

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
( **Н И У « Б е л Г У »** )

**Польшиков Михаил Сергеевич**

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ  
ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МОДИФИКАЦИИ ЦИФРОВОЙ ВОЛНЫ**

**Диссертация на соискание академической степени  
магистра**

Направление подготовки

01.04.01 Математика, магистерская программа «Математическое обеспечение  
информационных технологий»

Научный руководитель  
Зав. кафедрой общей математики  
проф. док. тех. наук Аверин Г. В.

Рецензенты  
доцент кафедры информационно  
телекоммуникационных систем и технологий  
НИУ «БелГУ», кандидат технических наук,  
доцент Девицына С. Н

БЕЛГОРОД 2017

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГО – гражданская оборона

МАГАТЭ – международное агентство по атомной энергетике

НМУ – неблагоприятные метеорологические условия

ЭВМ – электронно-вычислительная машина

EPA – United States Environmental Protection Agency

BLP – Bouyant Line и Point Source Model

CALINE3 – California Line Source Dispersion Model

CTDMPLUS – Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithms for  
Unstable Situations

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** В последние годы проблема обеспечения экологической безопасности стала особенно остро. Основной причиной этого является рост промышленности во всем мире. В рамках среднего промышленного города может существовать до миллиона источников выбросов вредных веществ. Вредные вещества попадают в атмосферный воздух, воду, почву, а затем в живые организмы, в том числе и в человека. Для оценки или прогнозирования распространения вредных веществ во времени и пространстве, используются модели, основанные на численных или аналитических решениях общего уравнения диффузии. Эти модели известны также как модели атмосферной дисперсии. Модели атмосферной дисперсии очень важны для системы управления качеством атмосферного воздуха, так как они помогают контролировать выбросы в атмосферу, прогнозировать их распространение и разрабатывать эффективные модели. Существенное расширение применение моделей позволяет давать оценку качеству окружающей среды. К настоящему времени разработано достаточно большое количество таких моделей, наиболее популярными среди которых являются модели Берлянда, Эйлера, Лагранжа и модель факела «Лагранжа – Гаусса». Однако все они обладают рядом недостатков, среди которых отсутствие способности работать с динамикой (не учитывается изменение направления и скорости ветра), отсутствие учета рельефных особенностей местности. Поэтому, создание новой математической модели, которая бы позволила максимально достоверно прогнозировать распространение вредных веществ в рамках промышленного города, является актуальной задачей в области экологического мониторинга.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является разработка диффузионной модели на основе метода цифровой волны, которая бы позволила прогнозировать распространение вредных веществ.

Для достижения цели работы были поставлены и выполнены следующие задачи:

- 1) анализ существующих методов прогнозирования распространения веществ в атмосфере;
- 2) разработка математической модели распространение веществ в атмосфере с помощью модификации алгоритма цифровой волны;
- 3) проведение оценки адекватности модели, распространения веществ в атмосфере.

**Объектом исследования:** являются процессы распространения загрязняющих веществ в атмосфере.

**Предмет исследования** – математическая модель распространения веществ с использованием метода цифровой волны.

**Методы исследования** – математическое моделирование метода цифровой волны, вычислительный эксперимент.

**Что сделано** – в работе выполнено и содержится эффективные модели, на основе которых была выбрана модель и от полученных результатов заключается в использовании математической модели распространения веществ с учетом рельефных особенностей местности и изменения направления и скорости ветра.

Структура работы. Магистерская работа состоит из введения, четырех разделов, выводов, списка источников, который состоит из 25 наименований, 2 приложений. Работа содержит 12 рисунков, 9 таблиц, 49 формул.

## 1 АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При построении моделей качества воздуха используют математические и численные методы для моделирования физических и химических процессов, которые влияют на распространение веществ в атмосфере. Основываясь на метеорологических данных и информации источника выбросов (концентрация выбросов, высота дымовой трубы и другие) эти модели характеризуют как первичные загрязняющие вещества, которые попадают непосредственно в атмосферу, так и вторичные загрязнители, которые образуются в результате сложных химических реакций в атмосфере. Эти модели очень важны для системы управления качеством атмосферного воздуха, так как они помогают контролировать выбросы в атмосферу, прогнозировать их распространение и разрабатывать эффективные стратегии по сокращению вредных веществ в атмосфере. К примеру, модели качества воздуха могут быть использованы в процессе выдачи разрешений промышленным объектам или даже строительству новых городов, чтобы убедиться, что новый источник выбросов не будет превышать стандарты качества окружающего воздуха или, при необходимости, определить соответствующие дополнительные меры для предотвращения загрязнения воздуха. Кроме того, эти модели могут быть использованы для оценки эффективности программы по снижению вредных воздействий на человека и окружающую среду, путем прогнозирования концентрации загрязняющих веществ из различных источников после реализации этой программы регулирования. [1]

Чаще всего модели качества воздуха включают в себя следующие модели:

- дисперсионные модели;
- моделирование рецепторов;
- фотохимические модели.

Дисперсионные модели используют математические формулировки для характеристики атмосферных процессов, связанных с распространением загрязняющих веществ, выбрасываемых источником. На основании данных о выбросах и метеорологических данных, дисперсионные модели могут быть использованы для прогнозирования концентраций в местах расположения рецепторов. Эти модели используются для определения соответствия национальных стандартов качеству атмосферного воздуха и предотвращения снижения его уровня качества. [2]

Моделирование рецепторов – это более новый подход к изучению рассеивания вредных веществ от их источников выбросов. Данный подход разрабатывался на протяжении последних 30 лет. В отличие от дисперсионного моделирования, моделирование рецепторов не может предсказать качество воздуха в будущем, но, вместо этого, по последним данным, собранным в одном месте в течение определенного периода времени, может определить источники загрязнений в этом месте.

Фотохимические модели качества воздуха являются широко признанными и регулярно используемым средством для регуляторного анализа и моделирования оценки эффективности стратегий контроля. Они являются масштабными моделями качества воздуха, которые имитируют изменения концентраций загрязняющих веществ в атмосфере, используя набор математических уравнений, характеризующих химические и физические процессы в атмосфере. Эти модели применяются в различных пространственных масштабах от местного и регионального до национального и глобального. [3]

Данные для модели собираются автоматически комплексным путем из окружающей среды в течение 24-часового периода. Эти образцы анализируются на наличие набора химических компонентов. Полученные данные затем используются при построении компьютерной модели. Выходной сигнал модели обеспечивает группу химических элементов, которые затем интерполируются в качестве источников загрязнения.

Конечным результатом моделирования является список из источников загрязнения воздуха, и их соответствующий вклад в качество воздуха в исследуемой местности. [4]

### **1.1 Общие сведения о моделях оценки и прогноза состояния и уровня загрязнения атмосферы**

В настоящее время посвящено значительное количество теоретических и экспериментальных работ проблеме распространения загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу. Для решения этой проблемы было создано множество математических моделей используемые для описания поведения выбросов в атмосфере на расстоянии по ветру до 10-20 км от источника. Однако для больших расстояний эти модели считаются менее приемлемыми. Кроме того, каждая из этих моделей может быть применима при определенных условиях и требует ввода определенных метеорологических данных. Большинство моделей, используемые в разных странах в качестве государственных, применимы к ситуациям, в которых метеорологические параметры, такие как характеристики ветров и вертикальный градиент температуры, приблизительно равномерны во времени и пространстве. Необходимо отметить, что в реальности могут возникнуть ситуации, в которых метеорологические параметры быстро изменяются во времени или пространстве. Общих моделей, которые бы охватывали все ситуации, не существует. [5]

После того, как примеси (радиоактивный или токсичный газ или аэрозоль) попадают в воздух, характер их перемещения и дисперсии определяется их собственными физическими свойствами и свойствами атмосферы, в которых они находятся. Для того чтобы наглядно показать характер их поведения, необходимо рассмотреть поведение потока в целом после его попадания в атмосферу (рисунок 1.1). Выбросы проникают в атмосферу с определенной скоростью и температурой, которые обычно

отличаются от соответствующих характеристик окружающей среды. Движение выбросов имеет вертикальную составляющую, обусловленную начальной вертикальной скоростью потока и разницей температур, до тех пор, пока не исчезнет воздействие этих факторов. Этот вертикальный подъем выбросов называют подъемом шлейфа. Он приводит к изменению эффективной высоты  $H$  точки выброса. На путь распространения выброса воздействуют также изменения потоков вблизи таких препятствий, как здания и сооружения.

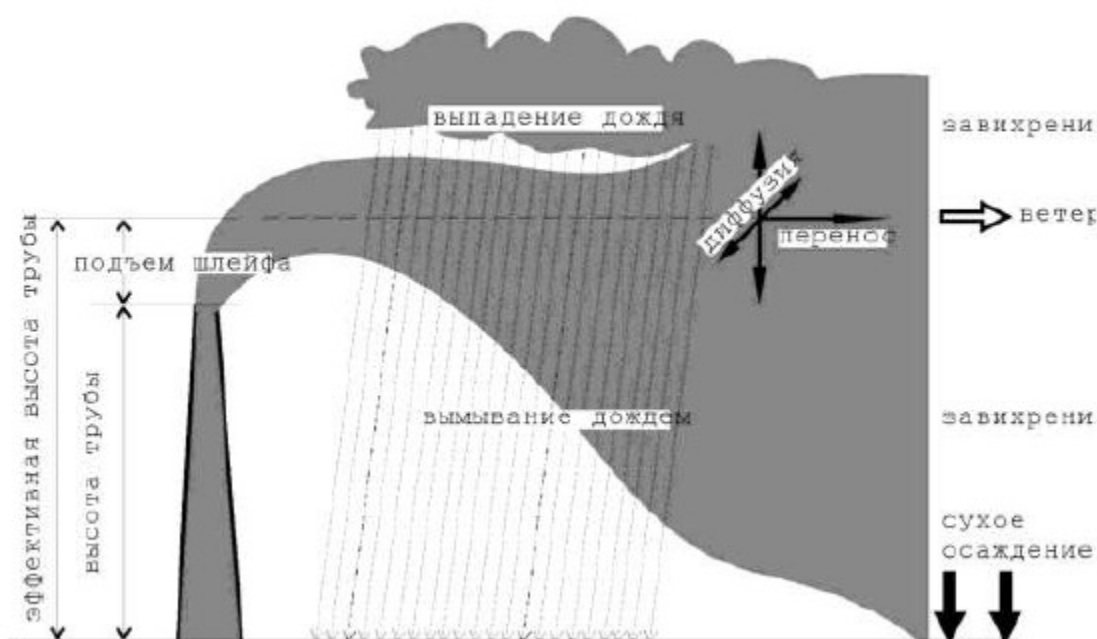


Рисунок 1.1 – Поведение загрязняющих веществ, выброшенных в атмосферу

Ниже будет использована следующая терминология.

Движение потока под действием ветра в течение и после подъема шлейфа называется переносом.

Турбулентное движение атмосферы вызывает произвольное движение выброса, приводящее к его распространению в горизонтальном и вертикальном направлениях за счет смещения с воздухом. Этот процесс называется атмосферной диффузией.



Комбинация переноса и диффузии называется атмосферной дисперсией. Модели, описывающие эти процессы, называют моделями атмосферного переноса-диффузии или моделями атмосферной дисперсии.

Выброс на стадиях подъема шлейфа, переноса и диффузии может также испытывать воздействие таких процессов, как:

- химическая трансформация примесей;
- радиоактивный распад и накопление дочерних продуктов;
- влажное осаждение:

1) дождь или снег (пар или аэрозоль попадают в капли воды или снежинки в облаке и выпадают в виде осадков);

2) вымывание (пар или аэрозоль захватываются ниже дождевого облака падающими осадками);

3) туман (пар или аэрозоль попадают в капли воды в тумане);

- сухое осаждение:

1) седиментация аэрозолей или гравитационное осаждение (для частиц с диаметром более 10 мкм);

2) отложение аэрозолей и адсорбция паров и газов на предметах, находящихся на пути ветра;

- образование и слипание аэрозолей.

Большую часть этих эффектов можно описать математически и при необходимости включить в математические модели. Отметим, что строгих указаний на эти модели в гостированных (имеющих официальный государственный статус) методиках нет. Это фактически означает, что разработчики должны исходить из конкретной ситуации и использовать адекватные ей модели. [5]

## 1.2 Модели атмосферной дисперсии

Информация, получаемая автоматическими станциями, отражает реальное состояние атмосферного воздуха в местах измерения. Однако,

несмотря на это, она касается только последствий загрязнения, а его причины остаются неизвестными. К тому же, эта информация показывает уровень загрязнения только в отдельных точках и не может дать адекватной картины состояния воздуха на остальной территории. Для решения этих проблем проводят математическое моделирование распространения примесей в атмосферном воздухе, которое позволяет оценить степень загрязнения атмосферы в заданной точке местности, не проводя в ней натуральных измерений. Кроме того, используя этот подход, можно прогнозировать изменение состояния атмосферного воздуха в длительной перспективе, моделировать различные гипотетические ситуации (такие, как строительство нового завода или даже города) и заранее планировать необходимые меры для предотвращения загрязнения воздуха. Моделирование требует комплексного учета многих факторов, таких как параметры источников выбросов и текущего метеорологического состояния атмосферы, условия рассеивания для данной местности, свойства моделируемых веществ. [6]

Математические модели атмосферной дисперсии реализуются компьютерными программами, которые решают математические уравнения и алгоритмы, имитирующие рассеивание загрязняющих веществ.

### **1.2.1 Задачи дисперсионных моделей**

Дисперсионные модели используются для оценки или прогнозирования концентрации примесей атмосферного воздуха, попадающих в атмосферу из таких источников как промышленные предприятия, автотранспорт и случайные химические выбросы. [6]

Эти модели очень важны для государственных органов, которым поручена охрана и рациональное использование окружающей среды.

Дисперсионные модели используются:

- для определения соответствия существующих или предлагаемых новых промышленных объектов национальным стандартам качества окружающей среды;
- во время разработки эффективных стратегий по снижению выбросов вредных веществ;
- для управления персоналом в ситуациях аварийных химических выбросов;
- для определения последствий аварийных выбросов опасных или токсичных веществ;
- для определения защитных соответствующих действий в случае аварийного выброса вредных веществ. Соответствующие защитные меры могут включать эвакуацию для лиц, находящихся с подветренной стороны.

### **1.2.2 Входящие данные дисперсионных моделей**

Перечень вводимых данных у разных видов дисперсионных моделей может варьироваться, но чаще всего он включает в себя следующие данные:

- метеорологические условия
  - 1) скорость и направление ветра,
  - 2) атмосферная турбулентность (характеризуется как класс устойчивости),
  - 3) температура окружающего воздуха,
  - 4) высота нижней границы атмосферной инверсии,
  - 5) облачность,
  - 6) солнечная радиация;
- информация об источнике выбросов
  - 1) концентрация токсинов в выбросах,
  - 2) температура вещества;
- выбросы или параметры релиза
  - 1) расположение и высота источника выбросов,

- 2) тип источника (пожар, бассейн или выходная труба),
  - 3) выходная скорость,
  - 4) температура на выходе,
  - 5) массовый расход;
- рельеф в месте источника и местах близлежащих рецепторов (предприятия, дома, школы, больницы и т. д.);
  - расположение, высота и ширина каких-либо предприятий на пути излучаемого газового факела. [6]

### **1.2.3 Виды источников вредных веществ в дисперсионных моделях**

Согласно геометрическим характеристикам различают четыре типа источников выбросов: точечные, линейные, площадные и объемные.

1. Точечные источники – организованный источник выбросов, из которого загрязняющие вещества поступают в атмосферный воздух из установленного отверстия (дымовые трубы теплоэлектростанций, отопительных котельных, технологических установок, печей и сушилок, вытяжные шахты, вентиляционные трубы и т. п.). Эти источники могут располагаться на значительной высоте от уровня земли или быть наземными. Точечный источник не имеет геометрических размеров. [7]

2. Линейные источники – источники выбросов, из которых выбросы загрязняющих веществ поступают в атмосферный воздух по установленной линии, например дороги и улицы, по которым систематически движется транспорт. [7]

3. Площадные источники – неорганизованный источник выбросов, из которого выбросы загрязняющих веществ поступают в атмосферный воздух с установленной ограниченной поверхности (площади). Примерами площадных источников могут стать выбросы от лесных пожаров, свалок или испаряющиеся пары из большого разлива летучей жидкости. [7]

4. Объемные источники – объемный трехмерный источник диффузных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. По сути, это площадной источник с третьей (высота) размерностью (например, летучие газообразные выбросы из [труб фланцев](#), клапанов и другого оборудования на различных высотах внутри промышленных объектов, таких как нефтеперерабатывающие и нефтехимические заводы). Другим примером может быть выбросы от автомобильного цеха окраски с несколькими отверстиями на крыше или нескольких открытых окон.

Кроме того источники вредных выбросов можно характеризовать следующим образом:

- стационарные (например, дымовые трубы) и мобильные, то есть передвижные источники (например, автотранспорт, физические лица, курящие табак);

- городские и сельские, так как городские районы представляют собой, так называемый, тепловой остров, из-за чего в атмосфере над этими территориями турбулентность становится выше, чем в атмосфере над сельской местностью;

- по уровню подъема источников над уровнем земли;

- по длительности выбросов из источников: краткосрочные (например, случайные аварийные выбросы) и долгосрочные (например, большинство выбросов дымовых газов). [8, 9]

#### **1.2.4 Методы оценки атмосферной дисперсии**

Общий порядок оценки концентрации атмосферного загрязнения и/или дисперсии для данной площадки в течение как длительных, так и коротких периодов времени включает в себя:

- выбор соответствующей модели с учетом неровности рельефа местности и высоты выброса для данной площадки и ситуации;

– определение классов устойчивости (турбулентности) для конкретных условий с помощью соответствующих измеренных или визуально полученных параметров;

– определение скорости ветра на нужном уровне (обычно на уровне выброса) с помощью измерений на этом уровне или путем расчета с использованием логарифмических соотношений или соотношений функции мощности, в зависимости от измерений на других уровнях;

– определение эффективной высоты выброса с помощью выражений для подъема шлейфа;

– определение коэффициентов турбулентности на заданном расстоянии из графиков или формул в соответствии с моделью, которую можно выбрать в справочной литературе;

– расчет концентраций и коэффициентов дисперсии по соответствующим формулам. [5]

### **Выводы по разделу**

1. Представлены общие сведения о моделях оценки и прогноза состояния и уровня загрязнения атмосферы. Приведен список процессов, воздействующих на загрязняющие вещества на стадиях подъема шлейфа, переноса и диффузии.

2. Описаны модели атмосферной дисперсии, перечислены их задачи, перечень основных вводимых данных, методы оценки и виды источников вредных веществ.

3. На основе перечисленных моделей их оценки прогнозирования можно сказать, что вредные вещества стали настолько много попадать в атмосферу, что в скором времени преведет катострофе.

## **2 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ**

Не смотря на обширность проведенных исследований, к настоящему времени не существует общепринятой модели распространения примесей в атмосфере. Это объясняется сложностью и разнообразием процессов, а также субъективными факторами. Поэтому существует множество моделей самых различных типов.

### **2.1 Перечень основных моделей, используемых для оценки загрязнения атмосферы**

Количество и характер моделей определяются, с одной стороны, кругом задач, стоящих перед экологическими службами, а с другой – требованиями к точности моделирования. Разнообразие требований к характеру оценок загрязнения и высокая специфичность распространения выбросов примесей в различных метеоусловиях приводят к необходимости использования тех моделей, которые перечислены ниже. [5]

1. Стандартные модели загрязнения атмосферы стационарными источниками, основанные на модели ОНД-86. Модели могут быть использованы для анализа квазистационарных процессов, когда характерные времена выбросов токсичных веществ превышают характерные времена перемещения воздушных масс в экспертируемой области пространства (например, случаи пожаров или утечек на продуктопроводах). Модель эмпирическая и позволяет рассчитать установившееся распределение концентраций токсиканта при заданном ветре и максимально неблагоприятном с точки зрения рассеяния примесей состоянии атмосферы.

2. Штатные модели служб ГО. Стандартная методика основана на эмпирических моделях и позволяет определить максимально возможную зону поражения при выбросах ядовитых веществ. Модель указывает не

реальное положение облака выбросов в тот или иной момент времени, а обозначает границы, в пределах которых концентрация ядовитых веществ может достичь опасных для здоровья человека значений при неблагоприятных метеоусловиях. Модель проста и быстро работает.

3. Модели МАГАТЭ (международное агентство по атомной энергетике) для расчетов загрязнений атмосферы, создаваемых стационарными источниками примесей. Это наиболее полные из существующих в настоящее время эмпирических моделей. Характер их детализации позволяет учитывать особенности местных метеорологических условий и производить расчеты распределений концентрации примесей в текущих метеоусловиях. Модели требуют значительных работ по привязке к местным условиям. Время вычислений по моделям 2 и 3 практически одинаково.

4. Нестационарные модели загрязнения, учитывающие неоднородность подстилающей поверхности. Квазитрехмерные модели, основанные на использовании полуэмпирических моделей МАГАТЭ с решением уравнения переноса – диффузии примесей в приземном слое. Для повышения скорости и точности вычислений использованы высокоэффективные численные методы и учтена специфика решаемой задачи. Используются в случаях, когда необходимо учесть неоднородность подстилающей поверхности, а вычислительные ресурсы и/или недостаток информации не позволяют использовать модели 6.

5. Простейшие нестационарные модели для расчета распространения облака загрязняющих веществ, предназначенные для экстресс-прогноза. Модели строятся на основе методик и моделей МАГАТЭ и позволяют рассчитать траекторию и время движения облака выбросов до потери токсичности или в интересующей области в текущих метеоусловиях. Установившихся стандартов на такие модели нет.

6. Наиболее полные и совершенные нестационарные модели распространения загрязняющих веществ в атмосфере, в которые включены расчеты мезометеорологических характеристик атмосферы с учетом



орографии (рельеф местности). Модели основаны на решении задач мезометеорологического прогноза и решении трехмерного уравнения переноса диффузии примеси. Требуют значительных вычислительных ресурсов и подробного задания больших объемов входной и начальной информации. Использование моделей этого класса оправдано, когда от результатов экспертизы зависят жизнь и судьбы людей, а специфика метеоусловий и орография местности таковы, что перечисленные выше модели неприменимы. Это случаи крупных аварий, имевших тяжелые последствия, или экспертиза проектов с прогнозом возможных событий, чреватых такими последствиями.

7. Модели, позволяющие прогнозировать загрязнение при штилевых условиях разных типов. Характеристики распространения и диффузии примесей в штилевых условиях и во время ветра различаются настолько, что для их описания требуются разные модели. Характер распространения загрязнения во время штиля существенно зависит от состояния атмосферы, орографии местности и начальных условий.

8. Специальные модели для районирования территорий по вероятности аварий и по степени угрозы промышленным объектам и населению, которые строят на основе среднестатистических моделей с использованием информации о розе ветров данной местности. Существенным моментом при построении моделей этого класса является необходимость учета реакции объекта, подвергающегося воздействию облака выбросов. Характер реакции объекта зависит от его свойств, типа и концентрации токсичного вещества и продолжительности его воздействия. Объектом может быть и человек и промышленное предприятие. Модели для оценки загрязнения территории или объектов строятся на основе моделей 1–8. Выбор модели определяется характером необходимой оценки. Например, для оценки влияния на здоровье населения в случае выброса ядовитых газов можно использовать модель 1, в случае безвредных примесей вообще не требуется расчетов, а промежуточные случаи как всегда сложны для моделирования.

9. Блок моделей, позволяющих учесть процессы химической трансформации примесей. В случае необходимости его подключают к моделям 4–7. Используется в тех случаях, когда для анализа события существенным является учет химических реакций, протекающих в облаке выбросов, например, в случаях возможности значительного повышения или уменьшения токсичности. Подключение блока может значительно, в несколько раз, замедлить время работы расчетной модели.

10. Комплекс синоптико-статистических моделей и автоматизированного прогнозирования неблагоприятных метеорологических условий (НМУ), предназначенный для оценки и прогнозирования уровней загрязнения атмосферного воздуха, а также принятия решения по атмосфероохранной деятельности как в краткосрочном, так и в долгосрочном аспектах. Для получения методик с высоким качеством прогнозирования необходимы исследования по диагностике погодных процессов синоптического масштаба, приводящих к реализации НМУ, и на основе этих исследований создание классификации синоптических процессов. Разработка расчетных моделей базируется на многомерном статистическом аппарате. Построение прогностических зависимостей основано на теории решения некорректных задач, что позволяет получать устойчивые решения при наличии коррелированности параметров, описывающих синоптическую ситуацию. Прогностическая система включает в себя: прием и обработку метеорологической информации из каналов связи, контроль и корректировку данных, архивирование и собственно прогноз. [5]

## **2.2 Классификация существующих моделей**

В настоящее время существует множество моделей самых различных типов. Согласно источнику [10] все существующие дисперсионные модели можно разделить на три группы: аналитико-эмпирические, численные и статистические.

В основе большинства аналитико-эмпирических методов лежит общее уравнение диффузии (2.1):

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial \tau} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = k_{T,x} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \\ + k_{T,y} \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + k_{T,z} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + Q(\tau, x, y, z) - ac \end{aligned} \quad (2.1)$$

где  $c$  – концентрация;

$\tau$  – время;

$x, y, z$  – координаты;

$u, v$  – профили скорости ветра по горизонтальным координатам  $x, y$  как функция высоты  $z$ ;

$w$  – скорость оседания ( $w < 0$ ) или всплывания ( $w > 0$ ) примеси;

$k_{T,x}, k_{T,y}, k_{T,z}$  – горизонтальные (вдоль  $x$  и  $y$ ) и вертикальный (вдоль  $z$ ) коэффициенты турбулентной диффузии;

$a$  – константа, обуславливающая разложение примеси вследствие процессов фотосинтеза, химических реакций и т.п.;

$Q(\tau, x, y, z)$  – функция источника примеси. [10]

В настоящее время существует большое количество моделей основанных на соотношении (2.1), среди которых наиболее популярными являются модели Берлянда и Гиффорда.

К эмпирическим моделям относят модели Паскуилла и Гиффорда, модели Института экспериментальной метеорологии, модель ГГО, большинство моделей, утвержденных в разных странах на государственном уровне для практического использования. [5]

Наибольший интерес вызывают модели, которые условно называют полуэмпирическими. В полуэмпирических моделях эмпирика дополнена развитым математическим аппаратом, что позволяет анализировать сложные ситуации, значительно отличающиеся от исходных экспериментов, и объединять результаты разнородных экспериментов, например метеорологических и диффузионных. В этом главное отличие от чисто

эмпирических моделей, которые описывают весь процесс в целом: на входе – параметры выброса, на выходе – концентрация в данной точке пространства. Общий недостаток: преимущественно исследовательская направленность. Пример – модель, созданная в Институте экспериментальной метеорологии.

Основой численных моделей является приближенное решение общего уравнения диффузии (2.1) с использованием численных методов, при этом предполагается задание ряда допущений, накладывающих меньшее число ограничений по сравнению с аналитико-эмпирическими моделями. При этом постановка задачи моделирования становится существенно более общей, однако сложность решения возрастает. Разнообразие численных моделей расчета концентрации примеси достаточно велико и определяется в основном различием подходов, которые используются при задании коэффициентов  $k_{T,x}$ ,  $k_{T,y}$ ,  $k_{T,z}$ ,  $a$ . Наиболее известными моделями являются модели Лагранжа и Эйлера. [10]

В основе статистических моделей лежат решения дифференциального уравнения (2.1), полученные по подобию известных аналитико-эмпирических решений, причем коэффициенты определяют либо эмпирическим путем, анализируя большие объемы исходных данных, либо используют известные теории (Тейлора, Гаусса и др.). Наиболее известной моделью, использующей указанный подход, является модель факела «Лагранжа – Гаусса». [10]

Существенным недостатком статистических моделей является зависимость от рельефных, промышленных, климатических особенностей конкретной местности, что не позволяет применить разработанную модель даже на соседних территориях (как правило, для этого может потребоваться значительная адаптация). [5]

По разнообразию учитываемых процессов все существующие модели можно классифицировать следующим образом:

– эмпирические модели: зачастую физика процессов почти не учитывается или сильно искажается;

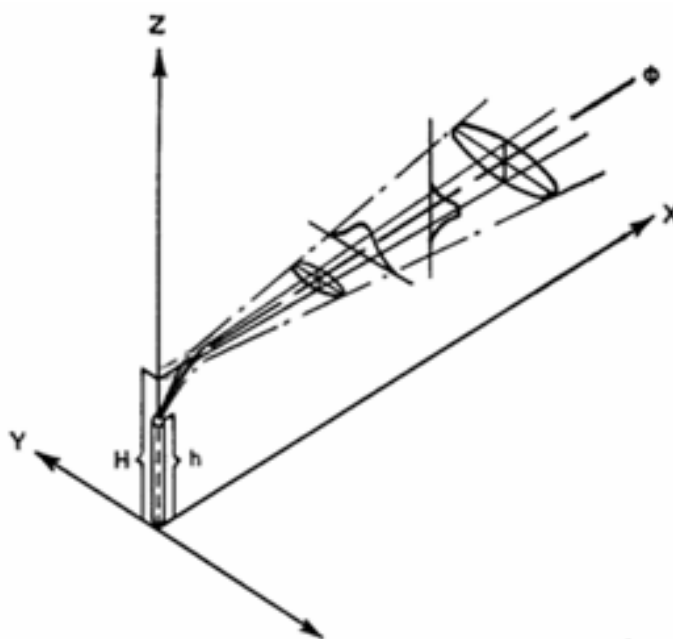
- модели, учитывающие законы движения воздуха и диффузии (используют разнообразные наборы упрощающих предположений);
- модели распространения, дополненные учетом специальных процессов (начальный подъем нагретых выбросов, оседание тяжелых частиц, вымывание примесей осадками);
- модели, учитывающие химические превращения веществ в процессе распространения, в частности модели фотохимического смога;
- специфические модели воздушных течений вблизи места аварии (в отличие от моделей распространения примеси). [5]

Третий вид классификации связан с типом используемого математического аппарата. В значительной мере он связан с предыдущими двумя признаками. Эмпирические модели используют явные формулы, которые при реализации на ЭВМ не вызывают никаких затруднений, трудоемким является только ввод и вывод информации. Полуэмпирические модели содержат уже процедуры численного решения дифференциальных уравнений в частных производных. Теоретические же модели чрезвычайно разнообразны по аппарату: от теории подобия и чисто аналитических выкладок до численного решения уравнений мезометеорологии с диффузией и трансформацией примесей как разностными методами, так и методом Монте–Карло. Особо следует отметить использование аппарата теории вероятности, который был основным у классиков, но в современных моделях играет весьма скромную роль. [5]

### **2.2.1 Гауссовы модели**

Загрязняющие воздух промышленные выбросы воздушными потоками выносятся из района расположения источника на значительное расстояние. Скорость и дальность переноса загрязнения зависит от турбулентности воздуха и существующего во время эмиссии загрязнения ветрового поля. Перенос выброса в атмосферном воздухе, как правило, относится к гауссову

типу переноса, поскольку среднее сечение выброса (факела) очень сходно с видом распределения Гаусса, имеющего форму колокола (рисунок 2.1).



**Рисунок 2.1 – Идеализированный выброс гауссового типа**

На рисунке 2.1  $\Phi$  – сечение выброса перпендикулярно направлению движения,  $h$  – высота трубы,  $H$  – общая высота выброса, которая является суммой высоты трубы и добавочной высоты, на которую поднимается выброс.

Гауссовы модели – одни из самых старых и наиболее популярных моделей рассеивания примесей. За основу гауссовых моделей было взято общее уравнение дисперсии для шлейфа от непрерывного точечного источника. Различают два вида гауссовых моделей: стационарные и нестационарные. [9,11,12]

Уравнение, описывающее распределение загрязняющего вещества для нестационарного случая выглядит следующим образом:

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{(2\pi^{\frac{3}{2}}\sigma_x\sigma_y\sigma_z)} \times \exp\left[-\frac{((x-x_0)-ut)^2}{2\sigma_x^2}\right] \times \exp\left[-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (2.2)$$

где  $C(x, y, z, t)$  – Концентрация загрязняющего вещества в точке с координатами  $x, y, z$  в момент времени  $t$ , [г/м<sup>3</sup>];

$Q$  – мощность непрерывного точечного источника загрязнения, [г/с];

$u$  – скорость ветра на высоте  $H$  метров, [м/с];

$H$  – эффективная высота источника загрязнения, [м];

$t$  – время транспорта, [с];

$\sigma_x, \sigma_y$  – горизонтальные дисперсии, [м];

$\sigma_z$  – вертикальная дисперсия, [м];

$x_0, y_0$  – координаты точечного источника загрязнения, [м].

Параметры  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  увеличиваются с расстоянием  $x - x_0$ , скорость увеличения зависит от интенсивности турбулентности и тем самым от стабильности атмосферы. Для практического использования зависимости  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  от расстояния определяются на основании экспериментальных данных. [11]

Интегрируя по времени концентрацию загрязнений, выбрасываемых из непрерывного источника, можно получить установившееся распределение концентрации для стационарной модели Гаусса:

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{(2\pi\sigma_y\sigma_z)} \times \exp\left[-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (2.3)$$

В обоих случаях направление ветра совпадает с направлением оси  $x$ . В гауссовой модели также предполагается, что имеет место отражение загрязняющего вещества от поверхности земли. Отражение характеризуется членом в фигурных скобках. Модель построена на предположении однородности и устойчивости атмосферы. [12]

Представленная модель имеет ряд недостатков:

- не учитывается рельеф поверхности;
- не учитывается изменение метеорологических параметров в пространстве и во времени;
- не описывается работа источников загрязнения работающих ограниченное время;
- используются характеристики полученные для наземных, а не приподнятых источников;
- не учитывается вертикальная структура пограничного слоя.

Гауссовы модели могут адекватно описывать распределение загрязняющего вещества только в горизонтальном направлении, для расчета вертикального профиля они применимы на очень коротких расстояниях. [12]

Эти модели отличается значительной простотой в использовании, их рекомендуют применять для расстояний (в направлении ветра) не более 10 км и при высоте источников не выше 100 м.

### 2.2.2 Модель Паскуилла-Гиффорда

В основе модели Паскуилла-Гиффорда лежит представление концентрации примеси, выбрасываемой непрерывным точечным источником в атмосфере, как струи с гауссовыми распределениями по вертикали и в поперечном к ветру направлении:

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{(2\pi\sigma_y(x)\sigma_z(x)u)} \times f_F f_W \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)}\right] \times \left(\exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right] + \exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_y^2(y)}\right]\right) \quad (2.4)$$

где  $x, y, z$  – декартовы координаты (ось  $z$  – вверх, ось  $x$  – по ветру);

$h$  – эффективная высота источника (т. е. высота с учетом первоначального подъема перегретой струи);



$Q$  – мощность источника выброса;

$C$  – концентрация примеси в данной точке пространства;

$u$  – скорость ветра, усредненная по слою перемешивания;

$\sigma_y(x) \sigma_z(x)$  – вертикальная и поперечная дисперсии облака примеси;

$f_F f_W$  – поправки на обеднение облака за счет сухого осаждения примеси и ее вымывания осадками.

Сумма экспонент в этой формуле соответствует поверхности земли, не поглощающей примесь, при абсолютном поглощении будет разность. Основным содержанием модели являются обобщающие многочисленные экспериментальные данные, конкретные функции  $\sigma_y(x)$  и  $\sigma_z(x)$  и выражения для  $h, f_W$  и  $f_F$ . При этом метеорологические условия подразделяются на 6 классов устойчивости атмосферы (от А до F). Распределение скорости ветра считают степенной функцией.

Для использования модели метеоусловия подразделяются на 6 классов устойчивости (таблица 1).

**Таблица 1**– Классы устойчивости атмосферы по Паскуиллу

Скорость ветра, м/с	Классы устойчивости атмосферы А–F				
	Дневное время. Уровень солнечного освещения			Ночное время. Облачность	
	Сильный	Средний	Слабый	>50%	<50%
<2	А	А–В	В	Е	F
2–3	А–В	В	С	Е	F
3–5	В	В–С	С	Д	Е
5–6	С	С–D	Д	Д	Д
>6	С	Д	Д	Д	Д

Распределение скорости ветра считают степенной функцией. Формулы для дисперсий  $\sigma_y(x)$  и  $\sigma_z(x)$  различны для разных рельефов: равнинных, сильно пересеченных, сельской местности, леса, города. Возможно использование более общих формул с заданием параметра шероховатости

земной поверхности. При сложном рельефе или наличии крупных водоемов рекомендовано проводить натурные эксперименты, иначе применение модели некорректно. [5]

Реализация модели Паскуилла-Гиффорда на ЭВМ достаточно проста, а время расчетов по ней пренебрежимо мало по сравнению с вводом и выводом информации. При появлении новых сведений для конкретной местности модель несложно пополнять.

До настоящего времени продолжается совершенствование данных моделей. Созданы различные версии модели TUPOS, где учитывается отличие направления и величины скорости ветра на уровень струи, более детально моделируется взаимодействие с лежащим выше струи теплым слоем воздуха (при наличии инверсии), уточняются коэффициенты в модели.

Данные модели чисто эмпирические, поэтому единственным критерием совершенствования является лучшее соответствие экспериментальным данным.

На практике источники выбросов не являются точечными источниками в строгом смысле этого слова, но для упрощения математического описания их можно считать таковыми. Характер детализации данной модели позволяет учитывать особенности местных метеорологических условий и производить расчеты распределения концентрации загрязняющих веществ в текущих метеоусловиях при различных величинах мощности выброса. [15]

Данная модель используют на расстоянии до 10 км. Эта модель является рабочей моделью Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ).

### **2.2.3 Модели Эйлера и Лагранжа**

В основе Эйлеровой и Лагранжевой моделей лежит возможность математического представления движения жидкости (воздушной среды) в переменных Эйлера или Лагранжа. В первом случае аргументом является совокупность координат точек пространства, а компоненты вектора скорости

жидкости в данной точке пространства являются функциями этих координат и времени. Во второй рассматривают некоторую бесконечно малую частицу жидкости в фиксированный момент времени  $t_0$  с координатами  $(x_0, y_0, z_0)$  и, перемещаясь вслед за ней, рассматривают ее координаты в последующие моменты как функции времени и ее начальных координат. Таким образом, во втором случае скорости частиц представляют собой производные от координат по времени. Используя каждый из подходов в той или иной модели получают модели Эйлера или Лагранжа.

Модель Эйлера обладает рядом преимуществ по сравнению с Гауссовыми моделями, поскольку позволяет учесть не стационарность источника выброса, влияние пространственных и временных вариаций метеорологических величин на распространение примеси, использовать полуэмпирические модели приземного слоя атмосферы для более реалистического описания турбулентности. Эйлеровы модели также различаются между собой в зависимости от способа получения метеорологических величин – скорости ветра и коэффициента турбулентной диффузии. Эти модели в отличие от Гауссовых достаточно сложны, требуют значительного времени счета на ЭВМ, что до недавнего времени сдерживало их практическое использование. Однако широкое распространение персональных ЭВМ высокого уровня полностью решило эти проблемы, что и позволяет использовать эти модели в режиме реального времени (on-line) для проведения диагностических прогнозов по загрязнению внешней среды. [13]

При заданных метеорологических параметрах (продольной и поперечной скоростях ветра, коэффициенте турбулентной диффузии и поперечной (относительно направления распространения примеси) дисперсии) не существует принципиальных проблем расчета концентраций в любой точке пространства в направлении выброса примеси. Если и возникают определенные затруднения в оценке концентрации в поле пространственно-временных измерений скорости ветра, то они, в первую очередь, связаны с некорректным измерением этих метеовеличин.

Определенное преимущество перед Эйлеровыми имеют модели, основанные на Лагранжевом подходе. В этих моделях непрерывная струя обычно представляется в виде последовательности дискретных клубов. Для каждого клуба рассчитывается траектория его движения в меняющемся во времени и пространстве поле ветра и рассчитывается диффузионный перенос в направлениях перпендикулярных к траектории. Концентрацию примеси в любой точке пространства представляют как сумму вкладов от каждого лагранжевого элемента. [13]

В Лагранжево-Эйлеровой модели переноса и рассеяния примеси ее горизонтальный перенос описывается с помощью понятия Лагранжевой траектории движения клуба примеси, а для описания атмосферной диффузии клуба в вертикальном направлении на каждом шаге вычисления горизонтальной траектории решают полуэмпирическое одномерное уравнение турбулентной диффузии. В горизонтальном направлении, перпендикулярном траектории клуба, концентрация примеси описывается Гауссовой функцией с дисперсией, зависящей от продолжительности распространения клуба и устойчивости атмосферы. Модель достаточно сложна и при ее использовании в целях прогнозирования загрязнения окружающей среды кроме измерений скорости ветра, температуры, направления ветра на нескольких уровнях в приземном слое атмосферы, необходимых для расчета таких параметров как масштаб Монина-Обухова и динамической скорости, требуются измерения вектора скорости ветра на эффективной высоте и величины геострофического ветра на высоте пограничного слоя атмосферы, что, в свою очередь, требует шаропилотного зондирования атмосферы. Лагранжево-Эйлерову модель наиболее целесообразно использовать для оценки загрязнения воздушного бассейна при трансграничном переносе примеси (свыше 1000 км и более). [13]

### 2.2.4 Модель Института экспериментальной метеорологии

Модель Института экспериментальной метеорологии создана для использования на расстоянии до 100 км. Данная модель пригодна как для описания распространения облака, созданного мгновенным источником, так и струи от непрерывного источника.

Распределения концентрации примеси по всем трем координатам имеют гауссову форму, как и в модели Паскуилла-Гиффорда, однако положение центра облака или струи находят интегрированием кинематического уравнения:

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{u}(t), \quad (2.5)$$

где  $\vec{u}(t)$  – скорость ветра в точке, где облако в настоящий момент находится,  $\vec{x}$  – вектор координат центра облака,  $t$  – время движения.

Процесс диффузии в перпендикулярных к ветру направлениях рассматривают как функцию времени, в отличие от чисто пространственных распределений в модели Паскуилла-Гиффорда.

Зависимости дисперсий облака по всем координатам как функции от времени задают формулами, в которые входит параметр Монина-Обухова, заменяющий в качестве характеристики устойчивости атмосферы классы устойчивости Паскуилла. Известна приближенная связь между этими двумя параметрами.

В модели учитывают поворот и изменение модуля скорости ветра с высотой.

Данная модель при наличии только простейших метеоданных, то есть однократного измерения скорости и направления ветра на уровне флюгера, почти не имеет преимуществ по сравнению с более простой моделью Паскуилла-Гиффорда. Ее преимущества реализуются с увеличением информации.

Во-первых, необходимы измерения вектора скорости ветра в процессе распространения облака. Эти сведения могут быть отчасти заменены использованием модели атмосферных течений при заданных метеоусловиях.

Во-вторых, нужно знать высоту слоя перемешивания. Фактическое измерение практически невозможно, если не ориентироваться на специальный комплекс измерений, в частности, запуск шаров-зондов во время аварии. Поэтому следует использовать эмпирическую модель, созданную по результатам аэрологических измерений в окрестностях Красноярска. Но, такую модель еще нужно создать. Некоторые другие необходимые параметры атмосферы придется задавать таким же способом.

В модели используется карта свойств подстилающей поверхности, которая должна быть создана с учетом сезонной зависимости. [5]

### **2.2.5 Модель Берлянда (ОНД-86)**

В России и некоторых других странах бывшего СССР для расчета локального загрязнения атмосфера выбросами промышленных предприятий применяется методика ОНД-86, сводящая к последовательности аналитических выражений, полученных в результате аппроксимации разностного решения уравнения турбулентной диффузии. Методика ОНД-86 позволяет рассчитывать максимально возможное распределение концентрации выбросов в условиях умеренно неустойчивого состояния атмосферы и усредненные по 20-30 минутному интервалу, но не учитывает такие факторы, как класс устойчивости атмосферы и шероховатость подстилающей поверхности. Методика применима для расчёта концентраций примеси на удалении от источника не более 100 км.

ОНД-86 представляет собой негауссову нормативную модель распространения загрязнителя от множественных источников, разработанную группой специалистов Главной геофизической обсерватории. В ее основе лежат аналитические аппроксимации численного решения уравнения диффузии, первоначально полученные для одиночных источников

загрязнения, а затем интегрированные для представления линейных и рассредоточенных по площади источников загрязнения.

Расчет рассеивания загрязняющих веществ (ЗВ) производится в соответствии с нормами ОНД-86 для приземного слоя атмосферы – на высоте 2,0 м от поверхности земли, а также для вертикального распределения концентраций.

Степень опасности загрязнения атмосферного воздуха характеризуется наибольшим рассчитанным значением концентрации  $c_m$ , соответствующим неблагоприятным метеорологическим условиям, в том числе опасной скорости ветра. Нормы не распространяются на расчет концентраций на дальних (более 100 км) расстояниях от источников выброса.

В зависимости от высоты  $H$  устья источники загрязнения атмосферы подразделяются на четыре класса:

- а) высокие источники,  $H > 50$  м;
- б) источники средней высоты,  $H = 10 \dots 50$  м;
- в) низкие источники,  $H = 2 \dots 10$  м;
- г) наземные источники,  $H < 2$  м.

При этом в расчетах для наземных источников принимается значение  $H = 2$  м. В расчетных формулах длина (высота) выражена в метрах, время – в секундах, масса загрязняющих веществ – в граммах, их концентрация в атмосферном воздухе – в мг/м<sup>3</sup>, концентрация на выходе из источника – в г/м<sup>3</sup>.

При проведении расчетов не используются значения скорости ветра  $u < 0,5$  м/с, а также скорости ветра  $u > u^*$ , где  $u^*$  – значение скорости ветра, превышаемое в данной местности в среднем многолетнем режиме в 5% случаев. Это значение запрашивается в местных органах Росгидромета или определяется по климатическому справочнику.

Степень загрязнения атмосферного воздуха характеризуется наибольшим рассчитанным значением концентрации  $c_m$  при

неблагоприятных метеорологических условиях, соответствующих выбору коэффициента  $A$  и опасной скорости ветра  $u_m$ .

Согласно ОНД-86 максимальное значение приземной концентрации вещества  $c_m$  (мг/м<sup>3</sup>) при выбросе газовой смеси из одиночного точечного источника с круглым устьем на расстоянии  $X_m$  (м) от источника определяются по формуле, полученной на основе решения уравнения турбулентной диффузии:

$$c_m = \frac{A \times M \times F \times m \times n \times \eta}{H^2 \times \sqrt[3]{V_1 \times \Delta T}}, \quad (2.7)$$

а в случае холодных выбросов – по формуле:

$$c_m = \frac{A \times M \times F \times n}{H^{\frac{4}{3}}} \times K, \quad (2.8)$$

где  $M$  – масса вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени, г/с;

$F$  – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе:

– для газов и мелкодисперсных аэрозолей со скоростью упорядоченного оседания, практически равной нулю,  $F = 1$ ;

– для мелкодисперсных аэрозолей (кроме первого случая) при степени очистки отходящих газов более 90%  $F = 2$ ;

– для мелкодисперсных аэрозолей (кроме первого случая) при степени очистки отходящих газов 75÷90%  $F = 2,5$ ;

– для мелкодисперсных аэрозолей (кроме первого случая) при степени очистки отходящих газов менее 75%  $F = 3$ ;

$m$  и  $n$  – коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из устья источника;

$A$  – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы:



**Таблица 2.1 – Значение коэффициента А для разных областей Земли**

Территория	А*
Районы Средней Азии южнее 40° с.ш., Бурятии и Читинской области	250
Субтропическая зона Средней Азии (ниже 40° с. ш.)	240
Европейская часть территории бывшего СССР: районы России южнее 50° с.ш., остальные районы Ниж. Поволжья, Кавказа, Молдовы; азиатская территория РФ, Казахстан, Дальний Восток, остальная территория Сибири и Средней Азии	200
Европейская часть РФ и Урал от 50 до 52° с. ш. за исключением попадающих в эту зону перечисленных выше районов и Украины	180
Европейская территория России и Урала севернее 52° с.ш. (за исключением центра ЕТС), а также для Украины (при высоте источников менее 200 м в зоне от 50 до 52° с.ш. – 180, южнее 50° с.ш. – 200)	160
Московская, Тульская, Рязанская, Владимирская, Калужская, Ивановская обл.	140
Центральная часть Европейской территории РФ	120

\*) – для других территорий значения А принимаются по сходству климатических условий турбулентного обмена.

$\eta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности (для слабопересеченной местности с перепадом высот, не превышающий 50 м на 1 км принимается равным 1);

$H$  – высота выброса над уровнем земли, м (для наземных источников принимается  $H=2$  м);

$\Delta T$  – разность между температурой выбрасываемой газовой смеси  $T_2$  и температурой окружающего атмосферного воздуха  $T_e$  0 °С;

$V_1$  – расход газовой смеси:

$$V_1 = \frac{\pi D^2}{4} \times w_0, \quad (2.9)$$

где  $D$  – диаметр устья источника выброса, м;

$w_0$  – средняя скорость выхода газовой смеси из устья источника выброса, м/с;

$$K = \frac{D}{8 \times V_1} = \frac{1}{7,1 \times (w_0 \times V_1)^{1/2}}; \quad (2.10)$$

Значения массовых выбросов  $M$ , г/с, и расхода газовой смеси  $V_1$ , м<sup>3</sup>/с, принимаются по технологической части вновь строящихся и реконструируемых предприятий, а для действующих – по данным инвентаризации.

При определении значения  $\Delta T$ , °С, следует принимать температуру окружающего атмосферного воздуха  $T_{\text{с}}$ , °С, равной средней максимальной температуре наружного воздуха наиболее жаркого месяца по СНиП 2.01.01-82 [14], а температуру выбрасываемой в атмосферу газовой смеси  $T_{\text{г}}$  – по действующим для данного производства технологическим нормативам. Для котельных, работающих по отопительному графику, допускается при расчетах принимать значения  $T_{\text{с}}$  равными средним температурам наружного воздуха за самый холодный месяц.

Значения коэффициентов  $m$  и  $n$  определяются в зависимости от параметров  $f$ ,  $v_m$  по формулам (2.11) и (2.12):

$$f = \frac{10^3 \times w_0^2 \times D}{H^2 \times \Delta T}, \quad (2.11)$$

$$v_m = 0,65 \times \sqrt[3]{\frac{V \times \Delta T}{H}}. \quad (2.12)$$

Значение  $m$  рассчитывается в зависимости от параметра  $f$  по одной из следующих формул из таблицы 2.2:

**Таблица 2.2 – Расчет значения коэффициента  $m$**

$f < 100$ :	$m = \frac{1}{0,67 + 0,1 \times \sqrt{f} + 0,34 \times \sqrt[3]{f}}$
$f \geq 100$ :	$m = \frac{1,47}{\sqrt[3]{f}}$

Значения коэффициента  $n$  выбирается из таблицы в зависимости от значения параметра  $v_m$ :

**Таблица 2.3 – Расчет значения коэффициента  $n$**

$v_M \leq 0,3$	$n = 3$
$0,3 < v_M \leq 2$	$n = 3 - \sqrt{(v_M - 0,3)(4,36 - v_M)}$
$v_M > 2$	$n = 1$

Максимальная концентрация вредного вещества  $x_M$  наблюдается на расстоянии, которое определяется по следующей формуле:

$$x_M = \frac{5 - F}{4} \times d \times H, \quad (2.13)$$

где  $d$  – безразмерный коэффициент, зависящий при нагретых выбросах от параметра  $v_M$  и вспомогательного фактора  $f$ , а в случае холодных выбросов – только от параметра  $v_M$ .

**Таблица 2.4 – Расчет значения коэффициента  $d$  для нагретых и холодных выбросов**

	Для нагретых выбросов ( $f < 100$ )	Для холодных выбросов ( $f \geq 100$ или $\Delta T = 0$ )
$v_M \leq 0.5$	$d = 2.48 \times (1 + 0.28\sqrt[3]{f})$	$d = 5.7$
$0.5 < v_M \leq 2$	$d = 4.95 \times v_M \times (1 + 0.28\sqrt[3]{f})$	$d = 11.4 \times v_M$
$v_M > 2$	$d = 7 \times \sqrt{v_M} \times (1 + 0.28\sqrt[3]{f})$	$d = 16.1 \times \sqrt{v_M}$

В формулу расчета  $c_M$  в скрытой форме входит скорость ветра. Чем больше скорость ветра, тем больше турбулентность атмосферы и тем интенсивнее распространяются примеси в окружающей среде. В то же время, с увеличением скорости ветра уменьшается высота факела над устьем трубы. Опасная скорость ветра не является метеорологическим фактором и для одного и того же производственного здания, на котором имеются различные источники выбросов, она может иметь различные численные значения для каждого источника в зависимости от его характера.

Значение опасной скорости ветра  $u_M$  м/с, на уровне флюгера (обычно 10 м от уровня земли), при которой достигается наибольшее значение приземной концентрации вредных веществ, определяется по формулам из таблицы 2.5:

**Таблица 2.5 – Расчет опасной скорости ветра  $u_m$  м/с, для нагретых и холодных выбросов**

	Для нагретых выбросов ( $f < 100$ )	Для холодных выбросов ( $f \geq 100$ или $\Delta T = 0$ )
$v_m \leq 0.5$	$u_m = 0.5$	$u_m = 0.5$
$0.5 < v_m \leq 2$	$u_m = v_m$	$u_m = v_m$
$v_m > 2$	$u_m = v_m \times (1 + \sqrt{0.12 \times f})$	$u_m = 2.2 \times v_m$

При опасной скорости ветра  $u_m$  приземная концентрация вредных веществ  $c$ ,  $мг/м^3$ , в атмосфере по оси факела выброса на различных расстояниях  $x$ , м, от источника выброса рассчитывается по формуле (2.15):

$$c = s_1 \times c_m, \quad (2.14)$$

где  $s_1$  – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от отношения  $x/x_m$  и коэффициента  $F$  (таблица 2.5):

**Таблица 2.6 – Расчет безразмерного коэффициента  $s_1$**

$x/x_m \leq 1$	$s_1 = 3 \times (x/x_m)^4 - 8 \times (x/x_m)^3 + 6 \times (x/x_m)^2$
$1 < x/x_m \leq 8$	$s_1 = \frac{1.13}{0.13 \times (x/x_m)^2 + 1}$
$x/x_m > 8$ и $F = 1$	$s_1 = \frac{x/x_m}{3.58 \times (x/x_m)^2 - 35.2 \times (x/x_m) + 120}$
$x/x_m > 8$ и $F > 1$	$s_1 = \frac{1}{0.1 \times (x/x_m)^2 + 2.47 \times (x/x_m) - 17.8}$

Пользуясь формулой для расчета концентрации и зная в каждом конкретном случае расстояние  $x$  от источника выброса до начала населенного пункта (жилой застройки), можно рассчитать концентрацию ЗВ в атмосферном воздухе населенного пункта.

Если  $x/x_m = 1$ , то  $s_1 = 1$  и  $c_x = c_m$ . Для всех других отношений  $x/x_m$  имеем  $s_1 < 1$  и  $c_x < c_m$ . Для низких наземных источников (высотой  $2 \leq H < 10$  не более 10 м) при значениях  $x/x_m < 1$  величина  $s_1$  заменяется на величину  $s_{1H}$ , определяемую в зависимости от  $x/x_m$  и  $H$ :

$$s_{1H} = 0.125 \times (10 - H) + 0.125 \times (H - 2) \times s_1. \quad (2.15)$$

Значение приземной концентрации вредных веществ в атмосфере  $c_y$ ,  $мг/м^3$ , на расстоянии  $y$ , м, по перпендикуляру к оси факела выброса рассчитывается по формуле:

$$c_y = s_2 \times c, \quad (2.16)$$

где  $s_2$  – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от скорости ветра  $u$ , м/с и отношения  $y/x$  по значению аргумента  $t_y$  (таблица 2.7):

**Таблица 2.7 – Определение безразмерного коэффициента  $s_2$**

$u \leq 5$	$t_y = u \times \frac{y^2}{x^2}$
$u > 5$	$t_y = 5 \times \frac{y^2}{x^2}$

$$s_2 = \frac{1}{(1 + 5t_y + 12.8t_y^2 + 17t_y^3 + 45.1t_y^4)^2} \quad (2.17)$$

Полное описание методики приведено в источнике [16].

### 2.2.6 Модель факела «Лагранжа-Гаусса»

Данная модель рассчитывается по формуле:

$$C(x, y, z) = \frac{Q(x_i, y_i, z_i)}{2\pi\sigma_x\sigma_y u} \times \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right), \quad (2.6)$$

где  $Q(x_i, y_i, z_i)$  – функция источника примеси;

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – дисперсионные коэффициенты, учитывающие характер распределения примеси по осям  $x, y, z$  в зависимости от климатических, промышленных, рельефных и других особенностей местности и определяющиеся эмпирическим путем;

$u$  – средняя скорость ветра;

$H$  – высота источника.

В данной модели учитывается высота источника  $H$ , а также средняя скорость ветра  $u$  по направлению оси  $x$ . Основными недостатками модели является сложность определения коэффициентов  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ . [10]

### 2.3 Модели EPA

Согласно списку EPA (англ. United States Environmental Protection Agency – Агентство по охране окружающей среды США) в настоящее время наиболее рекомендуемыми моделями являются: BLP, CALINE3, CALPUFF, CTDMPLUS, ISC3 и OCD [17]. Все эти модели (и многие другие) доступны для загрузки на официальном веб-сайте EPA, ссылка на который находится в источнике [18].

Далее будет приведен краткий обзор этих моделей.

BLP (Buoyant Line и Point Source Model) – это дисперсионная модель гаусса, которая обрабатывает уникальные задачи моделирования, связанные с имитацией загрязнения на заводах по восстановлению алюминия и других промышленных объектах, где актуален эффект распространения шлейфов и скос воздействия от линейных стационарных источников. Эта модель может быть использована в равнинной, сельской местности в пределах 50 км и может включать в себя до 50 точечных источников и 10 линейных. [19]

CALINE3 (California Line Source Dispersion Model) – модель третьего поколения, разработанная Калифорнийским департаментом транспорта. Она основана на Гауссовом уравнении атмосферной диффузии и предназначена для прогнозирования концентрации вредных веществ в атмосфере вблизи автомобильных дорог. Прогнозы могут быть сделаны для окиси углерода, двуокиси азота и взвешенных частиц. [20]

CTDMPLUS (Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithms for Unstable Situations) – это стационарная Гауссова модель воздействия точечного источника выбросов на качество атмосферного воздуха, которая может быть использована на местностях с рельефом любой сложности. Модель в полном объеме содержит CTDM технологии при стабильных и нейтральных условиях. Тем не менее, CTDMPLUS также может моделировать время суток, нестабильные условия, и имеет ряд дополнительных возможностей для повышения удобства пользователя. Методы использования этой моделью метеорологических данных и

информации о местности отличается от других моделей EPA: ввода многих данных для обоих типов информации не требуется, поскольку эти данным добываются препроцессорами, разработанными специально для CTDMPLUS. Модели необходимы параметры отдельных возвышенностей, которые модель получает, используя препроцессор местности и связь каждого модельного рецептора с конкретной возвышенностью. [22]

CALPUFF – это передовая интегрированная многослойная многовидовая нестационарная Гауссова модель атмосферной дисперсии, которая имитирует воздействие изменения пространственно-временных метеорологических условий на загрязнении окружающей среды транспортом. Модель CALPUFF предназначена для имитации дисперсии в дискретных или непрерывных моментах времени и областях источников загрязнения, а также дисперсии плавучих, непрерывных линейных источниках. Модель также учитывает алгоритмы для обработки эффект скоса зданиями лежащими на пути шлейфов загрязнения. Данная модель может быть применена в масштабах от десятков до сотен километров. [21]

Модель позволяет использовать до 40 точечных источников, 400 рецепторов и 25 возвышенностей. Рецепторы и источники допустимы в любом месте, а склоны возвышенностей не должны превышать 15 градусов.

Isc3 (Industrial Source Complex) – стационарная модель шлейфа Гаусса, которая может быть использована для оценки концентрации загрязняющих веществ из широкого спектра источников, связанных с промышленным комплексом. Эта модель учитывает следующее:

- оседание и сухое отложение частиц;
- скос;
- точечные, площадные, линейные и объемные источники загрязнения;
- распространение шлейфа по ветру как функция расстояния;
- ограниченная регулировка местности.

Isc3 работает как в долгосрочных, так и в краткосрочных режимах. [23]

## **Выводы по разделу**

1. Приведена классификация основных моделей, используемых для оценки загрязнения атмосферы. Показано, что в большинстве стран СНГ используются в основном модели аналитико-эмпирического типа, в то время как в западных странах предпочитают модели численного типа.

2. Рассмотрены математические модели распространения веществ в атмосфере, такие как модели Гаусса, Эйлера, факела «Лагранжа-Гаусса» Берлянда (ОНД-86). Показаны их преимущества и недостатки при применении на практике.



### 3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРЕ

Для разработки математической модели, описывающей процесс распространения загрязняющих веществ в атмосфере методом цифровой волны, разобьем исходную задачу на три независимые подзадачи:

- 1) подзадача моделирования движения воздуха в атмосфере;
- 2) подзадача моделирования распространения веществ в атмосфере за счет диффузии;
- 3) обобщенная задача моделирования распространения веществ.

Для решения указанных подзадач будем считать, что земная поверхность представлена в виде регулярной двумерной решетки. Моделирование концентраций веществ будет происходить в ее узлах в пространственно-временных координатах. Предполагается, что расчетное значение концентрации в каждом узле представляет собой усредненное относительно высоты  $z$  значение. При дальнейшем развитии модели это значение может быть использовано в качестве начального для расчета распределения концентрации по высоте  $z$ .

Суть метода цифровой волны заключается в поиске кратчайшего пути на планарном графе. Данный алгоритм работает на замкнутом поле произвольной формы и состоит из трех этапов.

1. Инициализация. Все поле разбивается на множество прямоугольных ячеек, среди которых две ячейки – стартовая и финишная. Все остальные ячейки подразделяется на два подмножества: подмножество проходимых и подмножество не проходимых (препятствий) ячеек.

2. Распространение волны. От стартовой ячейки порождается шаг во все соседние ячейки, если только они не принадлежат подмножеству не проходимых или ранее меченых ячеек. Если условия выполняются, то в ячейку записывается число шагов (т.н. фронт волны) до нее от стартовой (оно равно 1 на начальном этапе). Каждая ячейка меченная числом шагов от

стартовой, сама, на время, становится стартовой. Действия повторяются до тех пор, пока любой шаг будет невозможен.

3. Восстановление кратчайшего пути. Данный этап необходим для непосредственного нахождения кратчайшего пути между парой ячеек. Он происходит в обратном направлении, т.е. от финишной к стартовой. Здесь на каждом шаге выбирается ячейка, имеющая атрибут расстояния от стартовой на единицу меньше текущей ячейки. Данная часть алгоритма не актуальна для рассматриваемой математической модели и в дальнейшем использоваться не будет.

### 1.3. Исходная постановка задачи и разработка критериев устойчивости

Пусть  $F$  – дискретное множество точек, которое представляет собой узлы решетки. Каждую точку обозначим в виде  $f_{x,y}$ , где  $x, y$  – это координаты точек на плоскости. Учитывая, что решетка регулярная, можно считать что:

$$\begin{aligned} F &= \{f_{x,y}\}, \\ x &= h \times i, \\ y &= h \times j, \\ i &\in 1 \dots M, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где  $M$  – общее количество точек на одной оси;

$h$  – шаг решетки (см. рис. 3.1).

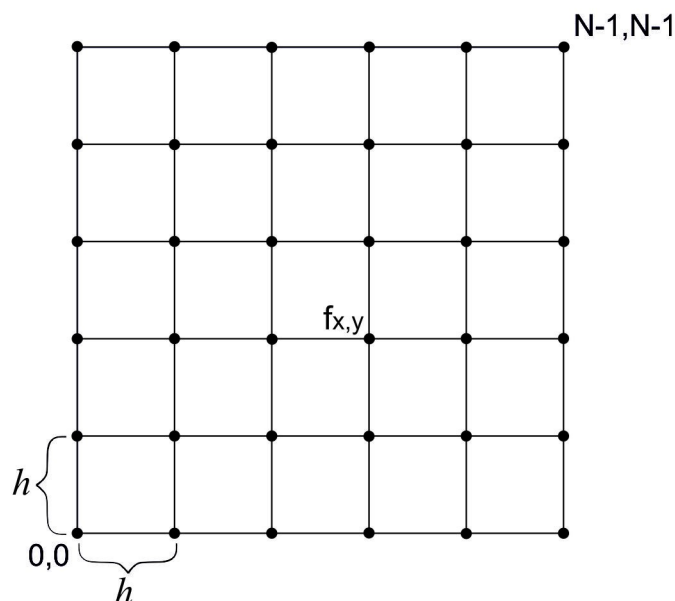
Поскольку данная задача решается в пространственно-временных координатах, введем множество  $T$ , которое представляет собой множество моментов времени моделирования:

$$\begin{aligned} T &= \{\tau_k\}, \\ \tau_k &= \tau_0 + k \times \Delta\tau, \end{aligned} \quad (3.2)$$

где  $\tau_0$  – начальный момент времени,

$k$  – временной шаг моделирования,

$\Delta\tau$  – длительность временного шага.



**Рисунок 3.1 – Регулярная решетка для разработки модели**

Исходя из принципа работы алгоритма распространения цифровой волны, расчет очередного ее фронта (в момент времени  $\tau + 1$ ) производится только для соседних ячеек решетки по данным текущей ячейки в момент времени  $\tau$ . Поэтому, если максимальная скорость распространения примеси окажется намного больше отношения шага решетки к длительности временного шага, модель может оказаться неустойчивой. Исходя из этого, потребуем, чтобы выполнялось соотношение:

$$\frac{h}{\Delta\tau} > V_{\max}. \quad (3.3)$$

Параметры  $h$  и  $\Delta\tau$  являются исходными данными и определяются пользователем в начале моделирования. Максимальная скорость распространения примеси состоит из двух составляющих: максимально возможная скорость ветра и максимально возможная скорость естественного распространения примеси (диффузии):

$$V_{\max} = V_{\max \text{ wind}} + V_{\max \text{ dif}}, \quad (3.4)$$

где – максимально возможная скорость ветра для исследуемой территории; определяется эмпирическим путем по данным субъектов экологического мониторинга как максимальная скорость ветра для исследуемой территории за последние 5 лет.

– максимально возможная скорость распространения примесей за счет турбулентной диффузии для заданного вещества; определяется в зависимости от коэффициента турбулентной диффузии для заданного вещества и текущих метеорологических параметров (температура, влажность, давление).

### 3.1 Подзадача моделирования движения воздуха в атмосфере

Для решения подзадачи моделирования движения воздушных масс в решетке, изображенной на 3.1, будем считать, что каждый узел имеет следующие характеристики:

- вектор направления движения воздушных масс;
- вектор препятствия.

Как известно, каждый вектор  $A$ , имеет следующие параметры:

$A_x$  –  $x$  координата начальной точки вектора;

$A_y$  –  $y$  координата начальной точки вектора;

$\bar{A}$  – направление вектора (угол его наклона относительно оси абсцисс);

$|A|$  – абсолютная величина вектора.

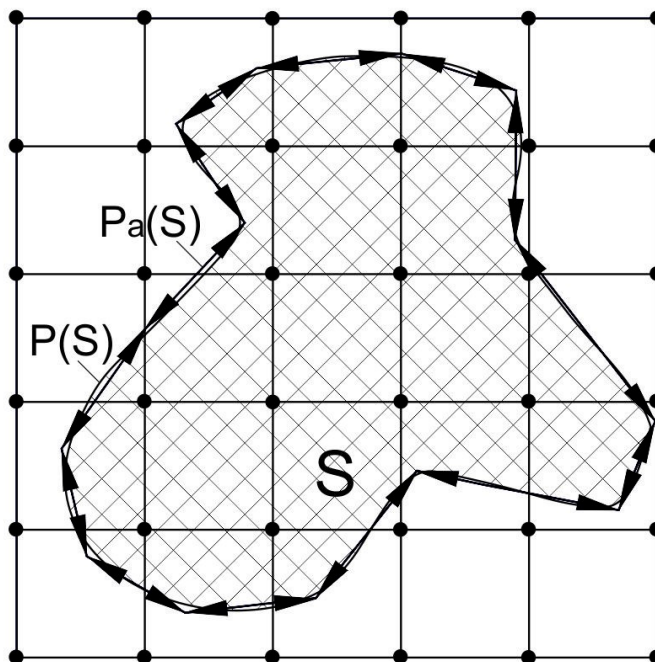
Вектор направления движения воздушных масс – это вектор, который характеризует направление и скорость ветра в узле решетки  $f_{x,y}$ . Обозначим данный вектор как  $W$ . Множество векторов  $W = \{w\}$  для каждого узла решетки  $F$  является результатом расчетов для данной подзадачи.

Векторы препятствия – это пара разнонаправленных векторов  $g^1$  и  $g^2$ , которые характеризуют наличие препятствий при распространении воздушных масс для рассматриваемого узла решетки  $f_{x,y}$ . Для определения характеристик этих векторов введем следующие обозначения.

Пусть имеется препятствие  $S$ , представленное в виде многоугольника, и  $P(S)$  – его замкнутый контур. Посредством аппроксимации данный контур можно представить в виде множества двунаправленных векторов  $P_a(S)$  (см. рис. 3.2), таких что:

$$P_a(S) = \{p^n\}, \quad n \in 1 \dots N, \quad (3.5)$$

где  $N$  – общее количество векторов.



**Рисунок 3.2 – Аппроксимирующий контур препятствия**

Каждый вектор  $p^n$  аппроксимирует часть контура препятствия, причем его конец всегда совпадает с началом следующего вектора из данного множества. Количество векторов  $N$  в множестве  $P_a(S)$  определяется степенью кривизны рассматриваемого препятствия  $S$  и допустимой погрешностью аппроксимации. Подзадача преобразования  $P(S)$  в  $P_a(S)$  в работе не рассматривается, поскольку большая часть препятствий на территории промышленного города имеет форму примитивных геометрических фигур.

Способ определения характеристик векторов препятствия  $g^1$  и  $g^2$  узла решетки  $f_{x,y}$  заключается в следующем:

– из множества  $P_a(S)$  выбирают подмножество векторов  $P_a'(S)$ , таких что:

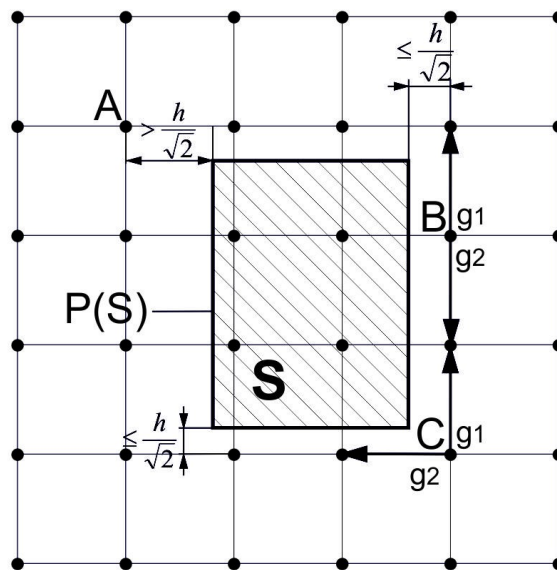
$$\begin{aligned}
 P_a'(S) &\in P_a(S), \\
 P_a'(S) &= \{p^{n'}\}, \\
 n' &\in 1..N', \\
 N' &\leq N, \\
 \sqrt{(p_x^{n'} - f_x)^2 + (p_y^{n'} - f_y)^2} &\leq \frac{h}{\sqrt{2}},
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

где  $N'$  – общее количество элементов в множестве  $P_a'(S)$ ;

$p_x^{n'}$ ,  $p_y^{n'}$  – x, y координаты вектора  $p^{n'}$ ;

$f_x$ ,  $f_y$  – x, y координаты рассматриваемого узла решетки;

– в случае если для рассматриваемой точки  $f_{x,y}$  множество  $P_a'(S)$  – пустое (например, для точки А на рисунке 3.3), то оба вектора препятствия  $g^1$  и  $g^2$  нулевые ( $|g^1| = 0$ ,  $|g^2| = 0$ );



**Рисунок 3.3 – Единичные и нулевые векторы препятствия**

– в случае если для рассматриваемой точки  $f_{x,y}$  множество  $P_a'(S)$  не пустое (например, для точек В и С на рисунке 3.3), оба вектора препятствия  $g^1$  и  $g^2$  – единичные ( $|g^1| = 1$ ,  $|g^2| = 1$ ). Ввиду того, что множество  $P_a'(S)$  описывает часть контура, причем его элементы являются двунаправленными, можно считать, что оно будет включать не менее двух элементов. Исходя из этого, разобьем множество  $P_a'(S)$  на два подмножества  $P_{a1}'(S)$  и  $P_{a2}'(S)$ . Это необходимо для определения

направлений векторов  $\bar{g}^1, \bar{g}^2$ . При этом в каждое подмножество будем включать такие вектора  $p^{n'}$ , чтобы угол между направлениями векторов подмножества стремился к минимальному значению (рисунок 3.4). Для этого можно использовать следующий алгоритм.

- 1) Упорядочим вектора  $p^{n'}$  по возрастанию их направлений  $\bar{p}^{n'}$ .
- 2) Вектор, имеющий минимальное направление, включим в конец множества повторно, причем к его направлению прибавим величину  $360^\circ$ .

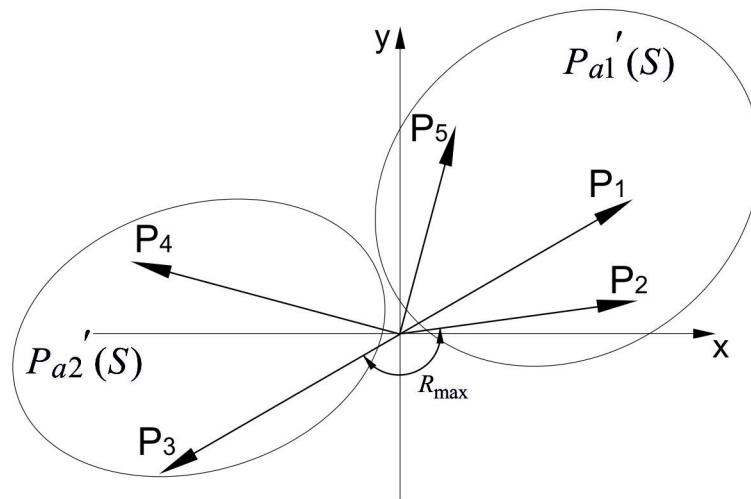
Для примера изображенного на рисунке 3.4, множество  $P_{a'}(S)$  будет иметь вид:  $P_{a'}(S) = \{p^2, p^1, p^5, p^4, p^3, p^{2'}\}$ ,  $\bar{p}^{2'} = \bar{p}^2 + 360$ .

- 3) Введем множество  $R$ , состоящее из значений первой разности направлений упорядоченных векторов множества  $P_{a'}(S)$ :

$$R = \{p^{n'} - p^{n'-1}\}. \quad (3.7)$$

- 4) Найдем наибольший элемент множества  $R$ :

$$\begin{aligned} R_{\max} &= \max \{R\}, \\ r' &= p^{n'}, \\ \bar{r}' &= R_{\max}. \end{aligned} \quad (3.8)$$



**Рисунок 3.4 – Разбиение множества  $P_{a'}(S)$  на два подмножества  $P_{a1'}(S)$  и  $P_{a2'}(S)$**

- 5) Формируем множества  $P_{a1'}(S), P_{a2'}(S)$  такие что:

$$\begin{aligned}
P_{a1}'(S) &\in P_a'(S), \\
P_{a2}'(S) &\in P_a'(S), \\
t &= \bar{r}' + \frac{R_{\max}}{2}.
\end{aligned} \tag{3.9}$$

5.1) Если  $t > 180$ , множества  $P_{a1}'(S)$ ,  $P_{a2}'(S)$  формируются согласно правилу (3.10):

$$\begin{aligned}
P_{a1}'(S) &= \left\{ p^{n'} : t - 180 < p^{n'} \leq t \right\}, \\
P_{a2}'(S) &= \left\{ p^{n'} : t < p^{n'} \leq t - 180 \right\}.
\end{aligned} \tag{3.10}$$

5.2) Если  $t \leq 180$ , множества  $P_{a1}'(S)$ ,  $P_{a2}'(S)$  формируются согласно правилу (3.11):

$$\begin{aligned}
P_{a1}'(S) &= \left\{ p^{n'} : t < p^{n'} \leq t + 180 \right\}, \\
P_{a2}'(S) &= \left\{ p^{n'} : t + 180 < p^{n'} \leq t \right\}.
\end{aligned} \tag{3.11}$$

б) Тогда направления векторов  $\bar{g}^1$  и  $\bar{g}^2$  определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
\bar{g}^1 &= \frac{\sum p^{n'}}{n_1}, \quad p^{n'} \in P_{a1}'(S), \\
\bar{g}^2 &= \frac{\sum p^{n'}}{n_2}, \quad p^{n'} \in P_{a2}'(S),
\end{aligned} \tag{3.12}$$

где  $n_1$ ,  $n_2$  – количество элементов в множествах  $P_{a1}'(S)$ ,  $P_{a2}'(S)$  соответственно.

Рассмотрим подзадачу распространения воздушных масс в узлах решетки F в условиях монотонного возрастания времени. Введем вектор  $u$ , характеризующий направление и скорость ветра.

Расчет характеристик множества W, которое представляет собой множество векторов, характеризующих направление и скорость ветра в каждой точке  $f_{x,y}$ , будем производить для всех моментов времени  $\tau_k$ . Это позволяет адекватно реагировать на изменения текущей скорости и направления ветра за пределами области, покрываемой решеткой F.

Для инициализации множества стартовых точек, которое необходимо для дальнейшего распространения цифровой волны, в начальный момент



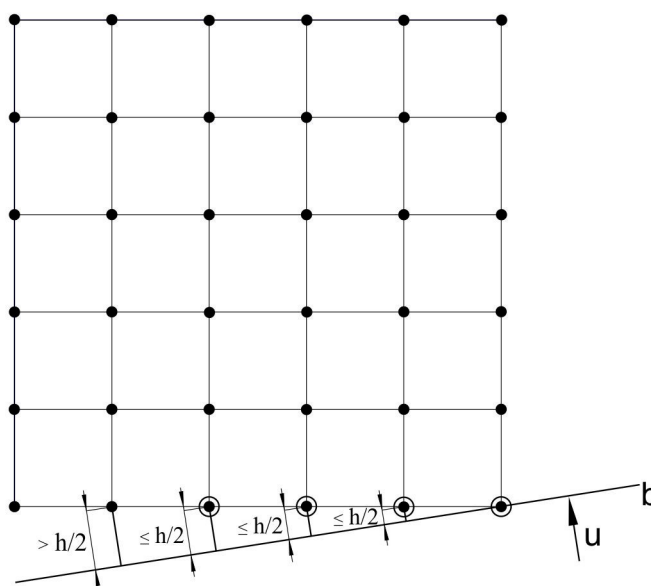
времени  $\tau_0$  проведем перпендикулярную прямую  $b$  к направлению вектора  $u$ , проходящую через первый с подветренной стороны узел  $f_{x,y}$  (рисунок 3.5). Присвоим характеристики вектора  $u$  всем векторам из множества  $W$ , для которых выполняется условие:

$$|f_{x,y}, b| \leq \frac{h}{2}, \quad (3.13)$$

где  $|f_{x,y}, b|$  – расстояние от прямой до точки  $f_{x,y}$ .

Инициализацию алгоритма необходимо повторять каждый раз, когда происходит изменение направления движения воздушных масс за пределами решетки  $F$ .

К примеру, на рисунке 3.5 в начальный момент времени  $\tau_0$  условие (3.13) выполняется для четырех выделенных точек.



**Рисунок 3.5 – Инициализация алгоритма распространения воздушных масс**

На каждом шаге моделирования  $\tau_k$  для каждого узла решетки  $f_{x,y}$  определяем ближайших соседей по принципу восьмисвязности, т. е.:

$$\begin{aligned} D &= \{d^i\}, \\ D &\in F, \\ i &\in 1..8, \\ |f_x - d_x^i| \leq 1 \vee |f_y - d_y^i| \leq 1, \\ f_x \neq d_x^i \wedge f_y \neq d_y^i, \end{aligned} \quad (3.14)$$

где  $D$  – множество соседних узлов для узла  $f_{x,y}$ ;

$d_x^i, d_y^i$  –  $x, y$  координаты узла  $d^i$ .

Из множества  $D$  исключаем те узлы, для которых значения векторов  $w$  еще не были определены, в том числе и для предыдущих моментов времени.

После этого характеристика вектора  $w$ , определяющего направление и скорость ветра в узле решетки  $f_{x,y}$ , определяется по принципу суперпозиции в соответствии с выражением (3.15):

$$\begin{aligned} \bar{w}_{x,y} &= \frac{\sum_{i=1}^n \bar{d}^i}{n}, \\ |w_{x,y}| &= \frac{\sum_{i=1}^n |d^i|}{n}, \end{aligned} \quad (3.15)$$

где  $n$  – количество элементов в модернизированном множестве  $D$ .

Если для узла  $f_{x,y}$  вектора препятствия  $\bar{g}^1$  и  $\bar{g}^2$  не являются нулевыми, то необходимо выполнить коррекцию направления  $\bar{w}$ . В основу данной коррекции положен второй закон отражения. В случае, если выполняется условие:

$$|\bar{g}^1 - \bar{w} + 180| + |\bar{g}^2 - \bar{w} + 180| \leq 180, \quad (3.16)$$

данная коррекция производится в соответствии с выражением (3.17):

$$\bar{w}' = 2 * \bar{g}^1 - \bar{w}, \quad (3.17)$$

где  $\bar{w}'$  – направление скорректированного вектора, характеризующего направление ветра в узле  $f_{x,y}$ .

Выражение (3.17) также может быть откорректировано в двух случаях:

- 1) если  $\bar{w}' > 360$ , то  $\bar{w}' = \bar{w}' - 360$ ;
- 2) если  $\bar{w}' < 0$ ,  $\bar{w}' = \bar{w}' + 360$ .

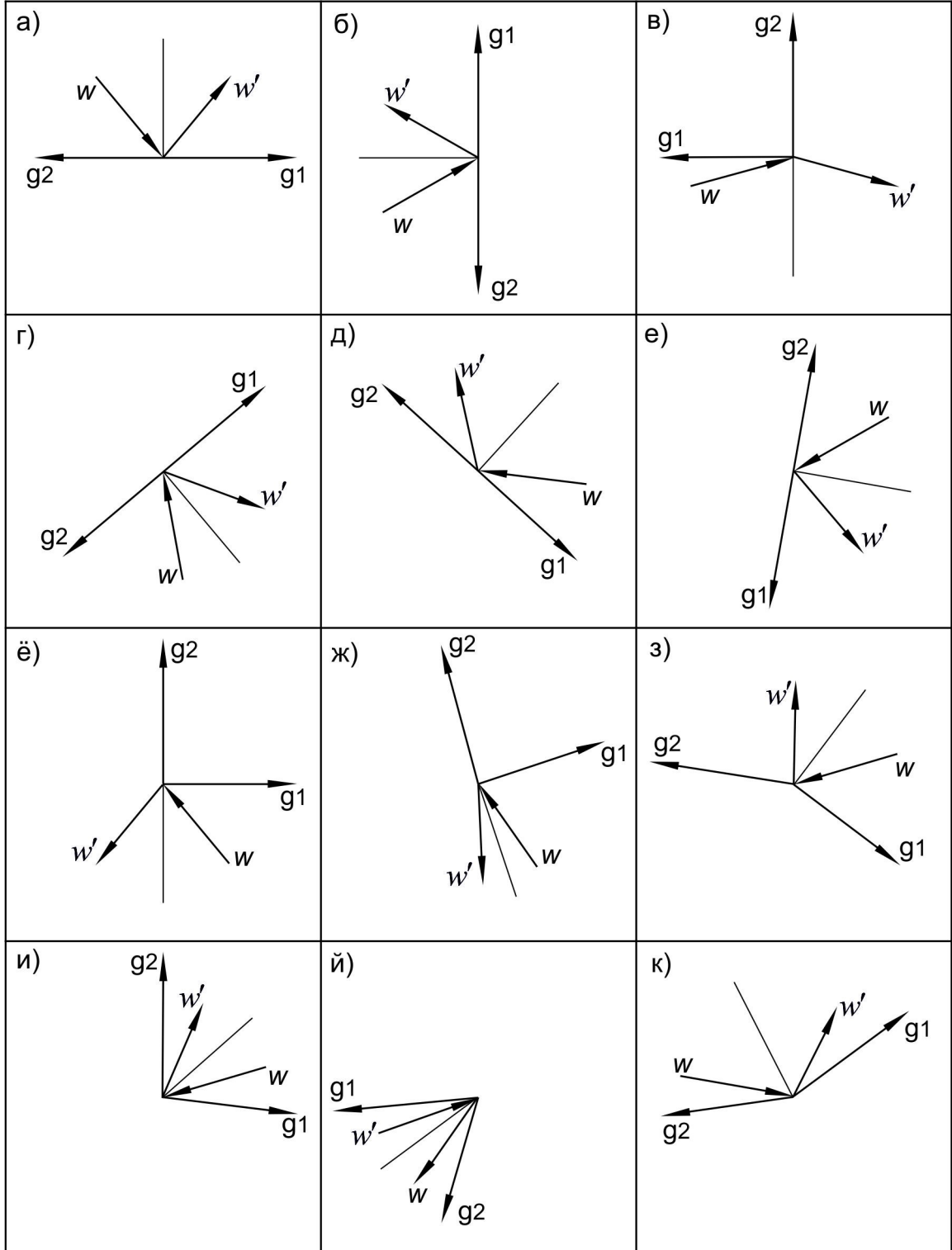
В случаях, когда выполняется условие:

$$|\bar{g}^1 - \bar{w} + 180| + |\bar{g}^2 - \bar{w} + 180| > 180, \quad (3.18)$$

коррекция производится в соответствии с выражением (3.19):

$$\bar{w}' = \bar{g}^1 - \bar{w} + 180 + |\bar{g}^2 - \bar{w} + 180| - \bar{w} + 180. \quad (3.19)$$

Сказанное демонстрирует рисунок 3.6, на котором показаны различные типовые ситуации расположения векторов препятствия  $\vec{g}_1, \vec{g}_2$ , падающего и отраженного векторов  $\vec{w}, \vec{w}'$ .



**Рисунок 3.6 – Различные типовые ситуации расположения векторов препятствия  $\vec{g}^1, \vec{g}^2$ , падающего и отраженного векторов  $\vec{w}, \vec{w}'$**

Т. о. рассмотренная подзадача моделирования движения воздушных масс, позволяющая определять основные характеристики движения (направление и скорость) в произвольный момент времени в произвольном узле регулярной решетки, может являться основой для разработки модели распространения загрязняющих веществ в атмосферном воздухе.

### **3.2 Подзадача моделирования распространения веществ в атмосфере за счет диффузии**

Ранее было показано, что основную задачу распространения веществ в атмосферном воздухе при наличии препятствий можно разбить на три независимые подзадачи. Данная подзадача описывает естественное распространение веществ за счет явления диффузии в условиях отсутствия ветра ( $u = 0$ ). Решение данной подзадачи является одной из важнейших частей рассматриваемой математической модели распространения веществ.

Исходными данными для решения указанной подзадачи являются:

– множество функций  $Q$ , которое описывает количество выбросов в условиях нерегулярного размещения источников выбросов:

$$Q = \{q_{x,y,\tau}\}, \quad (3.20)$$

где  $q_x, q_y$  –  $x, y$  координаты точки, в которой расположен источник выбросов;

$q_\tau$  – концентрация веществ источника в момент времени  $\tau_k$ .

Каждая функция источника вещества  $q_{x,y,\tau}$  может задаваться также и в дискретном виде, однако, частота дискретизации должна быть не хуже выбранного значения  $\Delta\tau$  (см. раздел 3.1).

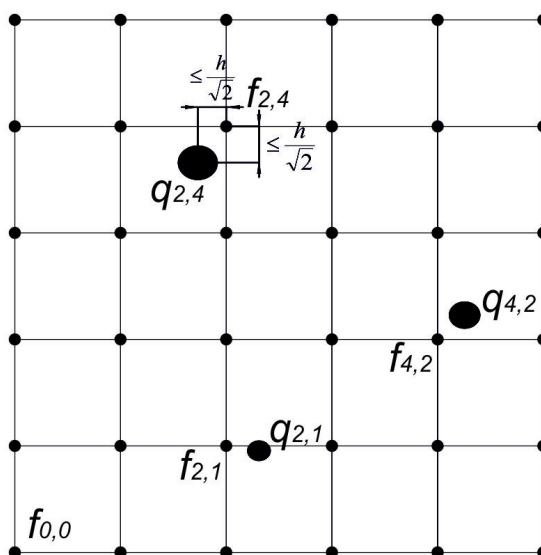
– коэффициент турбулентной диффузии  $Kt$ , определяющий естественное распространения вещества, который зависит от типа вещества и метеорологических параметров. Методика расчета коэффициента турбулентной диффузии подробно описана в работах [24, 25] и в данной подзадаче подробно не рассматривается.

Инициализация алгоритма распространения вещества в атмосфере за счет диффузии заключается в следующем. Для каждого источника  $q$  из множества  $Q$  определим координаты узла  $f_{x,y}$  решетки  $F$  по формуле:

$$\sqrt{(q_x - f_x)^2 + (q_y - f_y)^2} \leq \frac{h}{\sqrt{2}}. \quad (3.21)$$

Если источник вещества расположен строго в центре ячейки решетки  $F$ , т.е. условие (3.21) выполняется для нескольких узлов решетки, то необходимо выбрать любой из узлов.

К примеру, на рисунке 3.7 показано, что источник выбросов  $q_{2,4}$  относится к узлу решетки  $f_{2,4}$ , поскольку для этого узла выполняется условие (3.21).



**Рисунок 3.7 – Множество источников выбросов в условиях нерегулярного размещения**

Поскольку распространение вещества не зависит от места расположения источника, указанную подзадачу будем решать для каждого источника выбросов в отдельности. В дальнейшем, окончательное значение концентрации вещества  $C$  в точке  $f_{x,y}$  получим путем суммирования вкладов от каждого из источников, т.е.:

$$C_{x,y} = \sum_{i=1}^n c_{x,y}, \quad (3.22)$$

где  $n$  – количество элементов множества  $Q$  (количество источников вещества).

Для одного источника выбросов расчет концентрации вещества в произвольной точке  $f_{x,y}$  включает несколько этапов.

1. Предположим, что в момент времени  $\tau = 0$  значение концентрации во всех узлах решетки неопределенно, за исключением узла, к которому относится рассматриваемый источник выбросов. Концентрация в этом узле имеет значение  $q_{x,y,0}$ . Признаком неопределенности значения концентрации в точке будем считать значение, равное -1.

2. Если точка  $f_{x,y}$  находится внутри одного из контуров  $P(S)$  (см. рис. 3.2), то расчет концентрации  $c_{x,y}$  в этой точке не производится.

3. В произвольный момент времени  $\tau$  ( $\tau > 0$ ) из множества  $F$  выбираются соседние с  $f_{x,y}$  узлы, для которых значение концентраций было посчитано на предыдущих этапах, образующие множество  $L$ . Например, при  $\tau = 1$  будет выбран только один узел, к которому относится источник выброса.

4. Введем два множества: множество  $L1$ , в которое включим значения концентраций в соседних с  $f_{x,y}$  узлах по горизонтали и вертикали (3.23), и множество  $L2$ , в которое включим значения концентраций в соседних с  $f_{x,y}$  узлах по диагоналям (3.24):

$$\begin{aligned}
L1 &= \{l_{x,y,\tau}^1\}, \\
L1 &\in Q, \\
L1 &= \begin{cases} |f_x - l_x^1| = 0 \wedge |f_y - l_y^1| = 1, \\ |f_x - l_x^1| = 1 \wedge |f_y - l_y^1| = 0. \end{cases} \quad (3.23) \\
f_x &\neq l_x^1 \wedge f_y \neq l_y^1;
\end{aligned}$$

где  $l_x^1, l_y^1$  –  $x, y$  координаты узла с концентрацией из множества  $L1$ .

$$\begin{aligned}
L2 &= \{l_{x,y,\tau}^2\}, \\
L2 &\in Q, \\
L2 &= \begin{cases} |f_x - l_x^2| = 0 \wedge |f_y - l_y^2| = 1, \\ |f_x - l_x^2| = 1 \wedge |f_y - l_y^2| = 0. \end{cases} \quad (3.24) \\
f_x &\neq l_x^2 \wedge f_y \neq l_y^2;
\end{aligned}$$

где  $l_x^2, l_y^2$  –  $x, y$  координаты узла с концентрацией из множества  $L2$ ;

5. В момент времени  $\tau + 1$  значение суммы части концентрации вещества в центральном узле и элементах множества  $L1$  и  $L2$ , будет равно значению концентрации вещества в центральном узле в момент времени  $\tau$ .

$$c_{x,y,\tau} = \sum_{i=1}^4 l_{x,y,\tau+1}^1 + \sum_{i=1}^4 l_{x,y,\tau+1}^2 + q_{x,y,\tau} * Kof, \quad (3.25)$$

где  $Kof$  – коэффициент, который показывает количество вредного вещества, которое остается в центральной ячейке в результате действия процесса турбулентной диффузии; значение этого коэффициента будет описано ниже.

6. Исходя из того, что в регулярной решетке расстояние между соседними узлами по диагонали больше, чем расстояние по вертикали и горизонтали на величину  $\sqrt{2}$ , можно предположить, что значение концентрации в соседних узлах по диагонали будет меньше, чем расстояние по вертикали и горизонтали на величину  $\sqrt{2}$ .

7. Поскольку, для данной подзадачи, турбулентная диффузия является единственным процессом, влияющим на распространения вещества в атмосфере, можно утверждать, что значения концентраций внутри множеств

$L1$  и  $L2$  равны между собой. Тогда за основу для расчетов этих концентраций можно принимать коэффициент турбулентной диффузии и они будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} l_{x,y,\tau}^1 &= Kt, \\ l_{x,y,\tau}^2 &= \frac{Kt}{\sqrt{2}}. \end{aligned} \quad (3.26)$$

8. Выражение (3.25) с учетом (3.26) можно преобразовать следующим образом:

$$4 * Kt + 4 * \frac{Kt}{\sqrt{2}} + q_{x,y,\tau} * Kof = 1. \quad (3.27)$$

Приведя (3.27) к общему знаменателю и проведя элементарные математические преобразования, выведем значение коэффициента  $Kof$  :

$$Kof = \frac{1 - 4 * Kt - \sqrt{2} * Kt}{q_{x,y,\tau}}. \quad (3.28)$$

Т.о. в данном подразделе подзадача, основанная на использовании алгоритма цифровой волны, и не учитывающая распространении вещества за счет движения воздушных масс, может являться основой для разработки окончательной модели распространение веществ в атмосфере.

### 3.4 Обобщенная задача моделирования распространения вещества

В основу решения задачи моделирования распространения веществ могут быть положены частные решения подзадач, рассматриваемые в предыдущих разделах.

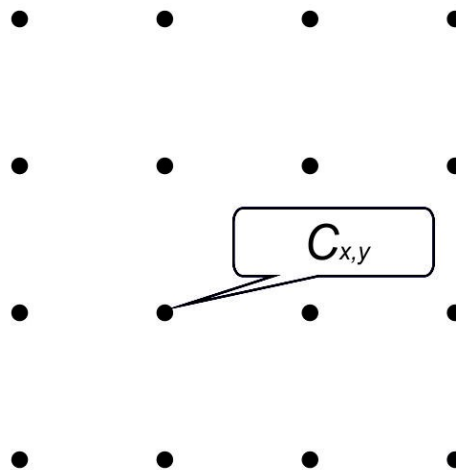
Ранее было показано, что задача моделирования распространения вещества может быть разбита на три независимые подзадачи, одна из которых является частным решением задачи моделирования распространения воздушных масс, а вторая – частным решением распространения вещества в условиях отсутствия ветра.

В данном подразделе будет рассмотрена обобщенная задача моделирования распространения вещества , использующая решение этих



подзадач. Сформулируем обобщенную задачу распространения следующим образом.

Пусть в каждый момент времени  $\tau$  концентрация вещества  $c_{x,y}$ , рассчитанная в соответствии с алгоритмом, приводимым в разделе 3.3, а также направление и скорость ветра  $w$ , определенные в частном решении задачи 3.2, как показано на рисунке 3.8.



**Рисунок 3.8 – Исходная постановка обобщенной задачи моделирования распространения вещества**

Решение данной задачи подразумевает перераспределение концентрации вещества  $c_{x,y}$  для соседних с выбранной точкой  $f_{x,y}$  узлов, пропорционально направлению и скорости ветра вектора  $w$ .

Решение данной задачи может быть представлено в виде следующих аксиом:

1) концентрация вещества подчиняется закону сохранения масс, который заключается в том, что масса физической системы сохраняется при всех природных и искусственных процессах, т.е.:

$$\sum C_{x,y} = const, \quad (3.29)$$

$$|f_x - C_x| \leq 1 \wedge |f_y - C_y| \leq 1.$$

2) перераспределение концентраций для соседних с  $f_{x,y}$  ячеек осуществляется пропорционально проекциям на оси абсцисс и ординат вектора  $w$ .

3) в случае если, для точки  $f_{x,y}$  одна из исходных характеристик не определена, обобщенный расчет концентрации для этой точки не производится.

На практике, процесс распространения веществ протекает бесконечно, однако при его моделирования он может быть остановлен в двух случаях:

- 1) остановка по требованию;
- 2) когда концентрация примеси во всех ячейках решетки длительное время не изменяется.

Т.о. предполагаемая обобщенная модель распространения вещества в атмосферном воздухе, учитывает ряд характеристик, которые существующими моделями сегодня не используются, в т. ч. препятствия на пути движения воздушных масс, изменения направления и скорости ветра в динамике.

### **Выводы по разделу**

1. Предложена математическая модель движения воздушных масс в атмосфере, отличающаяся от существующих учетом рельефных особенностей местности, препятствий на пути, представляющих собой расположения застроек и естественного движения воздуха. Это позволило получить более точные результаты моделирования движения воздуха.

2. Разработана математическая модель распространения вещества в атмосферном воздухе за счет естественного распространения диффузии в условиях отсутствия движения воздушных масс. Показано, что в основе данной модели использован метод цифровой волны, что позволяет учитывать расположение препятствий.

3. Разработан обобщенный метод моделирования распространения вещества в атмосфере, в основе которого лежат рассмотренные модели. Эти

позволило повысить точность моделирования распространения примесей в условиях нерегулярного расположения источников.

## 4 ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ВОЛНЫ

Метод моделирования распространения веществ в атмосфере при помощи цифровой волны в данной работе был апробирован апостериорным способом. В качестве эталонной модели была выбрана модель Берлянда (ОНД-86) из-за ее высокой устойчивости, а также, потому что она хорошо зарекомендовала себя на практике. Сегодня модель Берлянда используется для расчетов у субъектов экологического мониторинга в таких программных продуктах как ЭОЛ+, Пленер, УПРЗА Эколог.

### 4.1 Просчет значений концентраций

Для проведения оценки адекватности был сделан прогноз распространения вредных веществ в атмосфере на основании двух моделей: модели Берлянда и модели описанной в третьем разделе данного дипломного проекта. Для обеих моделей была посчитана концентрация в узлах решетки с одинаковыми параметрами, для одного и того же региона, в одинаковых метеорологических условиях и для одного и того же источника.

В качестве исходных данных были выбраны следующие значения:

вещество:  $NO_2$ ;

масса вещества: 30 г;

диаметр устья источника выброса: 4 м;

средняя скорость выхода:  $12,74 \text{ м}^3/\text{с}$ ;

температура окружающего атмосферного воздуха:  $21,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

температура газовой смеси:  $106,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

скорость ветра:  $4,3 \text{ м/с}$ ;

шаг решетки: 20 м;

длительность временного шага: 2 с.

Посчитанные в узлах решетки концентрации для модели Берлянда приведены в таблице 4.1, а для модели описанной в предыдущей главе в таблице 4.2.

**Таблица 4.1 – Концентрация в узлах решетки посчитанная согласно правилам модели Берлянда**

6	9,95	27,76	29,17	16,83	2,89	0,38* $10^{-3}$	56,71* $10^{-3}$	11,23* $10^{-6}$
5	1,13	13,18	35,3	38,16	5,33	0,32* $10^{-3}$	24,09* $10^{-3}$	3,02* $10^{-3}$
4	40,92* $10^{-3}$	1,06	12,18	40,79	43,67	17,82* $10^{-3}$	0,35* $10^{-3}$	37,21* $10^{-6}$
3	0,43* $10^{-3}$	3,07* $10^{-3}$	48,06* $10^{-3}$	1,81	45,29	42,45	15,64* $10^{-3}$	2,3* $10^{-6}$
2	3,23* $10^{-6}$	9,46* $10^{-6}$	46,33* $10^{-6}$	0,61* $10^{-3}$	0,92	32,58	14,19	0,18
1	0,14* $10^{-9}$	51,45* $10^{-6}$	14,92* $10^{-6}$	2,38* $10^{-6}$	0,12* $10^{-6}$	9,83	узел с источником выбросов	0,17* $10^{-3}$
0	0,89* $10^{-12}$	80,45* $10^{-12}$	21,73* $10^{-12}$	2,27* $10^{-12}$	16,47* $10^{-9}$	4,8* $10^{-3}$	23,09* $10^{-3}$	67,15* $10^{-3}$
	0	1	2	3	4	5	6	7

**Таблица 4.2 – Концентрация в узлах решетки посчитанная согласно правилам модели описанной в предыдущей главе**

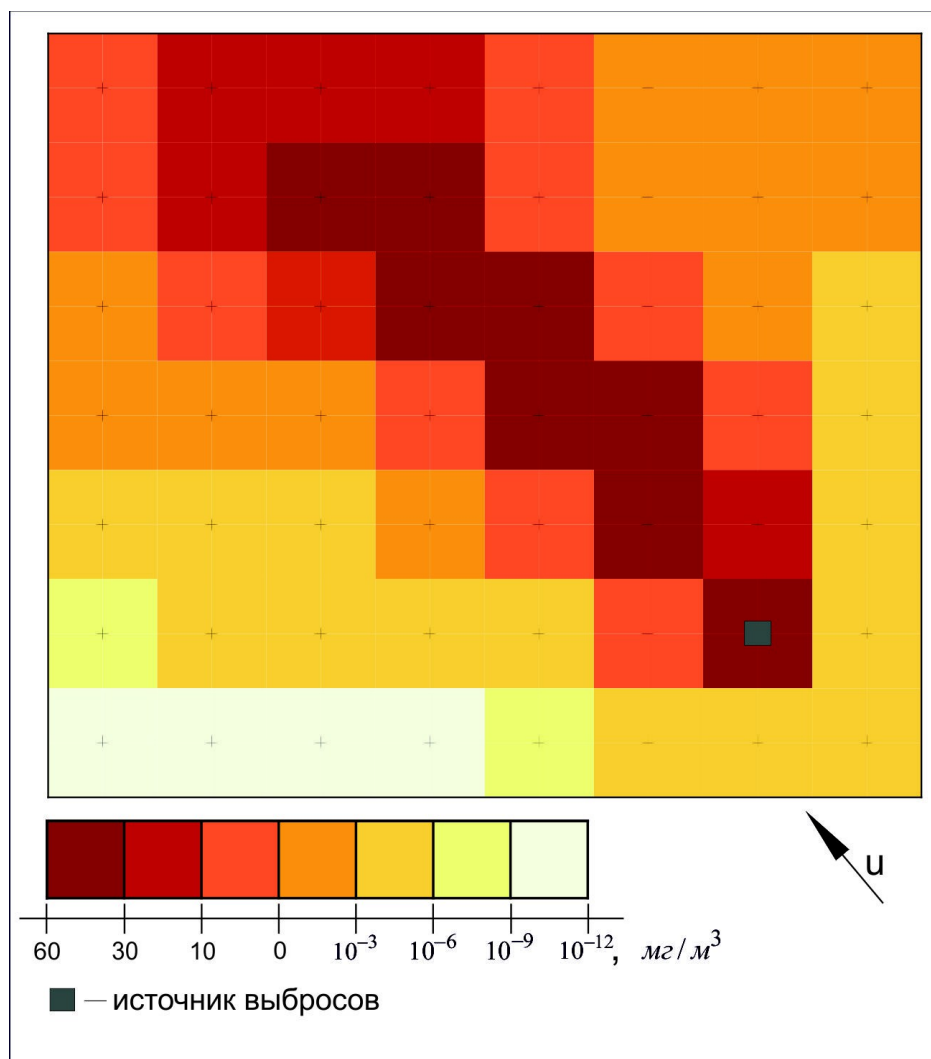
6	9,7	29,07	28,86	16,51	3,02	0,37* $10^{-3}$	56,19* $10^{-3}$	11,19* $10^{-6}$
5	1,13	13,16	35,29	38,21	5,31	0,32* $10^{-3}$	23,53* $10^{-3}$	2,89* $10^{-3}$
4	41,09* $10^{-3}$	0,98	12,24	40,71	43,62	15,78 * $10^{-3}$	0,32* $10^{-3}$	35,19* $10^{-6}$
3	0,33* $10^{-3}$	5,02* $10^{-3}$	46,32* $10^{-3}$	1,91	44,78	43,02	14,84* $10^{-3}$	3,9* $10^{-6}$
2	3,23* $10^{-6}$	9,46* $10^{-6}$	46,33* $10^{-6}$	0,61* $10^{-3}$	1,17	31,11	13,9	1,56
	0	1	2	3	4	5	6	7

**Продолжение таблицы 4.2 – Концентрация в узлах решетки посчитанная согласно правилам модели описанной в предыдущей главе**

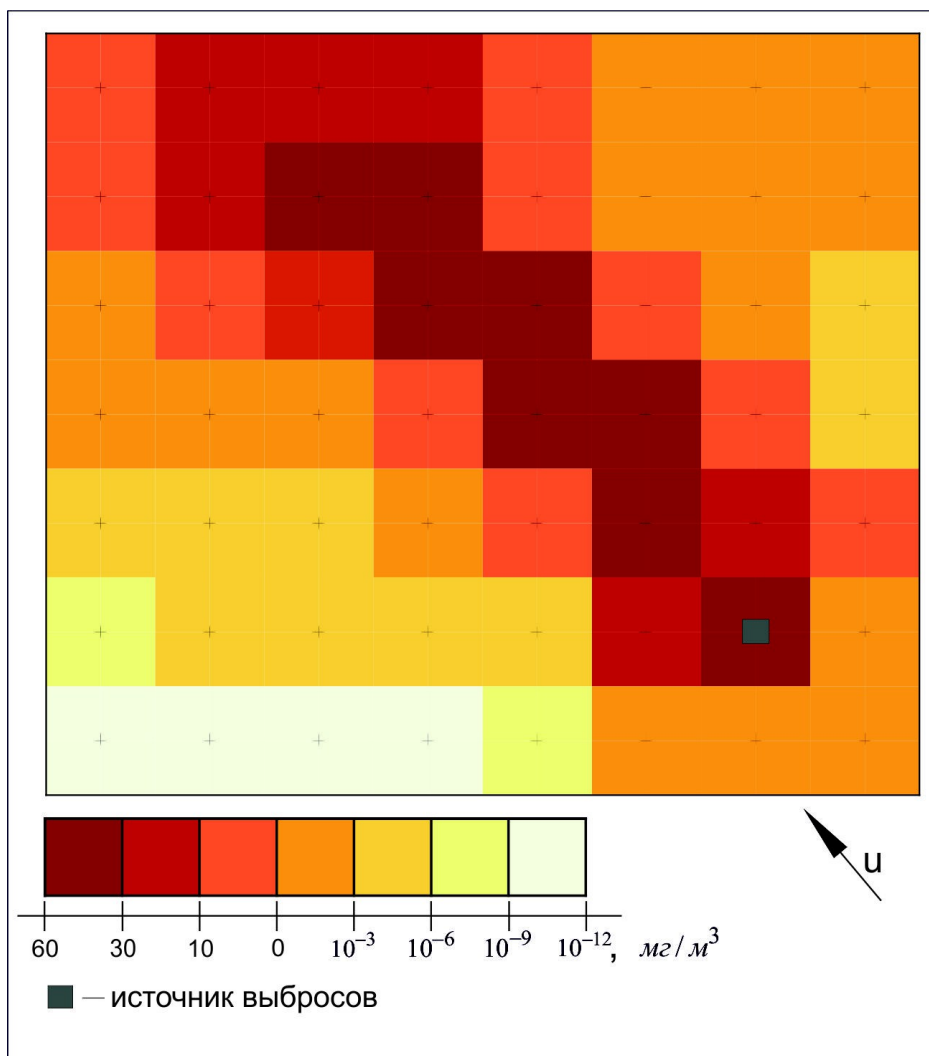
1	7,1* $10^{-9}$	64,12* $10^{-6}$	9,27* $10^{-6}$	3,17* $10^{-6}$	5,31* $10^{-6}$	10,15	узел с источником	16,02* $10^{-3}$
---	-------------------	---------------------	--------------------	--------------------	--------------------	-------	----------------------	---------------------

							выбросов	
0	3,83* $10^{-12}$	62,94* $10^{-12}$	54,39* $10^{-12}$	0,11* $10^{-12}$	18,47* $10^{-9}$	0,59	0,18	62* $10^{-3}$
	0	1	2	3	4	5	6	7

Визуализация полученных результатов представлена на рисунках 4.1 и 4.2.



**Рисунок 4.1 – Визуализация значений расчетной концентрации примеси в атмосфере на основе модели Берлянда**



**Рисунок 4.2 – Визуализация значений расчетной концентрации вещества в атмосфере на основе модели распространения веществ в атмосфере**

#### 4.2 Оценка адекватности

Для оценки адекватности модели также была посчитана погрешность, для чего был применен t-критерий Стьюдента, который заключается в оценке достоверности разности двух независимых выборок. В качестве выборок выступали посчитанные значения концентраций для узлов решетки на основании двух математических моделей. Поскольку, число элементов в выборках было достаточно большим (более 30), вычисления проводились по формуле (4.1).

$$t = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n} + \frac{\sigma_2^2}{n}}}, \quad (4.1)$$

где  $t$  – вычисляемое значение t-критерия Стьюдента;

$\bar{X}_1, \bar{X}_2$  – средние значения в первой и второй выборках;

$n$  – число элементов в первой и второй выборках.

$\sigma_1, \sigma_2$  – среднее квадратичное отклонение в первой и второй выборках:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{n - 1}}. \quad (4.2)$$

Таким образом, по формулам (4.1) – (4.2) было посчитано эмпирическое значение t-критерия Стьюдента и его значение равно 1,07.

Число степеней свободы вычисляется по формуле:

$$df = n + n - 2. \quad (4.3)$$

Это значит, что для данных выборок, состоящих из 56 значений каждая, число степеней свободы равно 110.

Таким образом, для числа степеней свободы 110 и доверительной вероятности 95%, табличное значение t-критерия Стьюдента равно 1,982. Данное значение меньше расчетного и это означает, что вышеописанная модель распространения вредных веществ в атмосфере методом цифровой волны может считаться адекватной.

### **Выводы по разделу**

1. Выполнена апробация предложенной модели распространения веществ в атмосфере. В качестве эталонной модели была выбрана модель Берлянда (ОНД-86). Показано, что максимальное значение погрешности модели в условиях (вещество:  $NO_2$ ;  $m = 30$  г;  $D = 4$  м;  $\sigma = 12,74$   $m^3/c$ ;  $Tв = 21,6$  °С;  $Tг = 106,6$  °С;  $v = 4,3$   $m/c$ ;  $h = 20$  м;  $\tau = 2$  с) не превышает 10 %.

2. Проведена оценка адекватности предложенной модели в соответствии с t-критериями Стьюдента. Показано, что при числе степеней



свободы 110 и доверительно вероятности 95% разрабатываемая модель является адекватной.

## **ВЫВОДЫ**

В магистерской работе предложено решение актуальной научной экологической задачи моделирования распространения веществ в атмосфере, которая бы учла недостатки существующих моделей и позволила прогнозировать распространение вредных веществ с более высокой точностью. При этом достигнутые следующие научные результаты.

1. Представлены общие сведения о моделях оценки и прогноза состояния и уровня загрязнения атмосферы. Приведен список процессов, воздействующих на загрязняющие вещества на стадиях подъема шлейфа, переноса и диффузии. Описаны модели атмосферной дисперсии, перечислены их задачи, перечень основных вводимых данных, методы оценки и виды источников вредных веществ.

2. Приведена классификация основных математических моделей, используемых для оценки загрязнения атмосферы. Рассмотрены некоторые из них. Показаны их преимущества и недостатки на практике.

3. Предложен метод моделирования распространения веществ в атмосфере, который отличается от существующих учетом рельефных особенностей местности и препятствий на пути, представляющих собой расположение застроек. Это позволило повысить точность моделирования распространения примесей в условиях нерегулярного расположения источников.

4. Выполнена апробация предложенной модели распространения веществ в атмосфере апостериорным способом. Показано, что максимальное значение погрешности модели при заданных начальных условиях не превышает 10%. Это свидетельствует о том, что разработанная модель является адекватной.

5. Приведено определение вредных веществ, их классификации и пути попадания в организм человека. Перечислены факторы, от которых зависит характер вызываемых веществом нарушений нормальной работы организма, пути обезвреживания ядов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Technology Transfer Network Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling Air: Quality Models - Режим доступа: <http://www.epa.gov/ttn/scram/aqmindex.htm>
2. Technology Transfer Network Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling Air: Quality Models - Режим доступа: <http://www.epa.gov/ttn/scram/dispersionindex.htm>
3. Technology Transfer Network Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling Air: Quality Models - Режим доступа: <http://www.epa.gov/scram001/photochemicalindex.htm>
4. BC Air Quality: Receptor Modelling - Режим доступа: <http://www.bcairquality.ca/assessment/receptor-modelling.html>
5. Замай С.С. Якубайлик О.Э. Модели оценки и прогноза загрязнения атмосферы промышленными выбросами в информационно-аналитической системе природоохранных служб крупного города. Учебное пособие. Красноярск, 1998.
6. Материал из Википедии: Atmospheric dispersion modeling - Режим доступа: [http://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric\\_dispersion\\_modeling](http://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_dispersion_modeling)
7. Экологический портал: Классификация источников загрязнения атмосферы - Режим доступа: <http://prom-ecologi.ru/?p=27>
8. Экологический портал: Классификация источников выбросов загрязняющих веществ - Режим доступа: <http://eko-priroda.ru/sostoyanie-i-ohrana-atmosfery/72-klassifikaciya-istochnikov-vybrosov-zagryaznyayuschih-veschestv>
9. Материал из Википедии: Air pollution dispersion terminology - Режим доступа: [http://en.wikipedia.org/wiki/Air\\_pollution\\_dispersion\\_terminology](http://en.wikipedia.org/wiki/Air_pollution_dispersion_terminology)
10. Павлий В.А. Построение информационной модели расчета распространения примеси в приземном слое атмосферы над территориально-распределенными объектами [Текст] : научн. журн. / Виталий Александрович Павлий // Наук. праці Донецького Національного технічного університету. –

[під ред. Є. О. Башкова]. – Сер. Системний аналіз та інформаційні технології у науках про природу та суспільство. – (САІТ-2011). – Вип. 1(133) – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – С. 71 – 81.

11. Экологический портал: Распределение загрязнения на локальной территории - Режим доступа: <http://les-pitomnik.ru/raspredelenie-zagryazneniya-ch-1/>

12. Материал из Википедии: Модели рассеивания примеси - Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Модели\\_рассеивания\\_примеси](https://ru.wikipedia.org/wiki/Модели_рассеивания_примеси)

13. Электронная библиотека: Положение о повышении точности прогностических оценок радиационных характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на персонал и население - Режим доступа: [http://ohranatruda.ru/ot\\_biblio/normativ/data\\_normativ/58/58768/](http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/58/58768/)

14. Электронная библиотека: Строительная климатология и геофизика СНиП 2.01.01 - Режим доступа: [http://www.ohranatruda.ru/ot\\_biblio/normativ/data\\_normativ/1/1895/index.php](http://www.ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/1/1895/index.php)

15. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. / Под ред М.Е. Берлянда, Г.И. Сидоренко. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 448с.

16. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий ОНД-86, Л.: Гидрометеиздат, 1997, – 76 с.

17. Technology Transfer Network Support Center for Regulatory Atmospheric ModelingAir: Dispersion Modeling - Режим доступа:

<http://www.epa.gov/airquality/aqportal/management/modeling/dispersion.htm>

18. Technology Transfer Network Support Center for Regulatory Atmospheric ModelingAir: Preferred/Recommended Models - Режим доступа:

[http://www.epa.gov/scram001/dispersion\\_prefrec.htm](http://www.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm)

19. Environmental Software and Services: BLP - Buoyant Line and Point source dispersion model - Режим доступа: <http://www.ess.co.at/GAIA/models/blp.htm>

20. Global Change Master Directory: CALINE3 - A Versatile Dispersion Model for Predicting Air Pollutant Levels Near Highways and Arterial Streets - Режим доступа: [http://gcmd.gsfc.nasa.gov/records/CALINE3\\_Model.html](http://gcmd.gsfc.nasa.gov/records/CALINE3_Model.html)
21. Материал из Википедии: CALPUFF - Режим доступа: <http://en.wikipedia.org/wiki/CALPUFF>
22. Council for Regulatory Environmental Modeling: Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithms for Unstable Situations - Режим доступа: [http://cfpub.epa.gov/crem/knowledge\\_base/crem\\_report.cfm?deid=74884](http://cfpub.epa.gov/crem/knowledge_base/crem_report.cfm?deid=74884)
23. Global Change Master Directory: ISC3 - Industrial Source Complex Model - Режим доступа: [http://gcmd.nasa.gov/records/ISC3\\_Model.html](http://gcmd.nasa.gov/records/ISC3_Model.html)
24. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнение атмосферы / М.Е Берлянд. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 448 с.
25. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы/ М.Е. Берлянд – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 272с.