ_{sun} и время его захода t_{set} по алгоритму данному ниже в Г.2.2.2. Обращаем внимание на то, что текущее время t, время захода t_{set} и время восхода t_{rise} Солнца должны быть в одной системе отсчета (или среднее местное время, или среднее Гринвичское время и т.д.). Значение индекса инсоляции n_i определяется по высоте Солнца или по времени после его захода согласно таблице Г.1.

Таблица Г.1 – Значение индекса инсоляции n_i для дня и ночи

Высота Солнца φ_{sun}, град	Дневной n_i	Время после захода Солнца, $(t-t_{set})$, ч	Ночной n_i
от 0 до 15	1	от 0 до 2	-1
от 15 до 30	2	от 2 до 7	-2
от 30 до 45	3	более 7	-3
от 45 до 60	4		
более 60	5		
Примечание - В течение 1 ч до захода и после восхода Солнца n_i=-1, но если выполняется условие $(1-r)\cdot(990\cdot\sin\varphi_{sun}-30)$ $(1-0{,}75\cdot N^{3.4})>110-60\cdot N$, то n_i=0, где $N=0{,}1\cdot N_0$, r – альбедо подстилающей поверхности, оцениваемое по таблице Г.9.			

Согласно таблице Г.2 определяется шифр поправки для индекса инсоляции на облачность, изменяющийся от I до V. Кроме того, при сплошном тумане (видимость менее 1 км) этому шифру присваивается значение VI, а при наличии сплошного снежного покрова - шифр VII.

В индекс инсоляции n_i вводится поправка на облачность и видимость (наличие тумана) с помощью таблицы Г.3, в результате чего получается индекс инсоляции n_i' с подправкой на облачность и видимость

После поправки на облачность и видимость при наличии сплошного снежного покрова (шифр поправки VII) индекс инсоляции n_i' еще раз поправляется по таблице Г.4.

Далее по скорости на флюгере $U_Ф$ и исправленному индексу инсоляции n_i' с помощью таблицы Г.5 определяется категория устойчивости.

Таблица Г2 – Шифр поправки для индекса инсоляции с учетом общей N_0 и нижней N_H облачности,

Нижняя облачность N_H, балл	Шифр поправки для индекса инсоляции от общей облачности N_0, балл								
	0	1	2 и 3	4	5	6	7 и 8	9	10
0	I	I	I	I	I / II	I / II	I / II	I / II	III
1	-*	I	I	I	I / II	I / II	I / II	I / II	III
2 и 3	-	-	I	I	I / II	I / II	I / II	I / II	III
4	-	-	-	I	I / II	I / II	II	II / III	III
5	-	-	-	-	I / II	I / II	II	II / III	IV
6	-	-	-	-	-	II	II	IV	IV
7 и 8	-	-	-	-	-	-	IV	IV	IV
9	-	-	-	-	-	-	-	V	V
10	-	-	-	-	-	-	-	-	V

* Нереализуемые условия

Примечания

1 Числитель - дневные условия, знаменатель – ночные.

2 При сплошном тумане (видимость < 1 км) шифр поправки – VI.

3 При наличии снежного покрова шифр поправки – VII.

Таблица Г.3 – Индекс инсоляции n_i', исправленный на облачность и сплошной туман

Шифр поправки	Индекс инсоляции n_i', исправленный на облачность и сплошной туман от индекса инсоляции n_i							
	-3	-2	-1	1	2	3	4	5
I *	-3	-2	-1	1	2	3	4	5
II	-2	-1	-1	1	1	2	3	4
III	-1	-1	-1	0	1	2	3	4
IV	-1	-1	0	0	1	1	2	3
V **	0	0	0	0	1	1	1	2
VI ***	0	0	0	0	0	0	0	0

* Поправки на облачность нет

** Нижняя облачность от 9 до 10 баллов

*** Сплошной туман

Таблица Г.4 – Значение исправленного индекса инсоляции n_i' при наличие сплошного снежного покрова

Шифр поправки	Значение индекса инсоляции n_i' при наличии сплошного снежного покрова от исправленного индекса инсоляции								
	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
VII	-3	-3	-2	-1	0	1	2	3	3

Таблица Г.5 - Определение категории устойчивости по значению исправленного индекса инсоляции n_I' и скорости ветра на флюгере

Скорость ветра на флюгере $U_ф$, м/с	Категории устойчивости от исправленного индекса инсоляции n_I'								
	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
от 0 до 1	G	F	F	D	C	B	A	A	A
свыше 1 до 2	G	F	E	D	C	B	B	A	A
свыше 2 до 3	F	F	E	D	D	C	B	B	A
свыше 3 до 4	F	E	D	D	D	C	B	B	A
свыше 4 до 5	E	E	D	D	D	C	C	B	B
свыше 5 до 6	E	D	D	D	D	C	C	C	B
свыше 6 до 7	D	D	D	D	D	D	C	C	C
более 8	D	D	D	D	D	D	D	D	D

Г.2.2.2 Алгоритм расчета высоты подъема Солнца и времени его восхода и захода

Высота подъема Солнца φ_{sun} определяется по соотношению

$$\sin\varphi_{sun} = \sin\delta\cdot\sin\psi + \cos\delta\cdot\cos\psi\cdot\cos\alpha_h, \quad (Г.1)$$

где δ - солнечное склонение, рад., определяемое по формуле

$$\delta = \arcsin(0{,}398\cdot\sin S_L); \quad (Г.2)$$

S_L - долгота Солнца, рад., определяемая по формуле

$$S_L = 4{,}909 + 1{,}705\cdot10^{-2}\cdot d; \quad (Г.3)$$

d - порядковый день года, считая с 1 января, вычисляется по входным параметрам dd, mm, jj, причем jj нужен только для учета високосности года, однако d можно определить и приближенно как

$$d = 30\cdot(mm-1) + dd; \quad (Г.4)$$

α_h - часовой угол, вычисляемый по формуле, рад.,

$$\alpha_h = \pi\cdot\left(\frac{t_{loc}}{12} - 1\right); \quad (Г.5)$$

t_{loc} - среднее местное время (полдень в среднее местное время совпадает с верхней кульминацией Солнца в месте наблюдения), ч.

Часовой угол α_h при высоте Солнца φ_{sun} отрицателен до полудня и положителен после полудня.

Среднее местное время t_{loc} при высоте Солнца φ_{sun} согласно формулам (Г.1) и (Г.5) определяется как

$$t_{loc} = 12 \cdot \left(1 + \frac{1}{\pi} \cdot \alpha_h\right), \qquad (Г.6)$$

где $$\alpha_h = \mu \arccos\left(\frac{\sin\varphi_{sun} - \sin\delta \cdot \sin\psi}{\cos\delta \cdot \cos\psi}\right), \qquad (Г.7)$$

причем знак «минус» соответствует времени достижения высоты подъема Солнца φ_{sun} до полудня, а «плюс» после полудня. Формула (Г.7) применима для $\psi \in [-\pi/2 + 0{,}01, \pi/2 - 0{,}01]$, а на полюсах Земли, где $\cos\psi = 0$, не применима.

Среднее местное время связано со средним Гринвичским временем $t_{СГВ}$ (это время представления данных метеорологических наблюдений в международном стандарте) соотношением:

$$t_{СГВ} = t_{loc} - \frac{\lambda}{15}. \qquad (Г.8)$$

Точность вычисления высоты подъема солнца φ_{sun} по приведенным формулам составляет 0,05 рад.

Время захода Солнца по среднему местному времени $t_{loc,set}$, ч, вычисляется при высоте центра Солнца приблизительно равном минус 50 мин. (учтены размер Солнца и рефракция) по формуле (Г.6), исключая условия полярного дня и полярной ночи, при которых $\cos\alpha_h$, вычисленный по формуле (Г.7), становится меньше минус 1 (полярный день) или больше плюс 1 (полярная ночь). В этом случае время захода Солнца равно 24 часам для полярного дня и 12 часов для полярной ночи.

Время восхода Солнца по среднему местному времени $t_{loc,rise}$, ч, определяется по соотношению

$$t_{loc,rise} = 24 - t_{loc,set}. \qquad (Г.9)$$

Для перехода от времени восхода и захода Солнца по среднему местному времени к Гринвичскому времени надо воспользоваться формулой (Г.8).

Г.3 Определение параметров ПрСА и ПСА

Расчеты параметров ПСА (высоты ПСА H, профилей модуля скорости ветра U(z) и его направления φ(z), температуры T(z), параметра устойчивости Монина-Казанского μ_0), а также параметров ПрСА (динамической скорости u_*, масштаба длины Монина-Обухова L) осуществляются на основе параметризации ПСА. По приземным измерениям на метеологических станциях параметризация ПСА основывается на задании вертикальных профилей метеовеличин, характеризующих ПСА, в виде интерполяционных формул, основанных на эмпирических знаниях, а также теории подобия Монина-Обухова в ПрСА и на упрощенной оценке приземного энергетического баланса. Для проведения расчетов

указанных параметров ПСА необходимо определить параметр шероховатости подстилающей поверхности z_0.

Г.3.1 Расчет поля мезомасштабного коэффициента шероховатости в районе ПОО

Неоднородность подстилающей поверхности при моделировании динамических параметров ПСА учитывается параметрически с помощью коэффициента шероховатости z_0. Для определения мезо-масштабных коэффициентов шероховатости района ПОО разработан [18,39,40] простой метод извлечения информации о неоднородности подстилающей поверхности из топографических карт. Район ПОО радиусом 100 км разделяется на квадраты со стороной 5 км. В каждом квадрате по топографической карте (в масштабе не менее 1:1000000) в соответствии с классификацией Давенпорта, приведенной в таблице Г.6, выделяются однородные участки по шести типам подстилающей поверхности. Каждому типу поверхности соответствует характерный коэффициент сопротивления C_D и параметр шероховатости z_0. Для каждого квадрата рассчитывается средневзвешенный коэффициент сопротивления C_D как сумма коэффициентов сопротивления однородных поверхностей с весами пропорциональными площади каждого типа однородной поверхности в квадрате. Площади однородных поверхностей в квадратах вычисляются в долях от общей площади квадрата, причем за одну долю принимается площадь, равная 200×200 м^2.

Таблица Г.6 – Характерные значения коэффициентов сопротивления C_D на высоте 10 м и параметров шероховатости z_0 в зависимости от типа однородных поверхностей и времени года

Тип поверхности	C_D		z_0, м	
	лето	зима	лето	зима
Водная поверхность	0,003	0,003	0,01	0,01
Открытое поле	0,01	0,005	0,17	0,04
Лес	0,025	0,025	0,75	0,75
Сельская застройка	0,015	0,015	0,40	0,40
Городская территория	0,032	0,032	1,00	1,00
Центр крупного города	0,11	0,11	3,00	3,00

Среднее значение параметра шероховатости z_0 для лета и зимы в пределах рассматриваемого квадрата находится как

$$z_0 = z_\phi \cdot \exp(-\kappa / \sqrt{C_D}) \qquad (Г.10)$$

При получении карты $z_0(x,y)$ для удобства использования можно вводить градации величин z_0 по таблице Г.7.

Таблица Г.7

Градации величины параметра шероховатости z_0, м	Среднее z_0 по градации, м
менее 0,05	0,01
от 0,05 до 0,25	0,1
свыше 0,25 до 0,75	0,5
свыше 0,75 до 1,5	1
свыше 1,5 до 3	2
свыше 3	3

Г.3.2 Расчет параметров ПрСА

Г.3.2.1 Расчет турбулентного потока тепла

Параметризация турбулентного потока тепла Q_H при неустойчивых условиях [13,41] проводится по следующиму алгоритму:

а) для категорий А, В и С (неустойчивые условия):

$$Q_H = \begin{cases} a_Q \cdot (K^* - b_Q), & \text{при } Q_H \geq 0 \\ 0, & \text{при } Q_H < 0, \end{cases} \qquad (Г.11)$$

где $$a_Q = \frac{1+s\cdot(1-\alpha_s)}{1+s}\cdot\frac{1-C_g}{1+C_H}; \qquad (Г.12)$$

$$b_Q = -L^* + \frac{\alpha_s}{a_Q}\cdot\beta'; \qquad (Г.13)$$

$$K^* = \begin{cases} (1-r)\cdot[a_1\sin\varphi_{sun}(t)+a_2]\cdot(1-b_1\cdot N^{b_2}), & \text{при } \varphi_{sun} > 1{,}7^\circ \\ 0, & \text{при } \varphi_{sun} \leq 1{,}7^\circ; \end{cases} \qquad (Г.14)$$

$$L^* = -\sigma\cdot T^4\cdot(1-c_1\cdot T^2)+c_2\cdot N; \qquad (Г.15)$$

$$s = \frac{q_s(T)}{R_n\cdot c_p'}\cdot\left(\frac{L_v}{T}\right)^2, \quad q_s(T) = q_s(T_0)\cdot 10^{\frac{8{,}615(T-T_0)}{T}}, \quad L_v = L_v(T_0)-\lambda_v(T-T_0); \qquad (Г.16)$$

$$C_H = \frac{4\sigma\cdot T^3\cdot R'}{\rho\cdot c_p}\cdot(1-C_g)\cdot\frac{1+s\cdot(1-\alpha_s)}{1+s}, \quad C_g = \begin{cases} 0{,}1 & \text{- сельхозугодья} \\ 0{,}3 & \text{- городские условия} \\ 0{,}0 & \text{- снежный покров;} \end{cases} \qquad (Г.17)$$

α_s - значения параметра [42] приведены в таблице Г.8 (в случае отсутствия данных о синоптических кодах состояния погоды W_w, W_1, W_2 параметр α_s принимается равным 0,5);

r - альбедо подстилающей поверхности берется в районе ПОО (в случае его отсутствия оценивается по таблице Г.9 [43]);

$\varphi_{sun}(t)$ - высота Солнца вычисляется по формулам (Г.1) - (Г.6);

$N=0,1 \cdot N_0$;

T – приземная температура воздуха на высоте (2±0,1) м, °K;

$T_0=273,15°K$.

Значения остальных параметров, входящих в (Г.11) - (Г.17), и их размерности даны в таблице Г.10.

Параметризационная формула (Г.11) для турбулентного потока тепла Q_H содержит коэффициенты, в принципе нуждающиеся в индивидуальном подборе для каждой местности в зависимости от состояния атмосферы (ее прозрачности), увлажненности поверхности и т.д. Формула (Г.11) пригодна для разных условий со стандартной ошибкой от 20 до 55 Вт/м^2 [13]. После анализа формулы (Г.11) было установлено, что, например, для условий Англии можно считать в среднем $a_Q=0,4$, $b_Q=100$.

Таблица Г.8 – Значения параметра α_s в зависимости от состояния погоды

Пункт	Синоптические коды состояния погоды	Значения параметра α_s
1	$49 < W_W < 100$	1
2	$19 < W_W < 30$	0,9
3	$4 < W_2 < 10$ и пункты 1 и 2 не выполняются	0,8
4	$4 < W_1 < 10$ и пункты 1 – 3 не выполняются	0,7
5	rr > 5 и пункты 1 – 4 не выполняются	0,6
6	если пункты 1 – 5 не выполняются	0,5
Примечания 1 rr - количество осадков за последние 12 ч, мм; 2 W_W, W_1, W_2 - синоптический код для настоящей погоды, для предшествующей 1 ч и для предшествующих 3 ч, соответственно.		

Таблица Г.9 – Средние зональные значения альбедо суши (с учетом внутренних водоемов) в зависимости от сезона

Широтная зона, град. с.ш.	Средние зональные значения альбедо в зависимости от сезона			
	Весна	Лето	Осень	Зима
от 90 до 70	0,80	0,80	0,80	0,80
от 70 до 60	0,70	0,26	0,24	0,70
от 60 до 50	0,57	0,18	0,18	0,60
от 50 до 40	0,42	0,20	0,20	0,49
от 40 до 30	0,28	0,22	0,22	0,34
от 30 до 20	0,26	0,24	0,24	0,26
от 20 до 10	0,24	0,22	0,22	0,24
от 10 до 00	0,21	0,19	0,18	0,21

Таблица Г.10 - Значения параметров, используемых при параметризации Q_H для неустойчивых условий, и их размерности

Параметр	Значение	Размерность	Параметр	Значение	Размерность
a_1	990	Вт/м^2	T_0	273,15	K
a_2	-30	Вт/м^2	R_n	0,11	кал/г·K
b_1	0,75	безразмерный	c_p	1,0	Дж/г·K
b_2	3,4	безразмерный	c'_p	0,24	кал/г·K
c_1	$9{,}35\cdot10^{-6}$	K^{-2}	ρ	$1{,}29\cdot10^{3}$	г/м^3
c_2	60	Вт/м^2	$q_s(T_0)$	$3{,}75\cdot10^{-3}$	г/г
σ	$5{,}67\cdot10^{-8}$	Вт/м^2·K^4	$L_v(T_0)$	597,26	кал/г
β'	20	Вт/м^2	λ_v	0,647	кал/г·K
R'	80	с/м	K^*, L^*, Q_H	вычислены	Вт/м^2
Примечание - 1 Вт=1 Дж/с, 1 кал=4,1868 Дж					

б) для категории D (нейтральные условия):

параметризация Q_H осуществляется также как в неустойчивых условиях по формулам (Г.11) - (Г.17). Далее категория D разделяется на две части D^+ и D^-, где D^+ соответствует категории D при $Q_H>0$, D^- - при $Q_H\le0$. Согласно (Г.11) в D^- в первом приближении полагаем $Q_H=0$, которое затем корректируется путем пересчета по алгоритму для устойчивых условий.

в) для категорий E, F, G (устойчивые условия) и D^- :

расчет Q_H проводится с использованием параметризации Θ_* и u_* по формуле:

$$Q_H = -\rho \cdot c_p \cdot u_* \cdot \Theta_*, \qquad (Г.18)$$

где параметры Θ_* и u_* опредеяются по формулам (Г.24), (Г.25).

Г.3.2.2 Расчет динамической скорости u_*

Динамическая скорость u_* вычисляется согласно [13] по следующему алгоритму:

а) для категорий A, B, C (неустойчивые условия) и D^+ :

$$u_*(Q_H, U_\phi, z_0) = \frac{\kappa \cdot \tilde{U}_\phi}{\ln(z_\phi / z_0)} \cdot \left[1 + d_1 \ln\left(1 + \frac{d_2 d_3}{\tilde{U}_\phi^3}\right)\right], \qquad (Г.19)$$

где

$$d_1 = \begin{cases} 0{,}128 - 0{,}005 \cdot \ln(z_\phi / z_0), & \text{при } \dfrac{z_\phi}{z_0} > 100 \\ 0{,}107, & \text{при } \dfrac{z_\phi}{z_0} \le 100; \end{cases} \qquad (Г.20)$$

$$d_2 = 1{,}95 + 32{,}6 \cdot \left(\frac{z_\phi}{z_0}\right)^{-0{,}45}; \qquad (Г.21)$$

$$d_3 = \frac{Q_H}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{g \cdot z_\phi}{T \cdot \kappa^2} \cdot \ln^3 \frac{z_\phi}{z_0}; \qquad (Г.22)$$

Q_H - вычисляется по (Г.11);.

$$\tilde{U}_\phi = \begin{cases} U_\phi + \exp\left[-0{,}5 \cdot U_\phi \cdot (2 + U_\phi)\right], & \text{при } U_\phi \le 5 \\ \sqrt{5 \cdot U_\phi}, & \text{при } U_\phi > 5, \end{cases} \qquad (Г.23)$$

б) для категорий D, E, F и G (устойчивые условия):

$$u_*(\Theta_*, U_\phi, z_0) = 0{,}5 \cdot \frac{\kappa \cdot \tilde{U}_\phi}{\ln(z_\phi / z_0)} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \Theta_* / \Theta_{*2}}\right), \qquad (Г.24)$$

где

$$\Theta_* = \min\left\{\Theta_{*1}, \frac{8}{9}\Theta_{*2}, \Theta_{*3}, \Theta_{*4}\right\}, \qquad (Г.25)$$

$$\Theta_{*1} = \Theta_{*1,0} \cdot \left(1 - 0{,}5 \cdot N^2\right), \qquad (Г.26)$$

$$\Theta_{*2} = \frac{T \cdot \kappa \cdot \tilde{U}_\phi^2}{4 \cdot \beta_u \cdot z_\phi \cdot g \cdot \ln(z_\phi / z_0)}, \qquad (Г.27)$$

$$\Theta_{*3} = \frac{\kappa \cdot T \cdot \tilde{U}_\phi^2}{L \cdot g \cdot \left(\ln(z_\phi / z_0) + \beta_u \cdot z_\phi / L\right)^2}, \qquad (Г.28)$$

$$\Theta_{*4} = -\frac{Q_{H.min}}{\rho \cdot c_p \cdot u_*}, \qquad (Г.29)$$

$N = 0{,}1 \cdot N_0$

$$L^{-1}(z_0, p_T) = 0{,}01 \cdot (p_T - 3{,}5)^{r_4} \cdot \exp\left(r_1 \cdot (7 - p_T)^2 - r_2 \cdot (7 - p_T) + r_3\right), \qquad (Г.30)$$

$$r_i = r_{i3} \lg^2 z_0 + r_{i4} \lg z_0 + r_{i5} + \eta \cdot \lg^2(10 \cdot z_0)\left(r_{i1} \lg \frac{z_0}{100} + r_{i2} - r_{i3}\right), \quad i = 1,2,3,4 \qquad (Г.31)$$

$$\eta = 0{,}5 \cdot (1 - \mathrm{sign}(\lg(10 \cdot z_0)));$$

r_{ij} – коэффициенты, значения которых даны в таблице Г.11;

p_T - параметр устойчивости, определенный по методу Тернера;

$\tilde{U}_\phi$ - вычисляется по формуле (Г.23), вводящую поправку на слабый и сильный ветер;

$\beta_u = 4{,}7$ - параметр универсальной функции Бюзингера для скорости ветра;

$\Theta_{*1,0}$ – максимальное значение Θ_*, наблюдаемое в месте расположения ПОО, (рекомендуемое значение 0,09);

$\Theta_{H,min}$ - минимальное климатическое значение турбулентного потока тепла для места расположения ПОО. Рекомендуется выбирать $\Theta_{H,min}$ не менее минус 60 Вт/м^2, что позволяет переписать (Г.29) в виде

$$\Theta_{*4} = \frac{0{,}05}{u_*}. \qquad (Г.32)$$

Таблица Г.11 - Значения коэффициентов r_{ij} для расчета r_i по формуле (Г.31)

i	Значения коэффициентов r_{ij} для j равного				
	1	2	3	4	5
1	$-4{,}741\cdot10^{-2}$	$-2{,}917\cdot10^{-1}$	$4{,}161\cdot10^{-2}$	$2{,}266\cdot10^{-2}$	$1{,}462\cdot10^{-1}$
2	$-5{,}961\cdot10^{-2}$	$-3{,}798\cdot10^{-1}$	$1{,}547\cdot10^{-1}$	$3{,}298\cdot10^{-1}$	1,141
3	$-1{,}069\cdot10^{-2}$	$-1{,}126\cdot10^{-1}$	$1{,}57\cdot10^{-1}$	$-2{,}98\cdot10^{-1}$	$4{,}864\cdot10^{-1}$
4	0	0,006	0,006	0,048	1,096

Заметим, что реализация выбора минимального значения по формуле (Г.25) среди величин Θ_{*1}, $8\cdot\Theta_{*2}/9$, Θ_{*3}, Θ_{*4} осуществляется в два шага. Первоначально определяется минимальное значение $\Theta_*^{(1)}$ среди величин Θ_{*1}, $8\cdot\Theta_{*1}/9$, Θ_{*3}, которое используются для предварительного расчета u_* по формуле (Г.24). Затем, используя полученое u_*, по формуле (Г.29) пересчитывается Θ_{*4}. На втором шаге, согласно формуле (Г.25), определяется Θ_*, как минимальное значение между $\Theta_*^{(1)}$, полученным на первом шаге, и пересчитанным Θ_{*4}. Затем с полученным значением Θ_* пересчитывается u_* по формуле (Г.24) и определяется $L^{-1} = (\kappa\cdot g\cdot\Theta_*)\,(T\cdot u_*^2)$.

Г.3.2.3 Расчет параметра устойчивости Монина-Казанского μ_0

Параметр устойчивости Монина-Казанского μ_0 определяется по соотношениям теории подобия приземного слоя [18,19], используя значения u_* и Q_H или Θ_*:

а) для категорий A, B, C и D^+ :

$$\mu_0 = -\frac{g \cdot \kappa^2 \cdot Q_H}{T \cdot |f| \cdot \rho \cdot c_p \cdot u_*^2}, \qquad (Г.33)$$

где Q_H - определяется по формуле (Г.11);

u_* - определяется по формуле (Г.19);

б) для категорий E, F, G и D^- :

$$\mu_0 = \frac{g \cdot \kappa^2}{T \cdot |f|} \cdot \frac{\Theta_*}{u_*}, \qquad (Г.34)$$

где Θ_* - определяется по формуле (Г.25);

u_* - определяется по формуле (Г.24).

Г.3.2.4 Связь категорий устойчивости, определенных по методам Паскуилла и Тернера, и параметров устойчивости атмосферы

Категории устойчивости атмосферы, определенные в разделе Г.2 дискретным образом по методу Тернера, могут быть, используя полученные в Г.3, значения L^{-1} и μ_0, переведены в непрерывный аналог параметра устойчивости $p_T \in [0,7]$ и связаны с непрерывным аналогом $p_п \in [0,6]$, соответствующим определению категорий устойчивости по методу Паскуилла. Эти связи определяются аппроксимационными формулами [44], полученными с использованием номограмм Таглиацукки [45]:

а) неустойчивые и нейтральные условия ($L^{-1} \le 0$):

$$p_T(z_0, \mu_0) = 3{,}5 - \left(0{,}01 \cdot |\mu_0|\right)^{r_4} \cdot \exp\left(r_1 \cdot \left(0{,}1 \cdot |\mu_0|\right)^2 + r_2 \cdot \left(0{,}01 \cdot |\mu_0|\right) + r_3\right), \qquad (Г.35)$$

$$p_п = p_T, \qquad (7.36)$$

где

$$r_i = \left(r_{i1} \lg z_0 + r_{i2}\right) \cdot \exp\left(r_{i3} \lg^2 z_0 + r_{i4} \lg z_0\right), \quad i = 1,2,3,4. \qquad (Г.37)$$

Значения коэффициентов $r_{i,j}$ (для $i = 1,4,\ j = 1,4$) приведены в таблице Г.12.

В неустойчивых условиях имеем $0 \le p_T \le 3{,}5$ и $0 \le p_п \le 3{,}5$.

Таблица Г.12 - Значения коэффициентов r_{ij} для расчета r_i по формуле (Г.37)

i	Значения коэффициентов r_{ij} для j равного			
	1	2	3	4
1	$5{,}176\cdot10^{-1}$	$5{,}482\cdot10^{-1}$	$5{,}768\cdot10^{-2}$	$6{,}395\cdot10^{-1}$
2	$-4{,}426\cdot10^{-1}$	$-7{,}123\cdot10^{-1}$	$-4{,}002\cdot10^{-2}$	$-2{,}189\cdot10^{-2}$
3	$2{,}52\cdot10^{-1}$	1,482	$-1{,}147\cdot10^{-1}$	$-1{,}535\cdot10^{-1}$
4	$1{,}021\cdot10^{-1}$	$5{,}943\cdot10^{-1}$	$-5{,}122\cdot10^{-2}$	$-6{,}615\cdot10^{-1}$

б) устойчивые условия ($L^{-1} > 0$):

$$p_т\left(z_0, L^{-1}\right) = 3{,}5 + \left(100\cdot L^{-1}\right)^{r_4}\cdot\exp\left(r_1\cdot\sqrt[4]{100\cdot L^{-1}} + r_2\cdot\sqrt[8]{100\cdot L^{-1}} + r_3\right), \qquad (Г.38)$$

$$p_п = 3{,}5 + 0{,}1\cdot\left(p_т - 3{,}5\right)^{5/4}\cdot\left(\frac{3{,}564}{p_т - 3{,}5 + 0{,}681} + 1{,}748 + 0{,}749\cdot\left(p_т - 3{,}5\right)\right), \qquad (7.39)$$

где

$$r_i = r_{i3}\lg^2 z_0 + r_{i4}\lg z_0 + r_{i5} + k_r\lg^2(10\cdot z_0)\cdot\left(r_{i1}\lg(0{,}01\cdot z_0) + r_{i2} - r_{i3}\right), \quad i = 1,2,3,4; \qquad (Г.40)$$
$$k_r = 0{,}5\cdot\left[1 - \mathrm{sign}(\lg(10\cdot z_0))\right].$$

Значения коэффициентов $r_{i,j}$ (для $i = 1,4$, $j = 1,5$) приведены в таблице Г.13.

В устойчивых условиях имеем $3{,}5 < p_т \le 7$ и $3{,}5 < p_п \le 6$.

Таблица Г.13 - Значения коэффициентов r_{ij} для расчета r_i по формуле (Г.40)

i	Значения коэффициентов r_{ij} для j равного				
	1	2	3	4	5
1	-5,2355	-31,3999	2,476	$-9{,}322\cdot10^{-1}$	9,1862
2	26,3596	160,2355	-13,256	9,6394	-46,5402
3	-21,1155	-128,7881	10,6413	-8,4375	38,1055
4	-2,0476	-12,6051	1,1274	-1,1767	3,8956

Г.3.3 Расчет высоты ПСА

Особенности расчета высоты ПСА обусловлены степенью устойчивости ПСА. При нейтральных и устойчивых условиях имеет место равновесный квазистационарный турбулентный режим в атмосфере, что позволяет рассчитывать высоту ПСА по диагностическому уравнению [46]. При неустойчивых атмосферных условиях имеет место

существенно нестационарный режим турбулентности. Развитие высоты неустойчивого ПСА описывается прогностическим уравнением [47-49], решение которого получено в предположении о синусоидальном изменении в течение дня турбулентного потока тепла $Q_H(t)$

$$Q_H(t) = Q_H\left(\frac{\hat{t}_1 + \hat{t}_2}{2}\right) \cdot \sin\frac{\pi(t - \hat{t}_1)}{\hat{t}_2 - \hat{t}_1}, \qquad (Г.41)$$

где $[\hat{t}_1, \hat{t}_2]$ - интервал времени, на котором p_T<3.5, ч;

$t \in [\hat{t}_1, \hat{t}_2]$ - текущее время, ч;

$Q_H\left(\frac{\hat{t}_1 + \hat{t}_2}{2}\right)$ - турбулентный поток тепла в районе полудня, Вт/м^2.

Здесь $\hat{t}_1$ и $\hat{t}_2$ определяются по соотношениям:

$$\hat{t}_1 = \max(t_{morning}, t_{ob,1});$$
$$\hat{t}_2 = \min(t_{evening}, t_{ob,2}),$$

где $t_{morning}$, $t_{evening}$ - соответственно времена СГВ до и после полудня при высоте Солнца φ_{sun} равным 15 град. для суши и 21 град. для моря, алгоритм определения которых дан в Г.2.2.2;

$t_{ob,1}$, $t_{ob,2}$ – сроки наблюдения, окаймляющие последовательность сроков, в которые p_T<3.5.

Высота ПСА при различных условиях устойчивости вычисляется следующим образом:

а) неустойчивые условия (L^{-1}<0):

$$H = \sqrt{5 \cdot Q_H\left(\frac{\hat{t}_1 + \hat{t}_2}{2}\right) \cdot \frac{(\hat{t}_2 - \hat{t}_1)}{\gamma} \cdot \sin^2\frac{\pi(t - \hat{t}_1)}{2(\hat{t}_2 - \hat{t}_1)} + \left(\frac{\Lambda_0 u_*(\hat{t}_1)}{f}\right)^2}, \qquad (Г.42)$$

где $Q_H\left(\frac{\hat{t}_1 + \hat{t}_2}{2}\right) = Q_H(\hat{t}_{ob}) \sin\frac{\pi(\hat{t}_{ob} - \hat{t}_1)}{(\hat{t}_2 - \hat{t}_1)}$;

$\hat{t}_{ob}$ – время проведения метеонаблюдений ближайшее к полудню по местному времени, ч;

$$\Lambda_0 = 0{,}06 \cdot \left(\ln\frac{z_\phi}{z_0}\right)^{3/4} \cdot \left[\left(\frac{T}{T_0}\right)^{4/3} \cdot \frac{T_0 + 110{,}4}{T + 110{,}4}\right]^6; \qquad (Г.43)$$

f – параметр Кориолиса, c^{-1};

γ – температурный градиент выше ПСА (в случае отсутствия берется равным 0,0065 град/м);

$Q_H(\hat{t}_{ob})$ вычисляется по формуле (Г.11), Вт/м^2.

б) нейтральные условия (L^{-1}=0) [46,50]:

$$H = \frac{\Lambda_0 u_*}{|f|}, \qquad (Г.44)$$

где Λ_0 – определяется по формуле (Г.43);

в) устойчивые условия (L^{-1}>0) [46,50]:

$$H = \frac{\Lambda \cdot u_*}{|f|}, \qquad (Г.45)$$

где $$\Lambda^{-1} = \Lambda_0^{-1} + \psi(\mu_0)\frac{\sqrt{\mu_0}}{\kappa \cdot C_h}; \qquad (Г.46)$$

$$\psi(\mu_0) = \frac{2}{\pi}\mathrm{arctg}\left(a_1(z_0)\cdot \mu_0^{a_2(z_0)}\right); \qquad (Г.47)$$

$$a_1(z_0) = a_{11}\cdot \lg^3 z_0 + a_{12}\cdot \lg^2 z_0 + a_{13}\cdot \lg z_0 + a_{14}; \qquad (Г.48)$$

$$a_2(z_0) = a_{21}\cdot \lg^3 z_0 + a_{22}\cdot \lg^2 z_0 + a_{23}\cdot \lg z_0 + a_{24}; \qquad (Г.49)$$

a_{ij} – коэффициенты, значения которых для i=1,2, j=1,2,3,4 даны в таблице Г.14 для $z_0 \in [10^{-2},3]$, м;

C_h=0,85;

κ=0,4.

Таблица Г.14 - Значения коэффициентов a_{ij} для расчета $a_1(z_0)$ и $a_2(z_0)$ по формулам (Г.48) и (Г.49)

i	Значения коэффициентов a_{ij} для j равного			
	1	2	3	4
1	$1.15947\cdot10^{-2}$	$-3.31246\cdot10^{-2}$	-0,12	0.25523
2	$2.14698\cdot10^{-2}$	$8.45451\cdot10^{-2}$	0,036	0.20555

Г.3.4 Определение профиля скорости ветра

Г.3.4.1 Принципы восстановления вертикальных профилей скорости ветра

Вертикальные профили скорости ветра в точках сетки в момент времени t определяются с использованием данных метеонаблюдений в районе ПОО следующим образом:

а) в пунктах метеонаблюдений в срок наблюдений t_{ob} определяются:

1) дискретные от A до G категории устойчивости атмосферы по алгоритму, представленному в Г.2.2;

2) параметры ПрСА и ПСА (турбулентный поток тепла Q_H, масштаб температуры Θ_*, динамическая скорость u_*, масштаб длины Монина-Обухова L, параметр устойчивости Монина-Казанского μ_0 и высота ПСА H) по алгоритмам, представленным в Г.3.2 и Г.3.3;

3) непрерывный аналог дискретной категории устойчивости p_T по алгоритму, данному в Г.3.2.4;

4) модуль, направление и компоненты скорости ветра на реперной высоте z_1=200 м по алгоритмам, данным в Г.3.4.2, Г.3.4.3 и Г.3.4.4;

б) с пунктов метеонаблюдений в срок наблюдения t_{ob} проводится пространственная интерполяция в точки сетки параметра устойчивости атмосферы p_T, модуля U и нормированных компонент $\frac{u}{U}$ и $\frac{v}{U}$ скорости ветра на реперной высоте z_1=200м по алгоритму, данному в Г.3.4.5;

в) в точках сетки вычисляются вертикальные профили модуля скорости ветра по формуле (Г.50) и его направления по формуле (Г.53) с учетом значения параметра шероховатости z_0, скорости ветра на реперной высоте z_1=200 м и категории устойчивости атмосферы p_T;

г) при наличии метеонаблюдений для двух сроков по времени t_{ob1} и t_{ob2} для времени $t \in [t_{ob1}, t_{ob2}]$ проводится линейная интерполяция по времени скорости ветра (модуля и направления). Для времен t наступивших позже, чем последний из имеющихся сроков метеонаблюдений t_{ob2}, для которых проведено определение вертикальных профилей скорости ветра, принимается, что они не меняются в течение 3 часов на интервале времени $[t_{ob2}, t_{ob2}+3]$.

Г.3.4.2 Процедура восстановления профиля модуля скорости ветра

Для описания вертикального профиля модуля скорости ветра используется его аппроксимация по степенному закону в нижнем слое ПСА [51]

$$U(z,t) = \begin{cases} U(z_1,t)\cdot\left(\frac{z}{z_1}\right)^b, & \text{при } z \le 200\text{ м} \\ U(z_1,t)\cdot\left(\frac{200}{z_1}\right)^b, & \text{при } 200\text{ м} < z < H, \end{cases} \qquad (Г.50)$$

где z_1 - реперный уровень, в качестве которого используется $z_1=z_\Phi$;

b - безразмерный показатель степени, зависящий от категории устойчивости атмосферы $p_т$ и коэффициента шероховатости z_0.

Значение параметра b может быть взято из таблицы Г.15 [51], или вычислено при 0,01м≤z_0≤3м по формуле

$$b = \begin{cases} 0{,}27 d_1 \cdot (0{,}1)^{d_2} & \text{при } z_0 < 0{,}1 \text{ и } p_т \geq 4 \\ 0{,}27 d_1 \cdot (z_0)^{d_2} & \text{при } p_т < 4, \text{ или } z_0 \geq 0{,}1 \text{ и } p_т \geq 4; \end{cases} \qquad (Г.51)$$

где $d_1 = 0{,}116 \cdot \left[0{,}735 \cdot (p_т - 3{,}5)^2 + 0{,}442 \cdot (p_т - 3{,}5) \cdot |p_т - 3{,}5| + 1{,}05 \cdot (p_т - 3{,}5) - |p_т - 3{,}5| \right] + 1,$

$d_2 = 8{,}34 \cdot 10^{-3} \cdot \left[0{,}135 \cdot (p_т - 3{,}5)^2 + 1{,}49 \cdot (p_т - 3{,}5) \cdot |p_т - 3{,}5| - 10{,}5 \cdot (p_т - 3{,}5) - |p_т - 3{,}5| + 27{,}2 \right].$

Таблица Г.15 - Типичные значения скорости ветра на высоте флюгера и показателя степени b, как функции категории устойчивости и параметра шероховатости z_0

Категория устойчивости по Тернеру $p_т$		Скорость ветра на уровне флюгера, м/с		Значение показателя степени b от параметра шероховатости z_0			
Обозначение	Значение $p_т$	Средняя	Предел изменения	0,01 м	0,1 м	1,0 м	3,0 м
A	0,5	1	Менее 3	0,05	0,08	0,17	0,27
B	1,5	2	От 1 до 5	0,06	0,09	0,17	0,28
C	2,5	3	От 1 до 7	0,06	0,11	0,20	0,31
D	3,5	5	Любые	0,12	0,16	0,27	0,37
E	4,5	3	От 2 до 6	0,22	0,22	0,31	0,40
F	5,5	2	Менее 4	0,34	0,34	0,42	0,46
G	6,5	1	Менее 3	0,52	0,52	0,60	0,64

Г.3.4.3 Процедура вычисления направления ветра в ПСА

Метеорологическое направление ветра Fi, град, получаемое путем измерений на метеорологических станциях, переводится в направление ветра φ, связанное со стандартной системой координат x, y, в которой направление ветра отсчитывается от оси x против часовой стрелки, соотношением

$$\varphi = 270^0 - Fi\,. \qquad (Г.52)$$

При наличии измерений направления ветра только на флюгере или реперной высоте в пределах ПСА для вычисления направления ветра на высоте z используются модельная оценка значения угла полного поворота ветра в ПСА Δφ и предположение о правом повороте ветра с высотой в ПСА в северном полушарии и левым – в южном. Тогда согласно экстраполяционной формуле [42] имеем

$$\varphi(z,t)=\begin{cases}\varphi(z_1,t)+\left(f(z)-f(z_1)\right)\cdot\Delta\varphi, & \text{при } z_\phi \le z \le H\\ \varphi(z_\phi,t), & \text{при } z_0 \le z < z_\phi,\end{cases} \qquad (Г.53)$$

где $\varphi(z_1,t)$ - направление ветра в ПСА на реперной высоте z_1, в качестве которой используется или уровень флюгера $z_1=z_\phi$, или $z_1=200$ м;

$$f(z)=\begin{cases}1{,}21\cdot\left[1-e^{\frac{1{,}75(z-z_\phi)}{H-z_\phi}}\right] & \text{при } z_\phi \le z \le H\\ 0 & \text{при } z < z_\phi;\end{cases} \qquad (Г.54)$$

$\Delta\varphi=\varphi(H,t)-\varphi(z_\phi,t)$ - полный поворот ветра в ПСА;

H - высота ПСА, способ определения которой дан в Г.3.3.

Полный поворот ветра в ПСА представляется в виде аппроксимационной формулы:

$$\Delta\varphi=-\left(\frac{T_0}{T}\right)^{3/2}\frac{T+110{,}4}{T_0+110{,}4}\left[\frac{g_1\cdot p_\tau^2+g_2\cdot p_\tau+g_3}{\ln\dfrac{U(H,t)}{|f|\cdot z_0}}+\overset{)}{g}_1\cdot p_\tau^2+\overset{)}{g}_2\cdot p_\tau+\overset{)}{g}_3\right]\cdot\operatorname{sign}(f), \qquad (Г.55)$$

где T_0=273,15°K;

T – температура на высоте (2±0,1), K;

U(H,t) – скорость ветра на высоте ПСА;

g_i, $\overset{)}{g}_i$ - аппроксимационные коэффициенты, приведенные в таблице Г.16.

Таблица Г.16 – Значения коэффициентов для расчета полного поворота ветра в ПСА

Коэффициент	Значения коэффициентов g_i, $\overset{)}{g}_i$ для i равного		
	1	2	3
g_i	-18,74	166,22	-39,82
$\overset{)}{g}_i$	0,77	-3,63	0,49

Г.3.4.4 Вычисление компонент скорости ветра

Компоненты скорости ветра определяются по значению модуля скорости U и направления φ ветра согласно формуле

$$\begin{aligned}u(z,t)&=U(z,t)\cdot\cos\varphi(z,t),\\ v(z,t)&=U(z,t)\cdot\sin\varphi(z,t).\end{aligned} \qquad (Г.56)$$

Г.3.4.5 Процедура горизонтальной интерполяции по пространству

Значение функции $F(x,y)$ в точке (x,y) определяется интерполяцией известных значений $F(x_j,y_j)$ из точек (x_j,y_j) путем использовании весовых функций G_j. Расчет значений $F(x,y)$ осуществляется по формуле:

$$F(x,y)=\frac{\sum_{j=1}^{J}F(x_j,y_j)\cdot G_j}{\sum_{j=1}^{J}G_j}, \qquad (Г.57)$$

где $G_j=(R_j+R')^{-2}$; (Г.58)

J - число точек с заданными значениями функций $F(x_j,y_j)$;

$$R_j=\sqrt{(x_j-x)^2+(y_j-y)^2};$$

$$R'=\begin{cases}10^3\text{м}, & \text{для функций T, U, } \frac{u}{U},\ \frac{v}{U},\ (\gamma_l\cdot I)\\ 5\cdot10^4\text{м}, & \text{для функций H, } p_T.\end{cases}$$

При интерполяции $\left(\frac{u}{U}\right)=\cos\varphi$ и $\left(\frac{v}{U}\right)=\sin\varphi$, полученные по формуле (Г.57) значения рассматриваются как промежуточные $\left(\frac{u}{U}\right)_{пр}$ и $\left(\frac{v}{U}\right)_{пр}$, которые необходимо нормировать, после чего имеем

$$\frac{u}{U}=\frac{\left(u/U\right)_{пр}}{\sqrt{\left(u/U\right)^2_{пр}+\left(v/U\right)^2_{пр}}}, \qquad \frac{v}{U}=\frac{\left(v/U\right)_{пр}}{\sqrt{\left(u/U\right)^2_{пр}+\left(v/U\right)^2_{пр}}}. \qquad (Г.59)$$

Если $U(x_j,y_j)=0$, т.е. при u=0 и v=0 значения величин $\left(\frac{u}{U}\right)$ и $\left(\frac{v}{U}\right)$ в точке (x_j,y_j) неопределенны, то поступаем следующим образом:

- при наличии данных о направлении ветра в других пунктах метеонаблюдений рассматриваемого региона за данный срок метеонаблюдения исключаем точку (x_j,y_j) из интерполяции;

- при отсутствии данных о направлении ветра в других пунктах метеонаблюдений рассматриваемого региона за данный срок метеонаблюдения полагаем для определенности $\left(\frac{u}{U}\right)=1$ и $\left(\frac{v}{U}\right)=0$.

Г.3.5 Определение профиля температуры воздуха

Вертикальный профиль температуры $T(x_i,y_i,z)$ в пунктах метеонаблюдений определяется по линейному профилю

$$T(x_i,y_i,z)=\begin{cases} T_0(x_i,y_i,z_1)+\dfrac{\partial T}{\partial z}\dfrac{(z-z_1)}{100}, & \text{при } z\le H \\ T_0(x_i,y_i,z_1)+\dfrac{\partial T}{\partial z}\dfrac{(H-z_1)}{100}-0{,}65\cdot\dfrac{(z-H)}{100}, & \text{при } z>H, \end{cases} \qquad (Г.60)$$

где $T_0(x_i,y_i,z_1)$ - температура в пунктах наблюдения на высоте $z_1=(2\pm0{,}1)$ м, К;

$\dfrac{\partial T}{\partial z}$ - температурный градиент, приведенный к 100 м, К/100 м.

Температурный градиент в ПСА определяется по категории устойчивости и скорости ветра на флюгере согласно [52] по таблице Г.17, а выше ПСА полагается равным 0,65 К/100 м.

Таблица Г.17 - Средний вертикальный температурный градиент $\dfrac{\partial T}{\partial z}$, К/100 м

Скорость ветра $U_ф$,м/с	Средний вертикальный температурный градиент от категорий устойчивости по классификации Тернера или Т-ИЭМ							
	A	B	C	D^+	D^-	E	F	G
Менее 1	-1,5	-1,0	-0,7	-0,2	0,0	-	2,0	4,0
От 1 до 2	-2,0	-1,6	-1,0	-0,4	0,1	-	3,5	6,5
Свыше 2 до 3	-2,2	-1,9	-1,5	-0,8	0,3	1,0	5,0	-
Свыше 3 до 5	-*	-2,0	-1,5	-1,1	0,6	1,6	-	-
Свыше 5 до 7	-	-	-2,0	-1,5	1,0	2,0	-	-
Свыше 7	-	-	-	-2,0	1,5	-	-	-
Примечание - * Нереализуемые ситуации.								

Далее проводится пространственная интерполяция $T(x_i,y_i,z)$, полученных по (Г.60) в пунктах метеонаблюдений, на заданную сетку по формуле (Г.57), полагая $F(x_i,y_i)=T(x_i,y_i,z)$.

Г.4 Определение интенсивности осадков по данным наземных метеостанций и постов

Одним из наиболее эффективных механизмов самоочистки атмосферы является выведение ЗВ осадками. В метеопроцессоре определяется интенсивность I, мм/ч, осадков за интервал между сроками наблюдения и эффективная величина интенсивности $(\gamma_1 \cdot I)$, мм/ч, учитывающая вымывающую способность осадков различных типов. По стандартным данным наблюдений на метеостанциях имеются сведения:

– о суммарном количестве осадков Q за 12 ч;

– о времени начала $t_{wb,i}$ и окончания выпадения осадков $t_{we,i}$ в течении 12-часового интервала времени, где i - номер интервала наличия осадков;

– о фазовом состоянии осадков (дождь, дождь со снегом и т.д.).

На основе этих данных определяются интенсивность осадков как равномерно распределенная по всем интервалам времени выпадения осадков за 12-часовой срок наблюдения и эффективная величина осадков ($\gamma_1 \cdot I$).

Интенсивность осадков I на всех i-х интервалах времени [$t_{wb,i}$, $t_{we,i}$] выпадения осадков на 12-часовом промежутке накопления осадков Q считается одной и той же и определяется следующей формулой

$$I = \frac{Q}{\sum_i (t_{we,i} - t_{wb,i})}. \qquad (Г.61)$$

Эффективная величина интенсивности осадков равна ($\gamma_1 \cdot I$), где значение γ_1, устанавливается в зависимости от типа наблюдаемых на метеостанции осадков согласно таблице В.4 (приложение В).

Г.5 Определение вертикальных профилей коэффициентов турбулентной вязкости и диффузии

Г.5.1 Понятие коэффициентов турбулентной вязкости вводится для локальной связи между касательным напряжением турбулентного происхождения и градиентом скорости. На основании теоретических разработок, а также с помощью численного решения уравнений Навье-Стокса при замыкании второго порядка предложено определять коэффициент вертикальной турбулентной вязкости K_z, $м^2/с$, в стратифицированном ПСА по аппроксимационной формуле [17,53-58]:

$$K_z(z) = \frac{\kappa \cdot u_* \cdot z}{\Phi_2(\tilde{z})}\left(1 - 0{,}9\frac{z}{H}\right)^2, \qquad (Г.62)$$

где $\Phi_2(\tilde{z})$ определяется по (5.37);

$\tilde{z}$ определяется по формуле (5.40).

Г.5.2 Для вычислений горизонтальных коэффициентов турбулентной вязкости K_x, K_y, $м^2/с$, используются следующие аппроксимационные формулы:

$$K_x = c \cdot \left(\frac{\sigma_u(z)}{\sigma_w(z)}\right)^4 \cdot K_z(z), \quad K_y = c \cdot \left(\frac{\sigma_v(z)}{\sigma_w(z)}\right)^4 \cdot K_z(z), \qquad (Г.63)$$

где c - коэффициент, определяемый по формуле (5.43);

σ_u^2, σ_v^2, σ_w^2 - значения дисперсий компонент ветра, определяемые по аппроксимационным формулам (5.34), (5.35), с использованием значений интегральных параметров ПСА u_*, L^{-1}, H и параметра шероховатости z_0.

Г.5.3 Для практических расчетов рассеяния примеси используется гипотеза о совпадении коэффициентов турбулентной диффузии с соответствующими коэффициентами турбулентной вязкости для невесомых ЗВ. Учет влияния весомости ЗВ ($v_R \neq 0$) проводится для вертикального коэффициента диффузии путем умножения коэффициента турбулентной вязкости на величину $\sqrt{1+v_g}$, где v_g определяется по формуле (5.41). Горизонтальные коэффициенты турбулентной диффузии для весомого ЗВ не корректируются и остаются теми же, что и для невесомого ЗВ.

Приложение Д

(обязательное)

Расчет штилевого фактора разбавления в Гауссовых моделях

Д.1 Рабочие формулы для вычисления G_1^{st}, G_2^{st} и α_1

Выражения для вычисления вспомогательных функций G_1^{st}, G_2^{st} и α_1, используемые при определении штилевого фактора разбавления, имеют вид [26]:

$$G_1^{st}(x,y,0,t)=\frac{t\cdot e^{-A_1^2+\frac{(x-x_s)\cdot U\cdot(t-t_1)}{\sigma_{1x}^2(t_D)}-\frac{(U\cdot(t-t_1))^2}{2\cdot\sigma_{1x}^2(t_D)}}}{(2\cdot\pi)^{3/2}\cdot\sigma_{1x}(t_D)\cdot\sigma_{1y}(t_D)\cdot\sigma_{1z}(t_D)\cdot A_1^2}\times$$
$$\times\left\{1+\frac{\sqrt{\pi}}{2}\cdot\frac{(x-x_s)\cdot U\cdot(t-t_1)}{\sigma_{1x}^2(t_D)\cdot A_1}e^{\left(A_1-\frac{(x-x_s)\cdot U\cdot(t-t_1)}{2\cdot\sigma_{1x}^2(t_D)\cdot A_1}\right)^2}\left[1-\Phi\left(A_1-\frac{(x-x_s)\cdot U\cdot(t-t_1)}{2\cdot\sigma_{1x}^2(t_D)\cdot A_1}\right)\right]\right\}, \quad (Д.1)$$

где $A_1=\left(\frac{1}{2}\left(\frac{(y-y_s)^2}{\sigma_{1y}^2(t_D)}+\frac{(x-x_s)^2}{\sigma_{1x}^2(t_D)}+\frac{h^2}{\sigma_{1z}^2(t_D)}\right)\right)^{1/2}$;

$\sigma_{1x}(t_D)=\sigma_{1y}(t_D)$;

$\sigma_{1y}(t_D)=\frac{S_v\cdot t_D}{\sqrt{2}}$;

$\sigma_{1z}(t_D)=\frac{S_w\cdot t_D}{\sqrt{2}}$;

$S_v=c_3\cdot\tilde{U}_\phi$,

$S_w=10^{(a_{w1}\cdot p_\Pi+a_{w2})}\tilde{U}_\phi$;

$a_{w1}=-0{,}187+0{,}016\cdot\lg(100\cdot z_0)$;

$a_{w2}=-0{,}836+0{,}134\cdot\lg(100\cdot z_0)$.

$$G_2^{st}(x,y,0,t)=\frac{(t-t_1)\cdot e^{-A_2^2+\frac{(x-x_s)\cdot U\cdot(t-t_1)}{\sigma_{x2}^2(t_D)}-\frac{(U\cdot(t-t_1))^2}{2\cdot\sigma_{x2}^2(t_D)}}}{2\cdot\sqrt{2}\cdot\pi\cdot\sigma_{2x}(t_D)\cdot\sigma_{2y}(t_D)\cdot\sigma_{2z}(t_D)\cdot A_2}\left\{e^{\left(A_2+\frac{U\cdot(t-t_1)}{\sqrt{2}\cdot\sigma_{x2}(t_D)}\right)^2}\times\right.$$
$$\left.\times\left(1-\Phi\left(A_2+\frac{U\cdot(t-t_1)}{\sqrt{2}\cdot\sigma_{x2}(t_D)}\right)\right)+e^{\left(A_2-\frac{U\cdot(t-t_1)}{\sqrt{2}\cdot\sigma_{x2}(t_D)}\right)^2}\cdot\left(1-\Phi\left(A_2-\frac{U\cdot(t-t_1)}{\sqrt{2}\cdot\sigma_{x2}(t_D)}\right)\right)\right\}, \quad (Д.2)$$

где $A_2 = \left(\frac{1}{2}\left(\frac{(y-y_s)^2}{\sigma_{2y}^2(t_D)} + \frac{(x-x_s)^2}{\sigma_{2x}^2(t_D)} + \frac{h^2}{\sigma_{2z}^2(t_D)}\right)\right)^{1/2}$;

$\sigma_{2x}(t_D) = \sigma_{2y}(t_D)$;

$\sigma_{2y}(t_D) = S_v \cdot \sqrt{t_D \frac{5000}{c_4} \cdot \tilde{U}_\phi}$;

$\sigma_{2z}(t_D) = \sqrt{\tilde{U}_\phi \cdot t_D} \cdot 10^{0,5\cdot(b_{w1}\cdot p_П - b_{w2} + \lg(500))}$;

$S_v = c_3 \cdot \tilde{U}_\phi$,

$b_{w1} = -0,574 - 0,0185 \cdot \lg(100 \cdot z_0)$;

$b_{w2} = 0,651 - 0,0854 \cdot \lg(100 \cdot z_0) - 0,0574 \cdot \left|\lg(100 \cdot z_0 - 2)\right|$;

c_3 определяется по формуле (6.44);

c_4 определяется по формуле (6.45).

$$\alpha_1 = 10^{-(a_1 + \lg(x-x_s)\cdot(a_2 + a_3\cdot\lg(x-x_s)))}, \qquad (Д.3)$$

где $a_1 = 1,35\cdot10^{-1}\cdot p_П - 2,913\cdot10^{-1}$;

$a_2 = -7,727\cdot10^{-2}\cdot p_П + 2,453\cdot10^{-1}$;

$a_3 = 9,651\cdot10^{-3}\cdot p_П - 3,062\cdot10^{-2}$.

Д.2 Рабочие формулы для вычисления $G^{st}_{дл\,\tau1}$, $G^{st}_{дл\,\tau2}$ и α_2

Выражения для вычисления вспомогательных функций $G^{st}_{дл\,\tau1}$, $G^{st}_{дл\,\tau2}$ и α_2, используемые для расчета проинтегрированной по времени приземной концентрации при штилевых условиях, имеют вид

$$G^{st}_{дл\,\tau1}(x,y,0,t) = \frac{t^2 \cdot e^{-\frac{(x-x_s)\cdot U\cdot(t-t_1)}{2\sigma_{1x}^2(t_D)} - \frac{y^2}{2\sigma_{1y}^2(t_D)} + \left\{A_1 - \frac{(x-x_s)\cdot U\cdot(t-t_1)}{2\sigma_{1x}^2(t_D)\cdot A_1}\right\}^2}}{(2)^{3/2}\cdot\pi\cdot\sigma_{1x}(t_D)\cdot\sigma_{1y}(t_D)\cdot\sigma_{1z}(t_D)\cdot A_1} \cdot \left[1 - \Phi\left(A_1 - \frac{(x-x_s)\cdot U\cdot(t-t_1)}{2\cdot\sigma_{1x}^2(t_D)\cdot A_1}\right)\right], \qquad (Д.4)$$

$$G^{st}_{дл\,\tau1}(x,y,0,t) = \begin{cases} \dfrac{t\cdot e^{-A_2^2 + \frac{(x-x_s)\cdot U\cdot(t-t_1)}{\sigma_{2x}^2(t_D)} - \frac{(U\cdot(t-t_1))^2}{2\sigma_{1x}^2(t_D)}}}{\pi\cdot U\cdot\sigma_{2y}(t_D)\cdot\sigma_{2z}(t_D)} \left\{ e^{\left(A_2 - \frac{U\cdot(t-t_1)}{\sqrt{2}\cdot\sigma_{2x}(t_D)}\right)^2} \cdot \left[1 - \Phi\left(A_2 - \frac{U\cdot(t-t_1)}{\sqrt{2}\cdot\sigma_{2x}(t_D)}\right)\right] - \right. \\ \left. - e^{\left(A_2 + \frac{U\cdot(t-t_1)}{\sqrt{2}\cdot\sigma_{2x}(t_D)}\right)^2} \cdot \left[1 - \Phi\left(A_2 + \frac{U\cdot(t-t_1)}{\sqrt{2}\cdot\sigma_{2x}(t_D)}\right)\right] \right\}, & \text{при } U > 0 \\ \dfrac{\sqrt{2}\cdot t^2\cdot e^{-A_2^2}}{\pi\cdot\sigma_{2x}(t_D)\cdot\sigma_{2y}(t_D)\cdot\sigma_{2z}(t_D)} \left\{ \dfrac{1}{\sqrt{\pi}} - A_2\cdot e^{A_2^2}\cdot\left[1 - \Phi(A_2)\right] \right\}, & \text{при } U = 0 \end{cases}, \qquad (Д.5)$$

$$\alpha_2 = 10^{-(b_1+\lg(x-x_3)(b_2+b_3\cdot\lg(x-x_4)))}, \qquad (Д.6)$$

где $b_1 = -7{,}5\cdot10^{-2}\cdot p_П - 1{,}555\cdot10^{-1}$;

$b_2 = 1{,}078\cdot10^{-1}\cdot p_П + 6{,}714\cdot10^{-2}$;

$b_3 = -2{,}833\cdot10^{-2}\cdot p_П + 3{,}676\cdot10^{-2}$.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

(рекомендуемое)

Определение параметров «виртуальных» источников для Гауссовых моделей

Е.1 *Генерация облаков в ПСА для объемного источника*

Объемные источники различной конфигурации моделируется цилиндром с верхней h_{max} и нижней h_{min} границами по вертикали и диаметром основания d_s.

Е.1.1 Для атмосферного объемного выброса (за исключением выброса из венттрубы), вертикальный размер $\delta_{ПСА}$ которого меньше горизонтального d_s, т.е.

$$\frac{\delta_{ПСА}}{d_s} \le \frac{2}{3},$$

где $\delta_{ПСА}=h_{max}-h_{min}$,

вычисления Δx_s, n_x, n_y, n_z и Δt проводятся следующим образом:

а) деление источника по вертикали не проводится и полагается $n_z=1$. «Виртуальный» сдвиг Δx_s определяется из условия

$$\sigma_z(\Delta x_s) = \frac{\delta_{ПСА}}{4}, \qquad (Е.1)$$

что позволяет приближенно представить Δx_s в виде

$$\Delta x_s \approx 0{,}3 \cdot \delta_{ПСА} \cdot \ln\frac{z_s}{z_0}, \qquad (Е.2)$$

при $z_s = \frac{h_{max} + h_{min}}{2}$; (Е.3)

б) количество «виртуальных» источников по направлениям осей x и y совпадает $n_x=n_y$ и определяется из условия, обеспечивающего на расстоянии более x_{min} от источника гладкий (одномодальный) профиль концентрации

$$n_x = n_y = \max\left\{1, \left[\frac{d_s}{2{,}3 \cdot \sigma_x(\Delta x_s + x_{min})}\right]\right\}, \qquad (Е.4)$$

где x_{min} – выбирается пользователем и рекомендуется брать равным

$$x_{min} = \min\{100м; \max\{\Delta x; 20м\}\}.$$

Квадратные скобки в (Е.4) означают целую часть числа.

Е.1.2 Для атмосферного объемного выброса (за исключением выброса из венттрубы), вертикальный размер $\delta_{ПСА}$, которого больше горизонтального d_s, т.е.

$$\frac{\delta_{ПСА}}{d_s} > \frac{2}{3},$$

вычисление Δx_s, n_x, n_y, n_z проводят следующим образом:

а) количество «виртуальных» источников по горизонтали полагается $n_x=n_y=1$. «Виртуальный» сдвиг Δx_s определяется из условия

$$\sigma_y(\Delta x_s) = \frac{d_s}{4}, \qquad (Е.5)$$

что позволяет приближенно представить Δx_s в виде

$$\Delta x_s \approx 0.45 \cdot d_s \cdot \ln\frac{z_s}{z_0}. \qquad (Е.6)$$

б) количество «виртуальных» источников по вертикали n_z определяется из условия, обеспечивающего на расстоянии x_{min} от источника гладкий (одномодальный) профиль концентрации

$$n_z = \max\left\{1, \left[\frac{\delta_{ПСА}}{2{,}3 \cdot \sigma_z(\Delta x_s + x_{min})}\right]\right\}, \qquad (Е.7)$$

где x_{min} – выбирается пользователем и рекомендуется брать равным

$$x_{min} = \min\{100м; \max\{\Delta x; 20м\}\}.$$

Квадратные скобки в (Е.7) означают целую часть числа.

Е.1.3 При выбросе из венттрубы, т.е. при $h_{max}=h_{min}=z_s$ источник моделируется одним «виртуальным» источником ($n_x=n_y=n_z=1$) с «виртуальным» сдвигом Δx_s, определяемым из условия

$$\frac{d_s}{4} = \sigma_x(\Delta x_s), \qquad (Е.8)$$

и приближенно представляемым в виде

$$\Delta x_s \approx \frac{d_s}{4 \cdot c_3},$$

где d_s – диаметр трубы, м;

c_3 – безразмерный параметр, вычисляемый по формуле (6.44).

Е.2 Определение координат

Координаты реального источника x_s, y_s, z_s, используемые в формулах (6.3), (6.4), (6.9) – (6.16), (6.19), (6.32), (6.36), заменяются в связи с введением «виртуальных» источников соответственно на следующие:

$$x_{s\,i,j,m} = x_s + \frac{d_s}{2n_x}(2i - 1 - n_x),$$

$$y_{s\,i,j,m} = y_s + \frac{d_s}{2n_y}(2j - 1 - n_y), \qquad (Е.9)$$

$$z_{s\,i,j,m} = \frac{\delta_{ПСА}}{2n_z}(2m - 1) + \max\{h_{min}, 2\},$$

где $i=1,\ldots,n_x$; $j=1,\ldots,n_y$; $m=1,\ldots,n_z$.

Е.3 Определение массы или мощности выброса «виртуальных» источников

Масса Q_n (для мгновенного источника) или мощность M_n (для источника конечного времени действия) выброса ЗВ в каждом n–ом «виртуальном» источнике определяется следующим образом:

– *для мгновенного источника*

$$Q_n = \frac{Q}{N}; \qquad (Е.10)$$

– для источника конечного времени действия

$$M_n = \frac{M}{N}, \qquad (Е.11)$$

где $N=n_x \cdot n_y \cdot n_z$,

$n=1,2,\ldots,N$.

Библиография

[1] Методика определения площади зоны защитных мероприятий, устанавливаемой вокруг объектов по хранению химического оружия и объектов по уничтожению химического оружия. Утверждена Министерством обороны Российской Федерации 26 марта 1999г.

[2] Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. - Л.: Гидрометеоиздат, 1974, 568с.

[3] Клепикова Н.В., Троянова Н.И., Фреймундт Г.Н., Денькин В.А. Оперативная модель атмосферного переноса для оценки и прогноза последствий радиационной аварии. - Труды международной конференции "Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях" г. Москва 24-26 апреля 2000г, Санкт-Петербург, Гидрометеоиздат, 2000, с.279-284

[4] Клепикова Н.В., Троянова Н.И., Фреймундт Г.Н., Стогова И.В. Разработка проекта методики по расчету рассеяния радиоактивных веществ в атмосфере при аварийных выбросах - Доклады Всероссийской научно-практической конференции «Состояние и развитие Единой Государственной Автоматизированной Системы Контроля Радиационной Обстановки на территории Российской Федерации», 23-25 мая 2001г., г.Обнинск, НПО «Тайфун», с.217- 222

[5] N.V.Klepikova, N.I.Troyanova, G.N. Freimundt, V.A. Denkin On-line model of atmospheric transport to estimate and forecast radiation accident consequences - Seventh International Conference On Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, May 28-31, 2001, Belgirate, Italy, p.484-488

[6] Клепикова Н.В., Троянова Н.И., Фреймундт Г.Н., Стогова И.В. Моделирование распространения загрязняющих отравляющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах - III Научно-практическая конференция «Научно-технические аспекты обеспечения безопасности при уничтожении, хранении и транспортировке химического оружия», Москва, октябрь 2006, с.286-287

[7] Клепикова Н.В., Троянова Н.И., Фреймундт Г.Н. Оперативный метод расчета переноса и рассеяния примеси в атмосфере при аварийных ситуациях на радиационно-опасных объектах. - Труды ИЭМ, вып.23(165), 2002, с.29-51

[8] Шершаков В.М., Бородин Р.В., Григорьева В.М., Клепикова Н.В., Коломеев М.П., Троянова Н.И., Стогова И.В., Фреймундт Г.Н. Правила расчета распространения ЗВ в атмосфере и водных объектах при аварийных выбросах. // Шестая международная

научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». Тезисы докладов. М., 2008, 194-198.

[9] Уорк К., Уорнер С. Загрязнение воздуха. Источники и контроль. - Л.: Изд. Мир, 1980, 539с.

[10] Draxler R.R. Determination of atmospheric diffusion parameters. - Atm. Env., 1976, v.10, N 2, p.99-105

[11] Arya S.P. Modeling and Parameterization of Near-Sourse Diffusion in Weak Wind. - J. of App. Meteor., 1995, v.34, p.1112-1122

[12] Бызова Н.Л. Методическое пособие по расчету рассеяния примесей в пограничном слое атмосферы по метеорологическим данным. - М.: Гидрометеоиздат, 1973, 48с.

[13] Hanna S.R. and Chang J.C. Boundary-Layer parametrizations for applied dispersion modeling over urban areas. - Boundary-Layer Meteorol., 1992, v.58, p.229-259.

[14] C. Mangia, G. A. Degrazia, U. Rizza. An Integral Formulation for the Dispersion Parameters in a Shear–Buoyancy–Driven Planetary Bondary Layer for Use in a Gaussian Model for Tall Stacks. – J. of App. Meteor., 2000, p.1913-1922

[15] Gryning S.E., Holtslag A.A.M., Irwin J.S. and Sivertsen B. Applied dispersion modelling based on meteorological scaling parameters. - J. Atm. Env., 1987, v.21, p.79-89.

[16] Holtslag A.A.M. and van Ulden A.P. A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from routine weather date. - J. Climate Appl. Meteor., 1983, v.22, p.517-529.

[17] Holtslag A.A.M. and Moeng C.-H. Eddy diffusivity and countergradient transport in the convective atmospheric boundary layer. - J. Atm. Sci., 1991, v.48, p.1690-1698.

[18] Бызова Н.Л., Гаргер Е.К. Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. - Л.: Гидрометеоиздат, 1991, 278с.

[19] Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примеси. Под ред.Ф.Т.М. Ньистадта и Х.Ван Допа. - Л.: Гидрометеоиздат, 1985, 351с.

[20] Dosio A., de Arellang J.V.-G., Holstlag A.A.M. and Builtjes P.J.H. Dispersion of a Passive Tracer in Buoyancy- and Shear. – Driven Bondary Layers. – J. Appl. Meteor., 2003, v.42, p.1116-11130

[21] Жуков Г.П., Юрчак Б.С. Диффузия пассивной примеси в пограничном слое атмосферы по радиолокационным данным – Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1994, т.30, N4, с.451-457

[22] Generic models and parameters for assessing the environmental transfer of radionuclides from routine releases. Safety Series No.57. - Vienna: IAEA, 1982, 91p.

[23] Руководство по организации контроля состояния природной среды в районе расположения АЭС. Под ред. К.П. Махонько. - Л.: Гидрометеоиздат, 1990, 264с.

[24] Методы расчета распространения радиоактивных веществ в окружающей среде и доз облучения населения. - М.: МХО Интератомэнерго, 1992, 334с

[25] Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосферу. Справочник. - М.: Энергоатомиздат, 1986, 224с.

[26] Клепикова Н.В., Троянова Н.И., Фреймундт Г.Н. Использование гауссовых моделей в условиях слабого ветра и штилей. - Труды ИЭМ, вып.23(165), 2002, с.66-82

[27] Gifford F.A. Consequences of Effluent Release. – Nuclear Safety, 1976, v.17, N1, p.68-86

[28] H.W.M. Witlox. The hegarads model for ground-level heavy-gas dispersion – I. stedy-state model. - Atm. Env., 1994, v.28,N.18, p.2917-2932

[29] H.W.M. Witlox and K. McFarlane. Interfacing dispersion models in the hgsystem hazard-assessment package - Atm. Env., 1994, v.28,N.18, p.2947-2962

[30] Об охране атмосферного воздуха: Федеральный закон от 04.05.1999 № 96-ФЗ

[31] О промышленной безопасности опасных производственных объектов: Федеральный закон от 21.06.1997 № 116-ФЗ с изменениями на 9 мая 2005 года

[32] Викторов М.М. Методы вычисления физико-химических величин и прикладные расчеты. – Л.: Химия, 1977, 360 с.

[33] Александров В.Н., Емельянов В.И. Отравляющие вещества. – М.: Воениздат, 1990, 272 с.

[34] Десяткин Б.М., Бородулин А.И., Сарманаев С.Р., Котлярова С.С. О вероятности превышения концентрацией атмосферной примеси некоторого порогового значения. – Опитика атмосферы и океана, 2000, т.13, №8, с.784-787

[35] Nettervill D.D.J. Plume rise, entrainment and dispersion in turbulent winds. - Atm. Env., 1990, V.24A, N5, p.1061-1081.

[36] Шифрин К.С. Универсальная формула для скорости падения шара в жидкости. Из. АН СССР. Сер. геофиз., 1958, N2, с.280-283.

[37] Методические рекомендации по выбору исходных данных и параметров при расчете радиационных последствий аварий на АЭС. Разработчики ВНИИАЭС Минздрава Российской Федерации по атомной энергии, ГУ НПО «Тайфун»

Росгидромета, ГНЦ РФ-ИБФ Министерства здравоохранения РФ, ИБРАЭ Российской Академии наук. - М. 2001, 27 с.

[38] Типовые характеристики нижнего 300-метрового слоя атмосферы по измерениям на высотной мачте. Под ред. Бызовой Н.Л. - М.: Гидрометеоиздат, 1982, с.67.

[39] Wieringa J. Roughness-dependent geographical interpolation of surface wind speed averages. - Quart. J. R. Met. Soc., 1986, v.112, p.867-889.

[40] Borrego C.S., Coutinho M.S. and Costa M.J. Introduction of terrain roughness effects into a Gaussian dispersion model. - The Science of Total Environment, 1990, v.99, p.153-161.

[41] Van Ulden A.P. and Holtslag A.A.M. Estimation of Atmospheric Boundary Layer Parameters for Diffusion Applications. - J. Climate Appl. Meteor., 1985, v.24, p.1196-1207.

[42] EUR 18195-COST Action 710 - Final report. Harmonisation of the pre-processing of meteorological data for atmospheric dispersion models. Editen by B.E.A. Fisher and et al. - Luxemburg: Office for Official Publications of the European Communities, 1998, 431 pp.

[43] Альбедо и угловые характеристики отражения подстилающей поверхности. Под ред. чл.-корр. АН СССР К.Я. Кондратьева. - Л.: Гидрометеоиздат, 1981, с.1-232.

[44] Клепикова Н.В., Троянова Н.И., Фреймундт Г.Н., Стогова И.В. Соотношения между параметрами устойчивости атмосферы для широкого диапазона уровней шероховатости. - Труды ИЭМ, вып.23(165), 2002, с.52-65

[45] Tagliazucca,M and Nanni,T. An atmospheric diffusion classification scheme based on the Kazanski - Monin Stability parameter. - Atm.Env., 1983,v.17,N 11, p 2205-2211.

[46] Зилитинкевич С.С. Профили скорости и закон сопротивления в планетарном пограничном слое при нейтральной и устойчивой стратификации. - Изв.АН СССР ФАО, 1989, т.25, N 11, с.1131-1143.

[47] Driedonks A.G.M. Models and Observations of the Growth of the Atmosphere Bondary Layer. – Bondary-Layer Meteorol., 1982, v.23, N3, p.283-301

[48] Tennekes H. A Model for the Dynamics of the Inversion Abova Convective Bondary Layer. – J. Atm. Sci., 1973, v.30, N4, p.558-567

[49] Tomson D.J. An Analytical Solution of Tennekes' Equations for the Growth of Bondary-Layer Depth. – Bondary-Layer Meteorol., 1992, v.59, p.227-229

[50] Arya S.P.S. Parametrizing the Height of the Stable Atmospheric Boundary Layer. - J. of Appl. Meteor., 1981, v.20, p.1192-1202

[51] Irwin J.S. A theoretical variation of the wind profile power-law exponent as a function of surface roughness and stability. - Atm. Env., 1979, v.13, p.191-194.

[52] Серия изданий по безопасности N50-SG-S3. Учет дисперсных параметров атмосферы при выборе площадки для атомных электростанций. - Вена: МАГАТЭ, 1982, 105 с.

[53] Tirabassi T., Rizza U. Boundary Layer Parameterization for a Non-Gaussian Puff Model. – J. of Appl. Met., 1977, v.36, pp 1031-1037.

[54] Holstlag A.A.M. and oth. A Comparison of Boundary Layer Diffusion Schemes in Unstable Conditions over Land. – Boundary-Layer Met., 1995, v.76, pp.69-95.

[55] Briggs G.A. Analytical Parameterizations of Diffusion: The Convective Boundary Layer. – J. of Climate and Appl. Met., 1983, v.24, pp.1167-1185.

[56] Degrazia G.A., Moreira D.M. Derivation of an Eddy Diffusivity Depending on Source Distance for Vertically Inhomogeneous Turbulence in a Convective Boundary Layer. – J. of Appl. Met., 2001, v.40, pp. 1233-1240.

[57] Brost R.A., Wingaard J.C. A Model Study of the Stable Stratified Planetary Boundary Layer. – J. of Atm. Sci., 1978, v.35, pp. 1427-1440.

[58] Troen I.B., Mahrt L. A Simple Model of the Atmospheric Boundary Layer; Sensitivity to Surface Evaporation. – Boundary-Layer Met. – 1986, v. 37, pp 129-148.

gost.e-ecolog.ru