

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики  
(наименование института полностью)

Кафедра «Химическая технология и ресурсосбережение»  
(наименование)

18.04.01 Химическая технология  
(код и наименование направления подготовки)

Рациональное использование природных и сырьевых ресурсов в химической технологии и  
нефтехимии  
(направленность (профиль))

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Аналитический подход к выбору метода оценки и прогнозирования загрязнения  
атмосферного воздуха

Обучающийся

В.А. Крайнов  
(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

канд. пед. наук, доцент М.В. Кравцова  
(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

## Содержание

Введение.....	3
1 Литературный обзор.....	6
1.1 Явления переноса массы, энергии и импульса.....	6
1.2 Классификация дисперсионных моделей.....	11
1.3 Аналитико – эмпирические модели.....	12
1.4 Статистические модели.....	16
1.5 Численные модели.....	19
1.6 Программные средства моделирования.....	20
1.7 Выводы по результатам литературного обзора.....	23
2 Разработка алгоритма выбора математической модели.....	24
2.1 Разработка общего алгоритма выбора математической модели....	24
2.2 Разработка алгоритма выбора дисперсионной модели.....	26
3 Реализация алгоритма выбора дисперсионной модели.....	33
3.1 Анализ данных для расчёта.....	33
3.2 Расчёт по модели Берлянда.....	37
3.3 Оценка эффективности расчёта по модели Берлянда.....	44
3.4 Расчёт по модели Паскуилла – Гиффорда.....	50
3.5 Оценка эффективности расчёта по модели Паскуилла–Гиффорда...	54
3.6 Сравнительный анализ результатов расчёта.....	58
4 Концепция Единой информационной системы мониторинга и регулирования качества атмосферного воздуха.....	63
Заключение.....	64
Список используемых источников.....	68
Приложение А Расчёт по методу Берлянда.....	73
Приложение Б Статистический анализ расчёта по методу Берлянда.....	82
Приложение В Расчёт по методу Паскуилла-Гиффорда.....	83
Приложение Г Статистический анализ расчёта по методу Паскуилла- Гиффорда.....	92

## Введение

### **Актуальность исследования.**

Для промышленных территорий контроль качества атмосферного воздуха является приоритетной задачей, решение которой позволит поддерживать качество окружающей среды, способствующей поддержанию здоровья населения. В целях оценки качества атмосферного воздуха и прогнозирования его состояния применяются различные методы математического моделирования рассеивания выбросов в атмосфере.

Проблема заключается в том, что существует определённое количество методов математического моделирования, используемых для расчёта рассеивания загрязняющих веществ и позволяющих спрогнозировать качество атмосферного воздуха, но нет инструментов выбора методики и оценки её эффективности.

**Объект исследования:** Процесс рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, математические модели атмосферной дисперсии.

**Предмет исследования:** Сравнительный анализ математических моделей и оценка их эффективности.

**Целью настоящей работы** является повышение эффективности оценки качества атмосферного воздуха за счёт выбора оптимальной математической модели.

**Для реализации цели поставлены следующие задачи:**

- провести анализ теоретических подходов к моделированию рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и существующих математических моделей;
- разработать алгоритм сравнительного анализа методов моделирования рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосферном воздухе;

– осуществить апробацию предложенного алгоритма на примере рассеивания загрязняющих веществ Северного промышленного узла города Тольятти в Центральном районе города Тольятти.

**Теоретико – методологическую основу исследования** составили научные работы следующих научных школ – Главной геофизической обсерватории имени А.И. Войекова, Института экспериментальной метеорологии, Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, а также работы Ю.И. Дытнерского.

**Методы исследования:** анализ литературных источников, расчёт рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере, сравнительный анализ моделей. Для демонстрации предложенного алгоритма сравнительного анализа разработана программа «Дисперсия».

**Теоретическая значимость исследования заключается:**

- в описании процесса рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе как сложного процесса переноса вещества, энергии и импульса;
- в систематизации работ в области моделирования рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере;
- в сравнительном анализе основных дисперсионных моделей, который позволил выявить основные ограничивающие и входные параметры моделей;
- в разработке общего алгоритма выбора оптимальной математической модели, применимого для исследования моделей различных физико – химических процессов и концепции Единой информационной системы.

**Практическая значимость исследования заключается** в разработке детального алгоритма выбора дисперсионной модели, реализованного в программе «Дисперсия».

**Достоверность и обоснованность результатов исследования** обеспечивалась соответствующими расчётами.

**Личное участие автора в организации и проведении исследования** состоит в анализе литературы, посвященной процессу рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и дисперсионным моделям, разработке общего алгоритма выбора математической модели и детального алгоритма выбора дисперсионной модели, апробации предложенного алгоритма, разработке концепции Единой информационной системы.

**Апробация и внедрение результатов.**

Материалы магистерской диссертации докладывались на научно – практической конференции «Молодёжь. Наука. Общество», г. Тольятти, декабрь 2022 г.

По тематике исследования опубликованы следующие статьи:

Крайнов В.А., Копеистова Д.Ю. Анализ подходов к моделированию выбросов в атмосферный воздух // Сборник студенческих работ Всероссийской студенческой научно – практической междисциплинарной конференции «Молодежь.Наука.Общество – 2022».

Копеистова Д.Ю., Крайнов В.А., Кравцова М.В. Математическая модель для оценки качества атмосферного воздуха от выбросов передвижных источников автотранспорта // Электронный научный журнал E – SCIO.

**На защиту выносятся:**

Общий алгоритм выбора математической модели, детальный алгоритм выбора дисперсионной модели и апробация предложенного алгоритма, концепция Единой информационной системы мониторинга и регулирования качества атмосферного воздуха.

**Структура магистерской диссертации.** Работа состоит из введения, трёх разделов, заключения, списка используемых источников (31 источник). Работа содержит 92 страницу, 61 рисунок, 25 таблицы, 54 формулы.

## 1 Литературный обзор

### 1.1 Явления переноса массы, энергии и импульса

Рассмотрим процесс распространения выброса на примере рассеивания выбросов загрязняющих веществ от дымовой трубы, схематично процесс изображён на рисунке 1. Произведём схематичное описание исследуемого процесса.

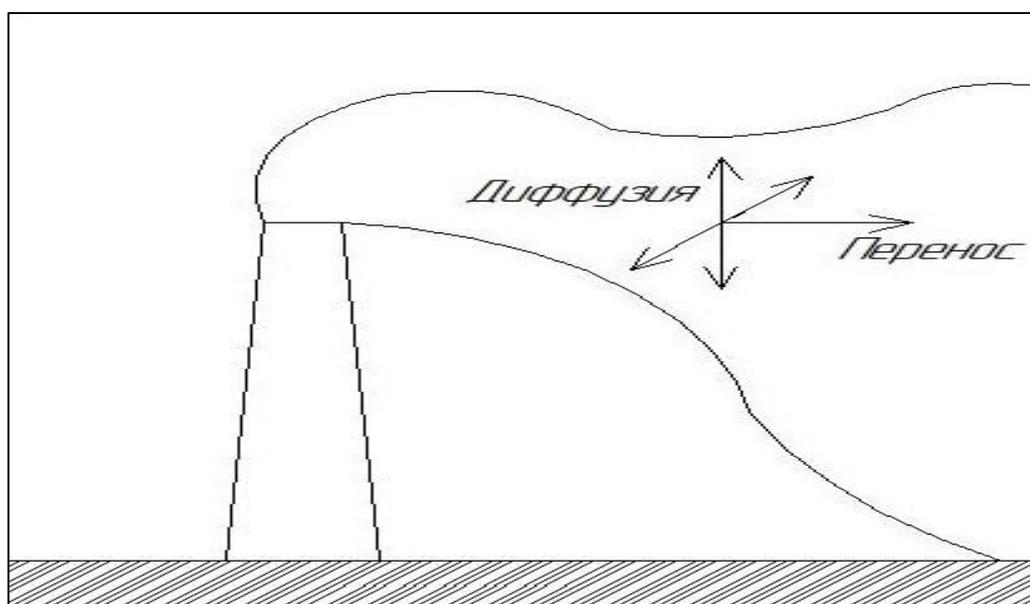


Рисунок 1 – Схема распространения выбросов в атмосфере

При попадании выброса в атмосферу, в зависимости от характера источника, выброс либо начинает немедленно распространяться в ней, образуя область подвергнувшуюся загрязнению, либо образует облако, рассеивающееся в дальнейшем. В начальный момент времени наблюдается вертикальное распространение выброса, называемое подъёмом шлейфа. Это явление обусловлено определённой начальной скоростью выброса, отличной от скорости ветра, а также разницей температур выброса и атмосферы.

Постепенно выброс теряет начальную скорость и температуру, после чего распространяется преимущественно в направлении ветра. В то же время, для атмосферы характерно возникновение турбулентности, которая приводит к распространению выброса в вертикальном и горизонтальном направлении, перпендикулярных направлению ветра, за счёт формирования турбулентных вихрей. Также распространению выброса в указанных направлениях и вдоль направления ветра способствует процесс молекулярной диффузии, обусловленный градиентом концентрации.

Таким образом, мы наблюдаем сложный процесс переноса массы, тепла и импульса, результатом которого является формирование определенного поля концентрации вещества в пространстве, динамично изменяющегося во времени, на которое также оказывают влияние сухое и влажное осаждение, а также химическое превращение вещества.

Приведём рисунок 2, на котором отображена взаимосвязь протекающих процессов переноса субстанции.

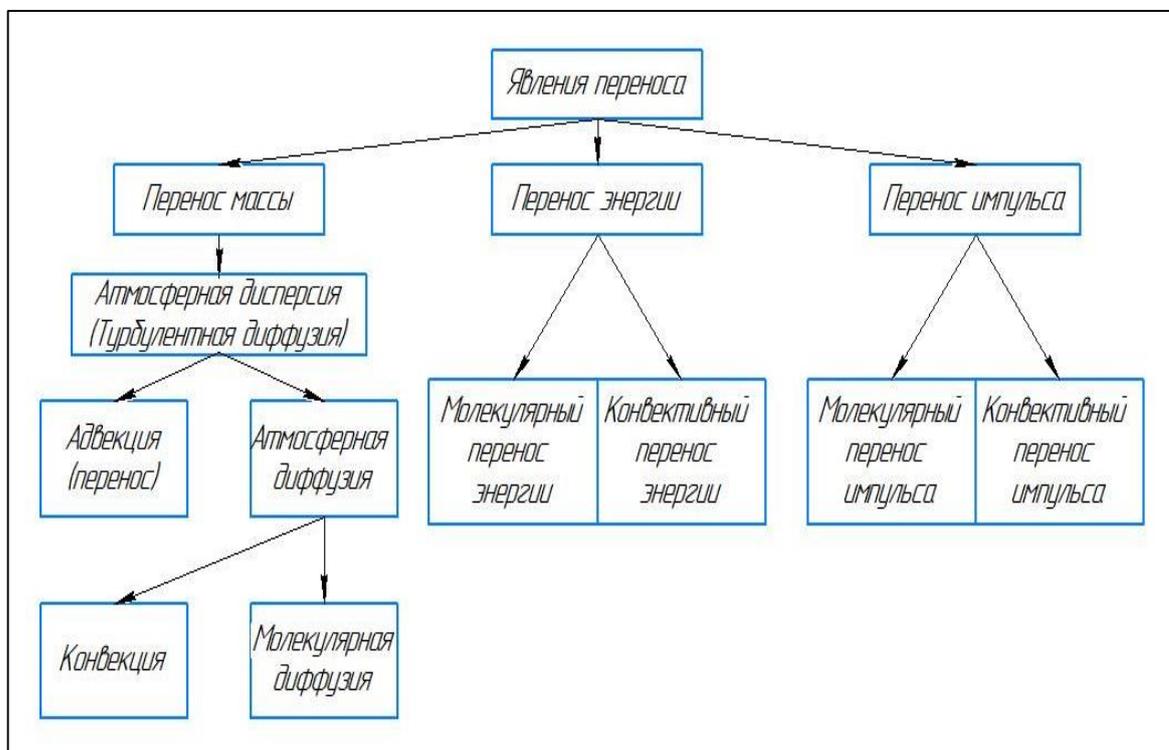


Рисунок 2 – Взаимосвязь явлений переноса субстанции

Перенос массы и энергии следует рассматривать в совокупности как сложный тепломассообменный процесс. В случае неподвижной атмосферы будет наблюдаться молекулярный перенос как результат броуновского движения частиц среды. В данном случае перенос будет обусловлен теплопроводностью и диффузией. Поток тепла и массы описывается законом Фурье и первым законом Фика – формулами 1 и 2 соответственно. Изменение температуры и концентрации описываются уравнением Фурье и вторым законом Фика – формулами 3 и 4 соответственно [6].

$$q_{Mt} = -\lambda \cdot gradT \quad (1)$$

$$q_{Mc} = -D \cdot gradC \quad (2)$$

$$\frac{dT}{d\tau} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{dC}{d\tau} = D \cdot \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

где  $q_{Mt}$  – поток энергии, Дж/м·с;

$q_{Mc}$  – поток вещества, моль/м·с;

$D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;

$a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

$T$  – температура, К;

$C$  – концентрация, моль/м<sup>3</sup>;

$\tau$  – время, с;

$x, y, z$  – координаты.

Таким образом, поток вещества и энергии в неподвижной среде, а также скорость изменения температуры и концентрации в ней обусловлены способностью вещества к диффузии и теплопроводности, а также градиентом концентрации и температуры с переносом субстанции в область меньшего потенциала.

Однако в большинстве случаев атмосфера подвижна и динамична во времени, и перенос субстанции в значительной степени осуществляется конвективным переносом энергии и массы с макроскопическими потоками.

Стоит отметить, что в трудах по метеорологии классификация массообменных процессов несколько отличается от классификации, принятой в химической технологии. Так, различают понятия адвекции и конвекции. Адвекция, или перенос, представляет собой перенос вещества с потоками воздуха в горизонтальном направлении, совпадающем с направлением ветра. Под конвекцией понимается перенос вещества с потоками воздуха в горизонтальном и вертикальном направлениях, перпендикулярный направлению ветра. Конвекция и молекулярная диффузия в совокупности называются атмосферной диффузией. Атмосферная диффузия и адвекция в совокупности – процесс атмосферной дисперсии, или турбулентной диффузии.

Таким образом, турбулентная диффузия и конвективный теплообмен – совокупность молекулярного и конвективного переноса вещества и энергии, описываются уравнением турбулентной диффузии и уравнением Фурье – Кирхгофа – формулами 5 и 6 соответственно:

$$\frac{dC}{d\tau} + w_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial C}{\partial z} = D \cdot \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

$$\frac{dT}{d\tau} + w_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

где  $w_i$  – скорость потока вдоль  $i$  – й оси, м/с.

Как видим, распределение вещества в условиях подвижной атмосферы зависит от скорости воздушных масс, и распределение вещества и энергии в неподвижной атмосфере – частный случай при нулевых скоростях потоков.

Отдельно рассмотрим вопрос переноса импульса, описываемый системой дифференциальных уравнений Навье – Стокса – формулами 7 – 9:

$$\rho \cdot \frac{\partial w_x}{\partial \tau} = -\rho \cdot \left( w_x \cdot \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial w_x}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial w_x}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} - \rho \cdot g + \mu \cdot \left( \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

$$\rho \cdot \frac{\partial w_y}{\partial \tau} = -\rho \cdot \left( w_x \cdot \frac{\partial w_y}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial w_y}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial w_y}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial y} - \rho \cdot g + \mu \cdot \left( \frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

$$\rho \cdot \frac{\partial w_z}{\partial \tau} = -\rho \cdot \left( w_x \cdot \frac{\partial w_z}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial w_z}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial z} - \rho \cdot g + \mu \cdot \left( \frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

где  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu$  – вязкость, Па·с;

$P$  – давление, Па.

Данная система уравнений постулирует, что изменение проекций импульса вдоль осей координат зависит от изменения скорости и направления ветра, изменения давления вдоль направления движения, воздействия силы тяжести и сил вязкостного трения. На основании этого можно заключить, что перенос импульса в атмосфере в значительной мере зависит от метеорологических условий, в частности параметров ветра, влажности и давления атмосферы, которые, в свою очередь, зависят от переноса воздушных масс в глобальном масштабе в составе циклонов и антициклонов.

## 1.2 Классификация дисперсионных моделей

Изучение распространения загрязняющих веществ в пространстве основывается на моделировании процесса атмосферной дисперсии, сопровождающейся конвективным переносом тепла и переносом импульса. Модели, описывающие процесс атмосферной дисперсии, называются дисперсионными. На рисунке 3 приведём классификацию дисперсионных

моделей и примеры математических моделей, которые подвергнутся анализу в настоящей работе.

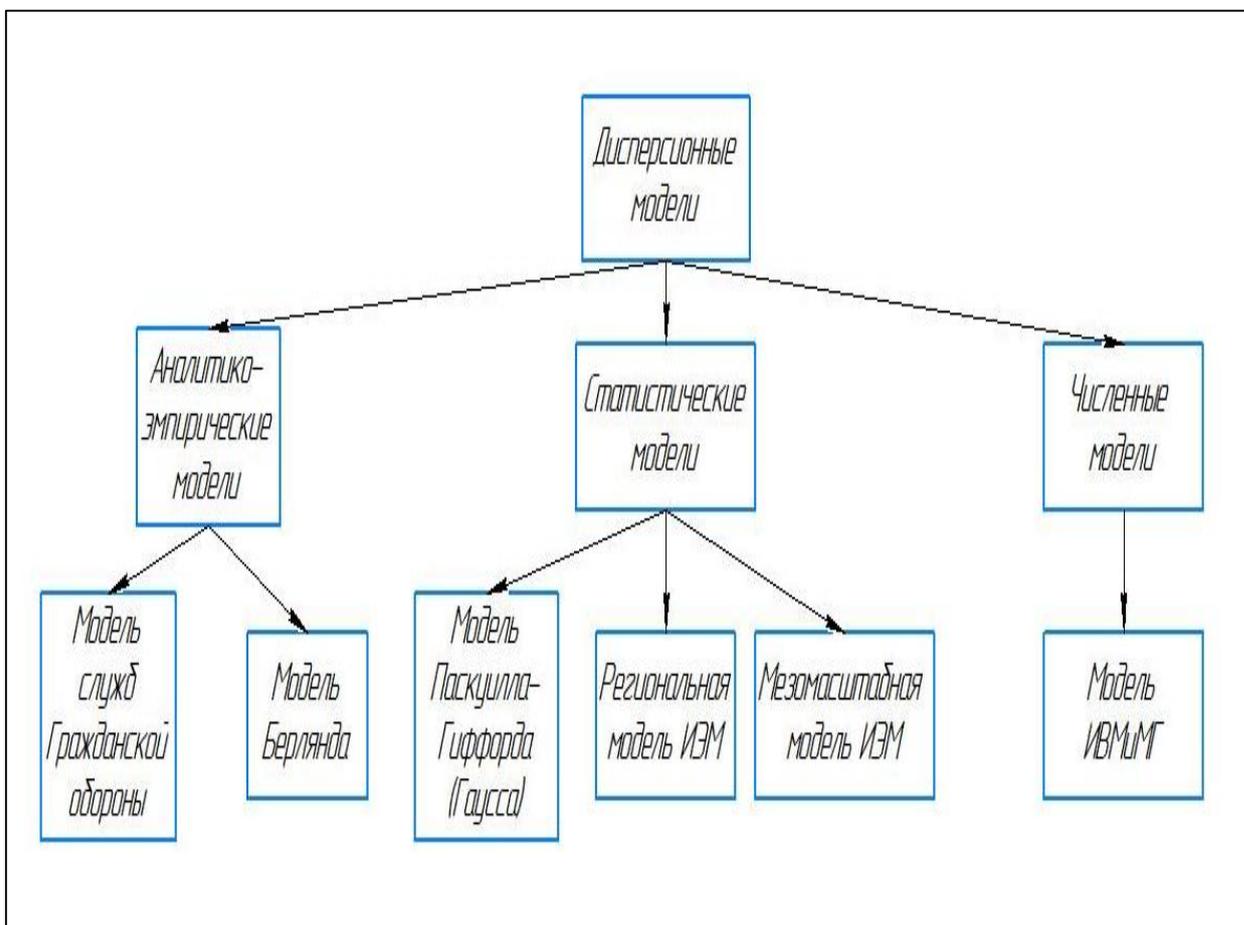


Рисунок 3 – Классификация дисперсионных моделей

По применяемой методологии выделяют аналитико – эмпирические, статистические и численные модели [17], [21], [24] – [31].

### 1.3 Аналитико – эмпирические модели

Аналитико – эмпирические модели, или же К – модели (основой которых является К – теория), базируются на полуэмпирическом решении общего уравнения турбулентной диффузии, отображенного в формуле 5. К К – моделям относят модель, используемую службами гражданской обороны, и модель Берлянда.

В Российской Федерации более распространена модель М.Е. Берлянда, разработанная сотрудниками Главной геофизической обсерватории им. А.И. Войекова. Основываясь на приведённом уравнении турбулентной диффузии и вводя обоснованные эмпирические упрощения и уточнения, получили модель, отображённую в формуле 10:

$$C_{\max} = \frac{A \cdot F \cdot M \cdot m \cdot n}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V \cdot \Delta T}} \quad (10)$$

где  $A$  - коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы, определяющий условия горизонтального и вертикального рассеивания загрязняющего вещества в атмосферном воздухе;

$M$  - масса загрязняющего вещества, выбрасываемого в атмосферный воздух в единицу времени, г/с;

$F$  - безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания загрязняющего вещества в атмосферном воздухе;

$m$  и  $n$  - безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выброса из устья источника выброса;

$\eta$  - безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности;

$H$  - высота источника выброса, м;

$V_1$  - расход газовой смеси, м<sup>3</sup>/с;

$\Delta T$  - разность между температурой, выбрасываемой газовой смесью и температурой атмосферного воздуха, °С.

Настоящая модель легла в основу общепринятой методики, утверждённой приказом Министерства природных ресурсов Российской Федерации от 6 июня 2017 года №273. Согласно положениям настоящего приказа, данная методика применима на расстоянии до 100 километров для точечных, линейных и площадных источников. Методика предусматривает

учёт воздействия нескольких источников, суммации и фонового загрязнения атмосферного воздуха [16].

Согласно пункту 8.1 Приказа МПР РФ №273 учёт фона ведётся в случаях, когда заведомо известно наличие неучтённых источников выбросов. В случае, когда расчётная система претендует на учёт максимального количества источников, фоном можно пренебречь.

Учёт выбросов одного вещества от нескольких источников будем вести по формуле 11, учёт суммации – по формуле 12:

$$C_i = C_{1i} + C_{2i} + \dots + C_{ni} \quad (11)$$

где  $C_i$  – расчетная приземная концентрация вещества,  $\text{г}/\text{м}^3$ ;

$C_{ni}$  – расчетная приземная концентрация вещества от источника,  $\text{г}/\text{м}^3$ .

$$q_k = \sum_1^{n_{зв}} \frac{C_i}{\text{ПДК}_{\text{мр}i}} \quad (12)$$

где  $q_k$  – безразмерная концентрация;

$\text{ПДК}_{\text{мр}i}$  – максимальная разовая ПДК,  $\text{г}/\text{м}^3$ ;

$n_{зв}$  – число загрязняющих веществ в группе суммации.

Приземную концентрацию сравнивают с максимальной разовой предельно – допустимой концентрацией, безразмерную концентрацию – с единицей. При равенстве или превышении этих показателей наступает потенциальная опасность для здоровья человека.

В таблице 1 приведём несколько работ, посвящённых применению модели Берлянда для разного типа источников.

Таблица 1 – Примеры применения модели Берлянда

Название работы	Тип модели	Краткое содержание
Модель диффузии угарного газа в условиях возникновения чрезвычайной ситуации на автомагистрали вблизи горящего торфяника	Аналитико-эмпирическая (Берлянд)	Авторами было предложено использование модели Берлянда для прогнозирования распространения угарного газа от пожаров торфяников как площадного источника загрязнения. Результаты расчётов были сопоставлены с результатами измерений, выполненных во время пожара торфяника в Иркутской области. Данные расчётов и измерений показали высокую сходимость, однако процедура оценки адекватности не проведена. Таким образом, утверждается, что модель Берлянда может быть использована для прогнозирования последствий чрезвычайных ситуаций, результатом которых являются площадные источники загрязнений – пожары, разливы. При допущении, что данные нестационарные источники рассматриваются стационарными [12]
Моделирование зон термического и химического воздействий при сжигании попутного нефтяного газа	Аналитико-эмпирическая (Берлянд)	Авторами применена модель Берлянда в совокупности с методом вычисления температуры земной поверхности для изучения воздействия химического и термического загрязнения на окружающую среду вблизи факельных установок, предназначенных для сжигания попутного нефтяного газа у города Сургут. Процедура оценки адекватности модели не проводилась [2]
Влияние метеорологических условий на рассеивание вредных выбросов в городской среде	Аналитико-эмпирическая (Берлянд)	Авторами осуществлялся расчёт на основании методик профессора Сидоренко, ОНД – 86 и МРР-2017. Ими был сделан вывод, что направление и скорость ветра являются определяющими факторами для оценки воздействия дорог на качество атмосферного воздуха [9]

К достоинствам данной модели можно отнести:

- учёт влияния застройки и рельефа местности за счёт введения в модель коэффициента рельефа местности;
- учёт влияния местных климатических условий за счёт введения коэффициента температурной стратификации, индивидуально учитывающийся для регионов;
- применимость для точечных, линейных и площадных источников;
- возможность оценки воздействия нескольких источников;

- возможность оценки суммации действия загрязняющих веществ;
- возможность оценки воздействия фоновое загрязнение;
- применимость на удалении до 100 километров.

К недостаткам данного подхода относят:

- ограниченная применимость модели для кратковременно действующего источника ввиду того, что модель рассчитана на осреднение показателей в интервале 20 – 30 минут;
- модель ограниченно учитывает конкретные метеоусловия;
- модель не учитывает влияние типа подстилающей поверхности [3].

Модель, используемая службами гражданской обороны, также разработана под руководством М.Е. Берлянда. Ключевой в настоящей модели является формула 13, позволяющая определить площадь возможной зоны заражения:

$$S_B = 8,72 \cdot 10^{-3} \cdot \Gamma^2 \cdot \varphi \quad (13)$$

где  $S_B$  – площадь возможного заражения, км<sup>2</sup>;

$\Gamma$  – глубина зоны заражения, км;

$\varphi$  – угловые размеры зоны возможного заражения.

Достоинство настоящей методики заключается в возможности оперативного реагирования в случае чрезвычайной ситуации за счёт оценки зоны заражения, на основании которой выносится решение об эвакуационных мероприятиях.

Недостатком модели является то, что посредством её невозможно оценить концентрацию загрязняющего вещества в конкретной точке пространства [13].

## 1.4 Статистические модели

Статистические модели основываются на положении о том, что распределение загрязняющего вещества соответствует нормальному закону и имеет вид распределения Гаусса – формула 14. В частности, к гауссовым моделям относят модель Паскуилла – Гиффорда, мезомасштабную и региональную модели Института экспериментальной метеорологии.

$$C(x, y, z, p, z_0) \quad (14)$$
$$= \frac{Q \cdot f_F \cdot f_W}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y(x, p, z_0) \cdot \sigma_z(x, z_0) \cdot u} \cdot \exp\left(-\frac{(y - y_0)^2}{2 \cdot \sigma_y^2(x, p, z_0)}\right) \cdot \left( \exp\left(-\frac{(z - h_{эф})^2}{2 \cdot \sigma_z^2(x, z_0)}\right) + \exp\left(-\frac{(z + h_{эф})^2}{2 \cdot \sigma_z^2(x, z_0)}\right) \right)$$

где  $C(x, y, z, p, z_0)$  – концентрация загрязняющего вещества,  $\text{г/м}^3$ ;

$y_0$  – координата источника выброса, м;

$Q$  – мощность выброса,  $\text{г/с}$ ;

$x, y, z$  – координаты точек расчета концентрации, м;

$\bar{u}$  – средняя скорость ветра,  $\text{м/с}$ ;

$h_{эф}$  – эффективная высота выброса, м;

$p$  – категория устойчивости атмосферы;

$z_0$  – коэффициент шероховатости;

$\sigma_z$  и  $\sigma_y$  – параметры диффузии, характеризующие вертикальные и горизонтальные отклонения гауссовского распределения концентрации в зависимости от расстояния вдоль оси выброса;

$f_F$  – коэффициент сухого осаждения;

$f_W$  – коэффициент влажного осаждения.

Модель Паскуилла – Гиффорда применима на удалении до 12 километров, преимущественно используется для стационарных точечных источников.

Ключевым понятием модели является класс устойчивости атмосферы, характеризующий изменчивость атмосферы в результате действия турбулентной диффузии, интенсивность которой зависит от скорости ветра, и градиента температуры в атмосфере. Класс устойчивости следует определять по таблице 2. Для облачности введены баллы от 0 до 10. Баллы 0-2 соответствуют ясному небу, 3-7 средней облачности и 8-10 сильной облачности. Сильная инсоляция – солнце высоко над горизонтом (угол возвышения больше  $60^{\circ}$ ) и небо ясное. В случаях если небо переменное и солнце высокое или небо ясное, но солнце средней высоты (угол  $15-60^{\circ}$ ) инсоляция умеренная. В остальных случаях – инсоляция слабая.

Таблица 2 – Классы устойчивости атмосферы

Скорость ветра На высоте 10м, м/с	Степень инсоляции днём			Облачность ночью, баллы	
	Сильная	Умеренная	Слабая	10 (общая) больше 5 (нижняя)	или Менее 4 (нижняя)
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	D	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

К достоинствам модели следует отнести:

- учёт состояния устойчивости атмосферы;
- учёт влияния характера подстилающей поверхности;
- учёт влияния выпадения примесей на поверхности земли;
- учёт влияния вымывания примесей из облака осадками;

К недостаткам данного подхода относят:

- ограничения по скорости ветра (более 1 метра в секунду) и по предельному расстоянию (не более 12 километров);
- ограниченная применимость модели для кратковременно действующего источника ввиду того, что модель рассчитана на осреднение показателей в интервале 20 – 30 минут [8], [19].

Гауссовы модели продолжали развиваться коллективом Института экспериментальной метеорологии, в первую очередь в целях изучения рассеивания радиоактивных аэрозолей.

Изначально была разработана мезомасштабная модель. В ней коэффициенты диффузии определяются не по эмпирическим закономерностям Паскуилла – Гиффорда, а на основе точного расчёта основных турбулентных характеристик. Это позволяет пользоваться ей для расчёта выбросов от нестационарных источников, более детально учитывать характер подстилающей поверхности и расширить радиус применимости до 100 километров.

В дальнейшем была разработана региональная модель. Основными её преимуществами является радиус действия, достигающий 1500 километров, и динамичность. Динамичность модели обусловлена тем, что алгоритм включает решение задачи о траектории распространения частиц посредством решения кинематических уравнений 15 и 16:

$$x(t) = \int_0^t u(t) \cdot dt \quad (15)$$

$$y(t) = \int_0^t v(t) \cdot dt \quad (16)$$

где  $t$  – шаг интегрирования по времени, с;

$u(t)$  – проекция скорости ветра на ось  $X$ , м/с;

$v(t)$  - проекция скорости ветра на ось  $Y$ , м/с.

Таким образом, для моделей данного типа наблюдается эволюция в направлении постановки кинематической задачи, решение которой обеспечивает динамичность моделей.

## 1.5 Численные модели

Численные методы наиболее широко представлены в работах Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. Модель основывается на совместном численном решении уравнения турбулентной диффузии и системы уравнений, представленной в формулах 17-23:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div} \rho u \bar{u} = -\frac{\partial \rho'}{\partial x} + l \rho v + \Delta_x u \quad (17)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div} \rho v \bar{u} = -\frac{\partial \rho'}{\partial y} - l \rho v + \Delta_y v \quad (18)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \text{div} \rho w \bar{u} = -\frac{\partial \rho'}{\partial z} + \lambda \rho \vartheta' + \Delta_z w \quad (19)$$

$$\frac{\partial \rho \vartheta'}{\partial t} + \text{div} \rho \vartheta' \bar{u} = -S \rho w - \frac{\rho L \Phi}{c_p} + \Delta_\theta \vartheta' \quad (20)$$

$$\frac{\partial \rho q'}{\partial t} + \text{div} \rho q' \bar{u} = \rho \Phi - \rho w \frac{\partial \bar{Q}}{\partial z} + \Delta_q q' \quad (21)$$

$$\text{div} \rho \bar{u} = 0 \quad (22)$$

$$\Delta_a = \frac{\partial}{\partial x} \mu_{ax} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_{ay} \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu_{az} \frac{\partial}{\partial z} \quad (23)$$

где  $\bar{u}$  – вектор скорости ветра;

$\rho$  – плотность;

$\vartheta', q', \rho'$  - отклонения потенциальной температуры, массовой доли

пара, давления от фоновых значений;

$Q$  – фоновое значение массовой доли пара;

$\mu_{ax}$  – коэффициенты турбулентного обмена;

$l, S, \lambda$  – параметры Кориолиса, стратификации и плавучести;

$\Phi$  – скорость фазовых переходов;

$L$  – скрытая теплота конденсации;

$c_p$  – удельная теплоемкость воздуха.

К безусловным достоинствам данного метода следует отнести возможность использования модели для моделирования рассеивания горячих аварийных выбросов [18], [20].

## 1.6 Программные средства моделирования

Отдельно уделим внимание работам, направленным на создание программных или управленческих комплексов, предназначенных для регулирования качества атмосферного воздуха. Результаты обзора представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Работы о программных комплексах

Название работы	Тип модели	Краткое содержание
Анализ средств управления качеством атмосферного воздуха в условиях крупного города	К-модель (Берлянда)	Статья посвящена анализу расчёта рассеивания на основании данных инвентаризации с помощью Унифицированных программ расчета загрязнения атмосферы УПРЗА, в частности системы «Лада» города Перми, которая была направлена на изменение нормативов ПДВ при изменении процессов и реагирование государства на жалобы граждан. Её эксплуатация выявила ряд недостатков – недостаточную точность методики ввиду высокой статичности модели, следствием явилось несоответствие расчётных значений и инструментальных замеров. Авторы предлагают следующие мероприятия: - обеспечение системы детальной и оперативной информацией о выбросах предприятий;

Продолжение таблицы 3

Название работы	Тип модели	Краткое содержание
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- обеспечить систему оперативной информацией о приземной концентрации загрязняющих веществ с метеопостов;</li> <li>- обеспечить систему оперативной информацией о температуре, направлении ветра на высотах до 1000 метров;</li> <li>- использовать более совершенные математические модели, поскольку используемая модель выдаёт максимальные приземленную концентрацию [7]</li> </ul>
Моделирование загрязнения атмосферного воздуха промышленными объектами в технологии геоинформационных систем	К-модель (Берлянда)	Авторами на основании модели Берлянда на языке программирования Python была написана программа, позволяющая динамически следить за изменением приземных концентраций, а также позволяла учитывать воздействие нескольких источников и эффект суммации [11]
Применение OpenGL в построении сетки рассеивания выбросов в атмосферу дорожно – строительной техникой	К-модель (Берлянда)	Авторами рассмотрено использование программы OpenGL для определения рассеивания выбросов, образующихся при работе мобильного источника – дорожно – строительной техники. Математической базой программы является модель Берлянда. Сопоставление с результатами измерений в данной работе не производилось [20]
Применение сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха для решения задач по управлению качеством окружающей среды	К-модель (Берлянда)	<p>Автором рассматривается потенциал применения сводных расчётов, формируемых на основе данных о возможно большем числе источников. Автор выделяет следующие области применения сводных расчётов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- нормирование выбросов путём квотирования;</li> <li>- оценка корректности установленных предельно – допустимых выбросов;</li> <li>- оценка возможности наращивания мощностей и строительства новых производств;</li> <li>- оценка вклад транспорта в загрязнение окружающей среды;</li> <li>- поддержка мероприятий государственного надзора при превышении фактических значений над расчётными [23].</li> </ul>

Продолжение таблицы 3

Название работы	Тип модели	Краткое содержание
Автоматизированная система поддержки принятия решений для прогнозирования процессов рассеивания химически опасных веществ	Гауссова (Паскуилл-Гиффорд)	<p>Авторами обосновывается внедрение системы поддержки принятия решений в случае аварийных ситуаций. На основании расчёта и его сопоставления с натурными исследованиями, а при отклонении натуральных показателей при корректировке расчёта, принимается решения о принимаемых мерах.</p> <p>Авторами рассматривался выброс от единичного источника, однако есть возможность использования указанных зависимостей для нескольких источников. Главной ценности настоящей работы является предложение использования модели Паскуилла-Гиффорда, предназначенной для стационарных источников, для моделирования рассеивания выбросов от нестационарных аварийных выбросов путём сопоставления первичного ориентировочного расчёта с натурными измерениями и последующей корректировкой [22]</p>
Моделирование распространения в атмосфере загрязняющих веществ выбросов электростанций на базе программного комплекса «Skat»	Гауссова (Паскуилл-Гиффорд)	<p>Данная статья интересна тем, что проводит сравнение моделей на основе моделей Берлянда и Гаусса, приводит к выводам:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- при опасной скорости ветра, при которой достигается максимальная концентрация, обе методики выдают близкие значения;</li> <li>- при благоприятных метеоусловиях результаты расчётов существенно разнятся, для модели Берлянда мало зависит от метеоусловий, что противоречит здравому смыслу;</li> <li>- главный вывод заключается в том, что использование метода Паскуилла (базируется на методе Гаусса), предпочтительнее, поскольку учитывает метеоусловия и характеристик подстилающей поверхности.</li> </ul> <p>Однако авторами не проводится проверка моделей на адекватность [3]</p>

Большинство приведённых работа посвящено созданию программных комплексов, использующих модели Берлянда и Паскуилла – Гиффорда.

## 1.7 Выводы по результатам литературного обзора

На основании проведённого обзора можем заключить, что каждая из описываемых моделей обладает своими недостатками и преимуществами, а также характерной областью применения.

Модель служб гражданской обороны является наиболее оперативной и требует минимального числа исходных данных, что важно при реагировании на техногенную аварию, но не даёт информации о распределении вещества.

Модели Паскуилла – Гиффорда и Берлянда также позволяют провести оперативный расчёт и требуют минимальное число исходных данных, в то же время дают представление о распределении вещества. Сравнив модели Берлянда и Паскуилла – Гиффорда, можем сказать, что модель Паскуилла – Гиффорда более полно учитывает конкретные метеорологические условия, установившиеся на местности, а также влияние характера подстилающей поверхности. В то же время данная модель уступает модели Берлянда тем, что не учитывает влияние суммации и охватывает существенно меньший радиус действия. В то же время модели имеют общие недостатки – обе модели применяют осреднение за определённый период времени, что не позволяет учитывать воздействие мощных мгновенных источников, обуславливает сугубо пространственный характер моделей. Эти модели являются наиболее применимыми в вопросе нормирования выбросов.

Мезомасштабная и региональная модели Института экспериментальной метеорологии, а также модель Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН требуют большого числа исходных данных и используют мощный математический аппарат, и использование их требует серьёзного метеорологического обеспечения и создания специализированных программных комплексов. Эти причины обуславливают исследовательскую направленность указанных моделей.

Таким образом, необходима выработка алгоритма выбора модели.

## 2 Разработка алгоритма выбора математической модели

### 2.1 Разработка общего алгоритма выбора математической модели

При изучении того или иного явления, в нашем случае атмосферной дисперсии, посредством математического моделирования, исследователь сталкивается с определённым массивом моделей, разработанных разными научными школами, а также массивом научно – технической документации. В таких условиях на первый план выходит систематизирующая функция науки, выстраивающая научное знание по определённой системе и позволяющая вести сравнительный анализ подходов к решению определённой задачи.

В разделе 1 явление атмосферной дисперсии было рассмотрено с точки зрения процессов переноса субстанции, приведена классификация используемых моделей по методологическому признаку. В настоящем разделе нами будет разрабатываться алгоритм выбора математической модели путём сравнительного анализа. Приведём алгоритм в общем виде на рисунке 4.

Опишем приведённый алгоритм. Итак, на основании анализа научно – технической литературы исследователем выявлено множество моделей  $M_1$ - $M_V$ , описывающих то или иное явление. На следующем этапе производится определение цели расчёта – выбор переменных, которые в конкретном случае интересуют исследователя. Дальнейшему рассмотрению подвергаются модели, соответствующие потребностям исследователя, способные предоставить ему требуемую информацию, образуя множество моделей  $N_1$ - $N_K$ , причем  $K$  меньше или равно  $V$ . Выделенное множество подвергается анализу на предмет соответствия предполагаемого расчёта ограничивающим параметрам. Дальнейшему рассмотрению подвергаются модели, отвечающие указанным параметрам, образуя множество  $Z_1$ - $Z_T$ , причем  $T$  меньше или равно  $K$ .

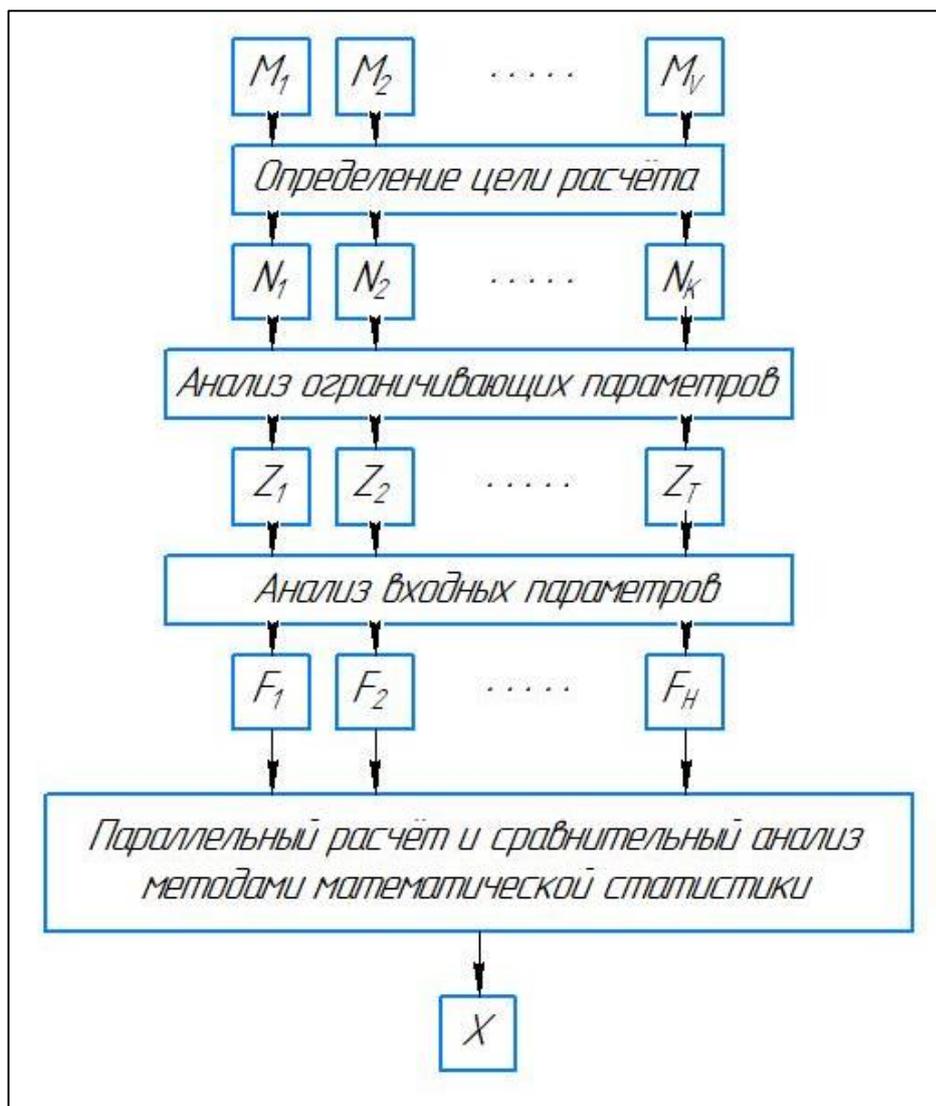


Рисунок 4 – Алгоритм выбора модели в общем виде

Выделенное множество подвергается анализу на предмет обеспеченности исследователя входными данными для расчёта. Дальнейшему рассмотрению подвергаются модели, отвечающие указанным параметрам, образуя множество  $F_1$ - $F_H$ , причем  $H$  меньше или равно  $T$ . Данное множество подвергается параллельному расчёту, результаты которого подвергаются сравнительному анализу методами математической статистики. На данном этапе выбирается модель  $X$ , обеспечивающая большую точность расчёта, и в дальнейшем используется в качестве рабочей модели.

## 2.2 Разработка алгоритма выбора дисперсионной модели

Приведём детальный алгоритм для выбора модели, направленной на изучение процесса атмосферной дисперсии. Прежде представим каждую анализируемую нами математическую модель в виде «чёрного ящика», обладающего некоторыми входными, выходными и ограничивающими параметрами, и визуализируем это на рисунках 5-10 для последующей разработки алгоритма. На основании общего алгоритма, отображённого на рисунке 4, и анализа моделей согласно схемам, представленным на рисунках 5-10, выработаем детальный алгоритм для выбора дисперсионной модели, приведём его на рисунках 11 и 12.

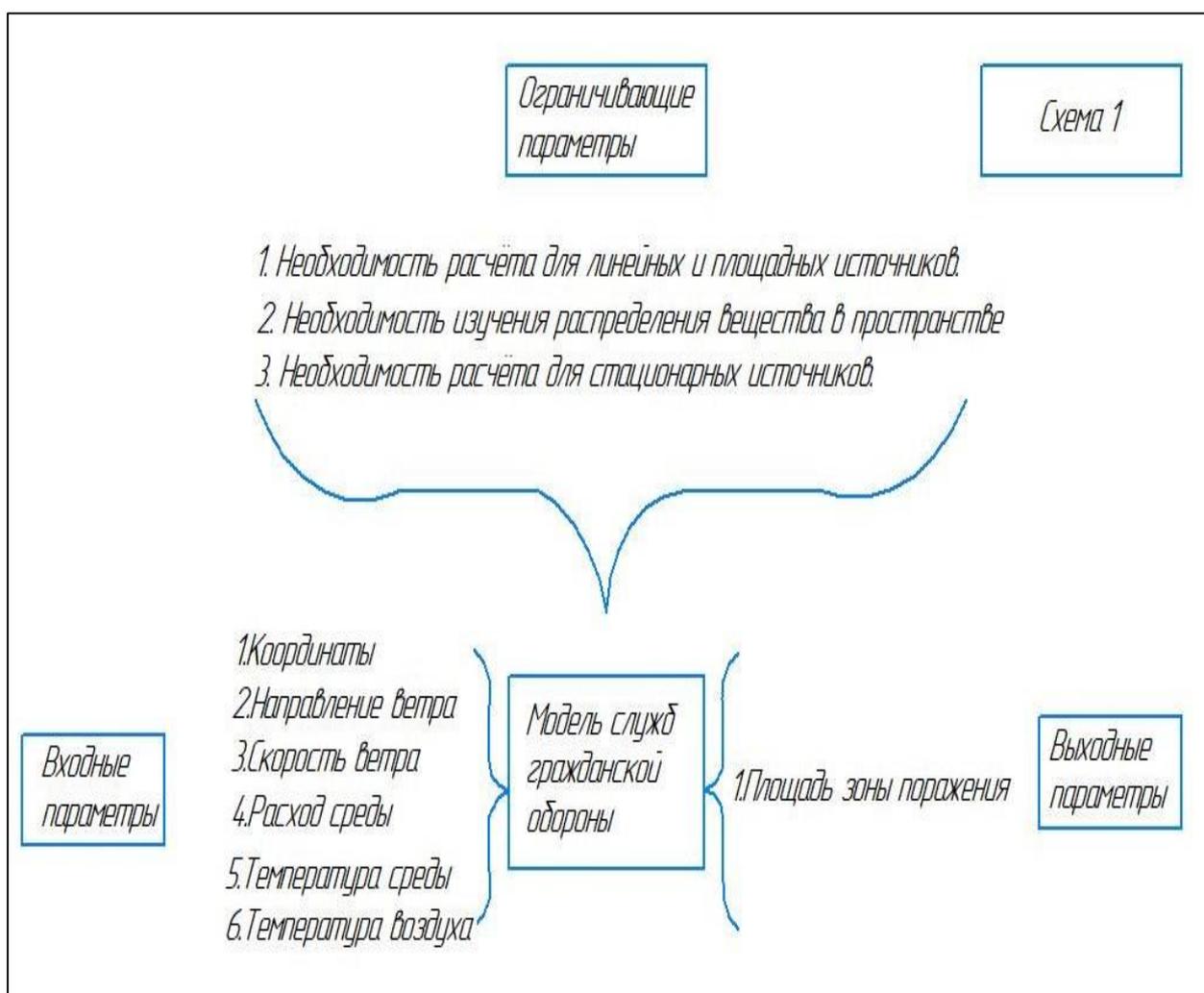


Рисунок 5 – Модель служб гражданской обороны (Схема 1)

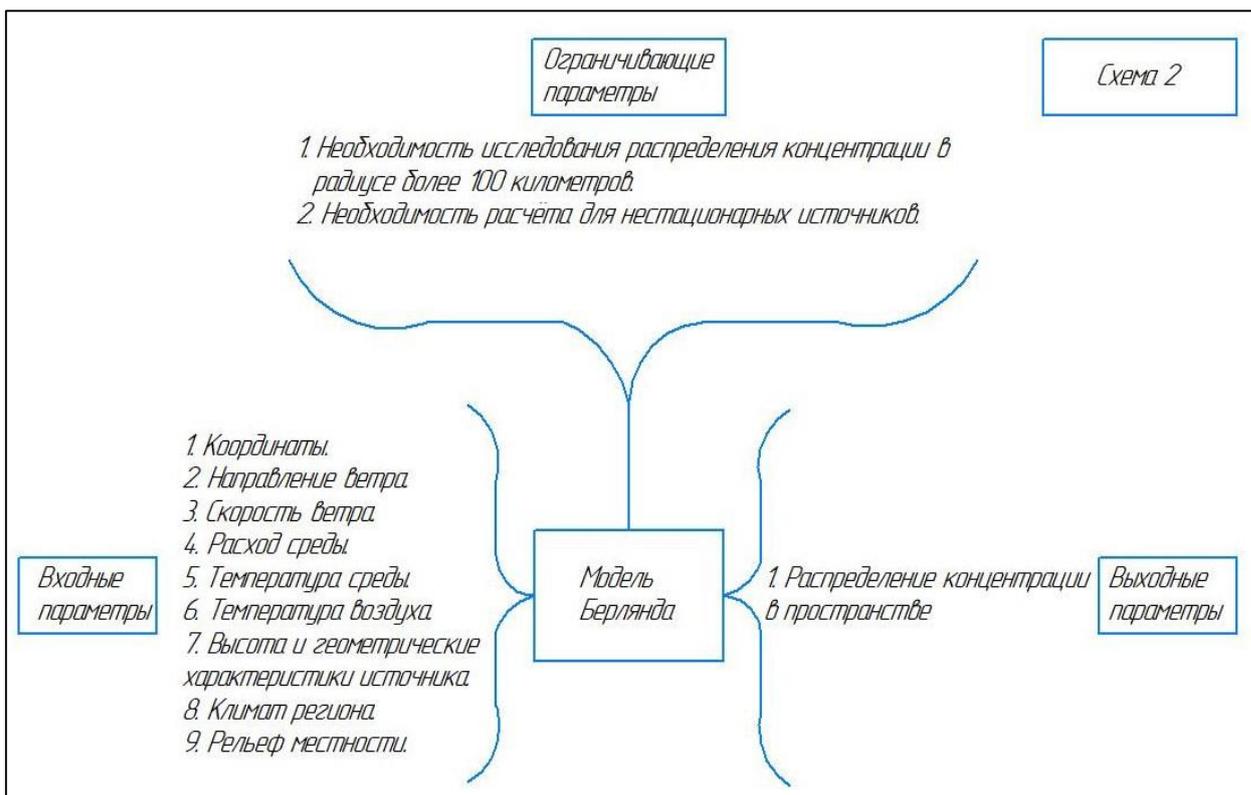


Рисунок 6 – Модель Берлянда (Схема 2)



Рисунок 7 – Модель Паскуилла – Гиффорда (Схема 3)

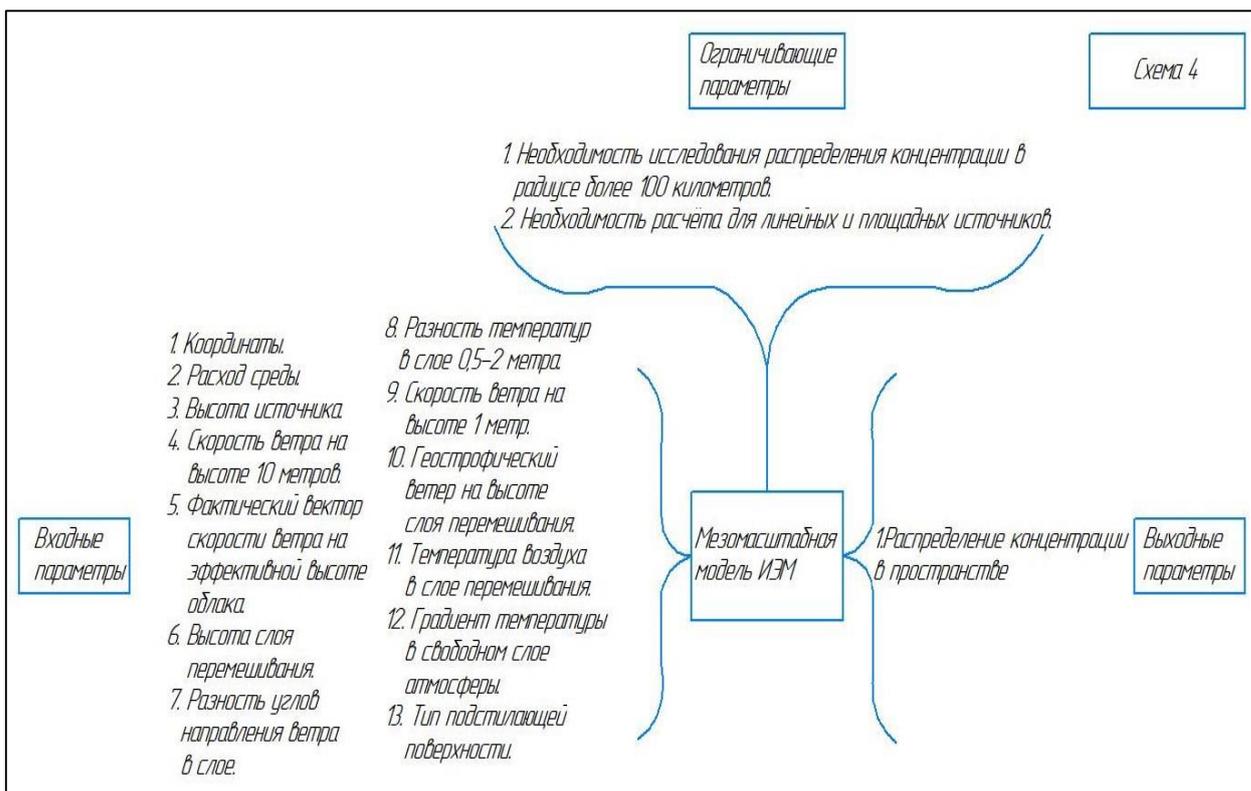


Рисунок 8 – Мезомасштабная модель ИЭМ (Схема 4)

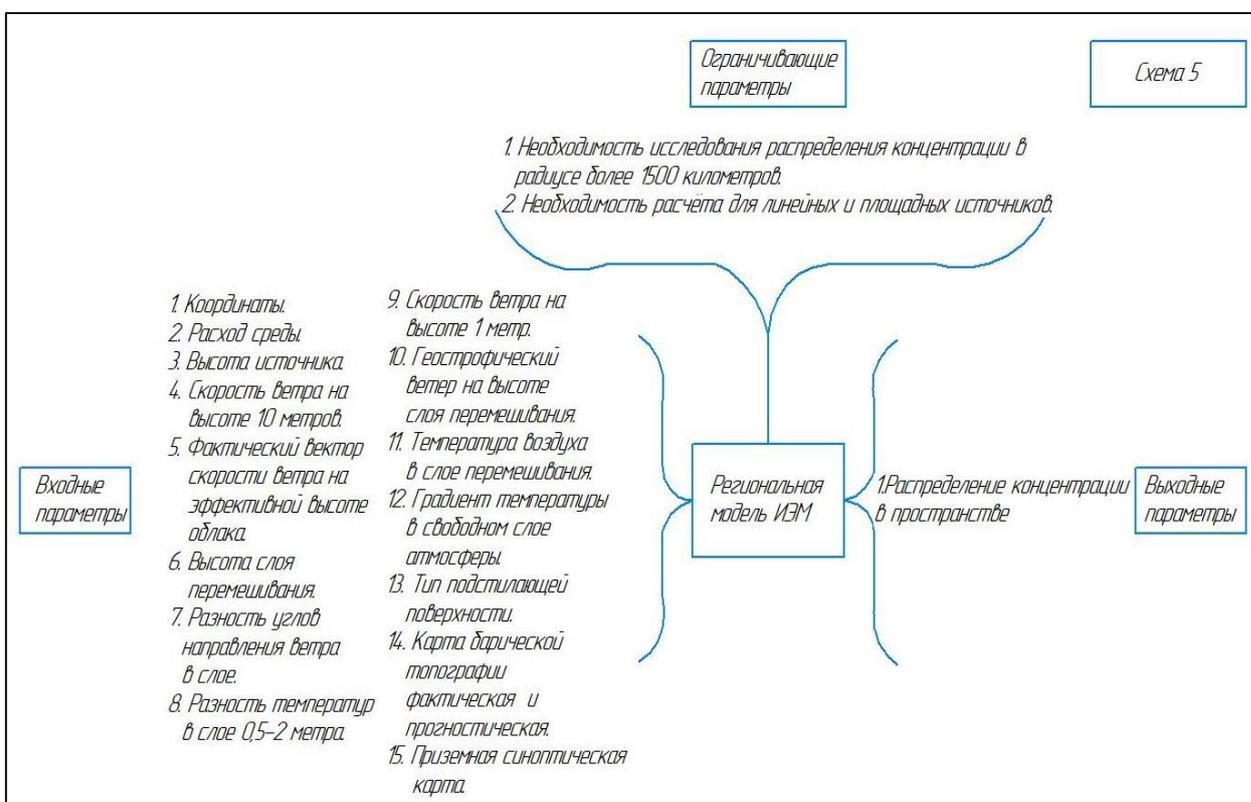


Рисунок 9 – Региональная модель ИЭМ (Схема 5)

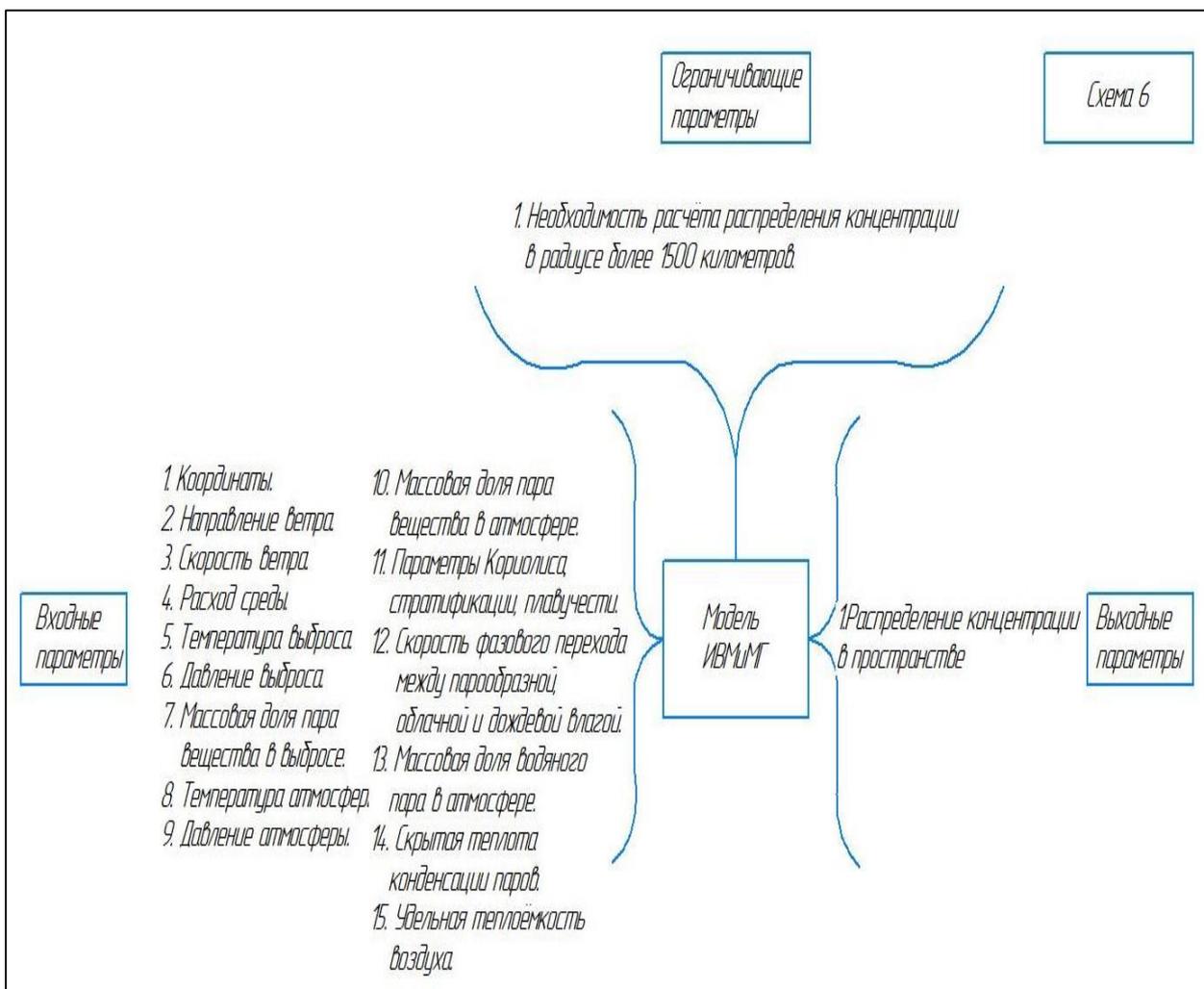


Рисунок 10 – Модель ИВМиМГ (Схема 6)

Стоит отметить, что представление математических моделей в виде «чёрного ящика» является ценным инструментом при разработке алгоритма выбора модели, поскольку позволяет систематизировать и наглядно предоставить выходные параметры модели, провести анализ соответствия ограничивающим параметрам и обеспеченности входными параметрами.

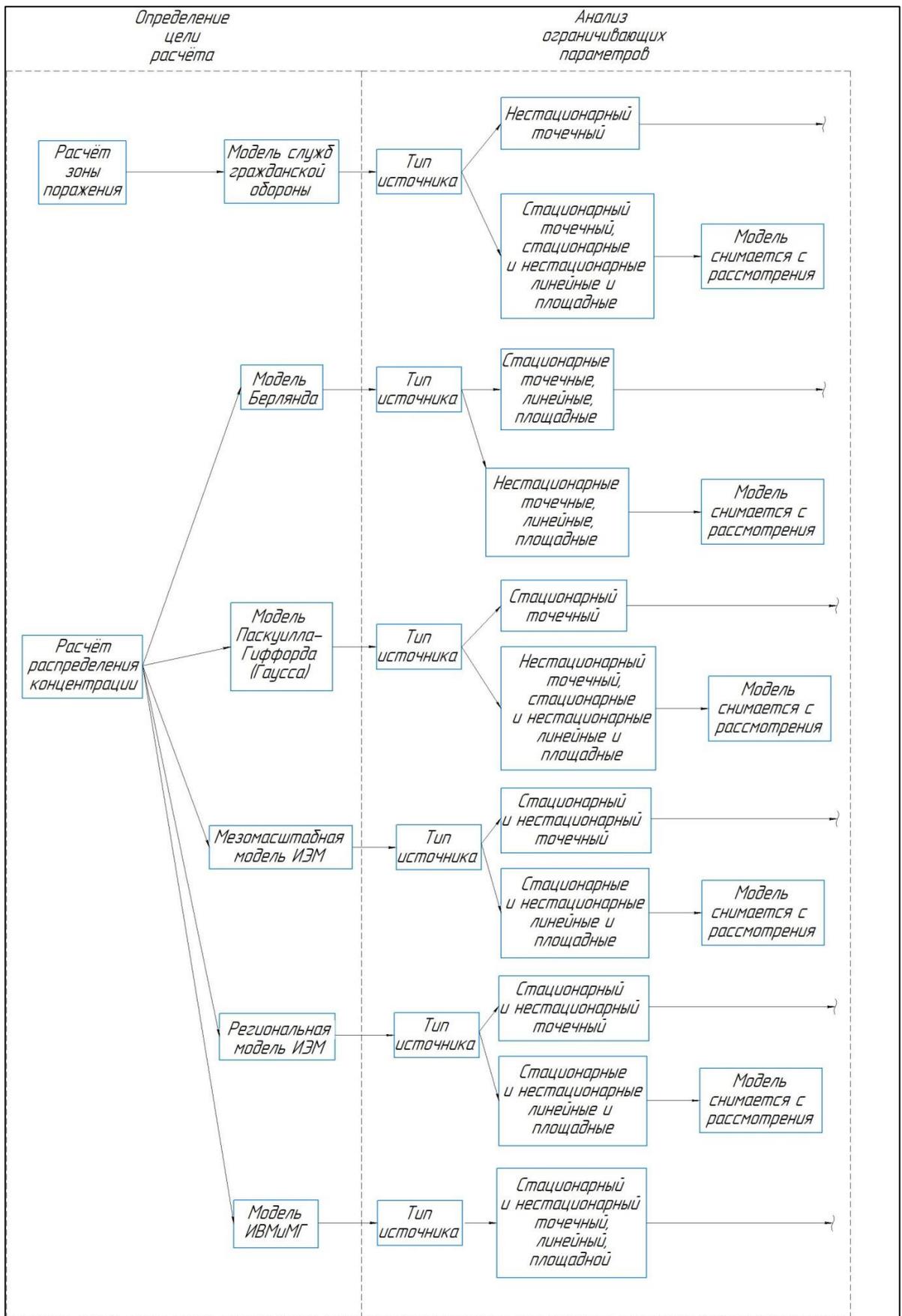


Рисунок 11 – Алгоритм выбора методики-начало

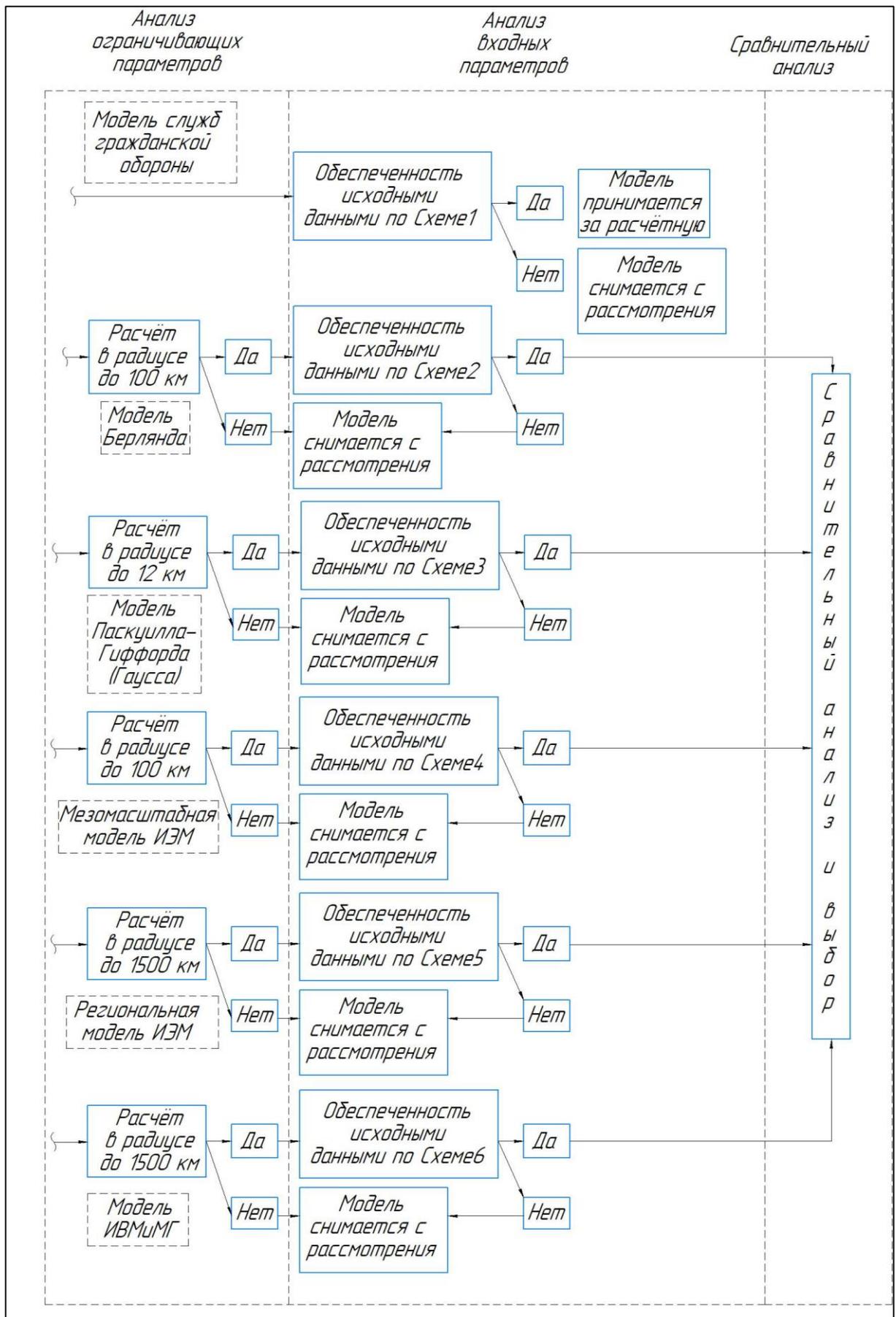


Рисунок 12 - Алгоритм выбора методики-продолжение

Проанализируем полученный алгоритм.

На первой стадии определяется цель расчёта и выделяется две группы моделей – позволяющие рассчитать зону поражения или распределение вещества в пространстве. Первую группу составляет модель служб гражданской обороны; вторую – модели Берлянда и Паскуилла – Гиффорда, мезомасштабная и региональная модели Института экспериментальной метеорологии, модель Института вычислительной математики и математической геофизики.

На втором этапе осуществляется анализ ограничивающих параметров, включающий оценку возможности расчёта в предполагаемом радиусе загрязнения и возможности расчёта для данного типа источников.

На третьей стадии осуществляется анализ входных параметров моделей в соответствии с разработанными схемами моделей.

На четвертой стадии модели, прошедшие первый, второй и третий этапы отбора, подвергаются сравнительному статистическому анализу, методология которого будет разрабатываться в разделе 3 настоящей работы.

Детальный алгоритм выбора дисперсионной модели, представленный на рисунках 11 – 12, является частным случаем общего алгоритма, приведённого на рисунке 4, полученный из него на основе анализа моделей путём разработки схем – «черных ящиков», представленных на рисунках 5 – 10.

Таким образом, детализация общего алгоритма в совокупности с анализом моделей путём разработки приведённых выше схем позволяет использовать его для разработки детальных алгоритмов выбора математических моделей, используемых в разных областях науки и техники.

Апробация предложенного алгоритма будет приведена в подразделе 3.

### **3 Реализация алгоритма выбора дисперсионной модели**

#### **3.1 Анализ данных для расчёта**

До того, как приступить собственно к реализации алгоритма, выполним постановку задачи и проанализируем имеющиеся в нашем распоряжении исходные данные, в частности данные об источнике выброса и данные о результатах исследований качества атмосферного воздуха Центрального района города Тольятти.

По данным работы Аладинской А.Р.[1]:

– выброс аммиака от ПАО «КуйбышевАзот» составляет 18,658 г/с, от ООО «ТольяттиКаучук» - 3,987 г/с;

– выброс оксида азота II от ПАО «КуйбышевАзот» составляет 2,516 г/с, от ООО «ТольяттиКаучук» - 3,705 г/с;

В осуществляемом нами вычислительном эксперименте мы будем рассматривать модельный источник, параметры которого приведены в таблице 4. Для сравнения подобраны измерения, выполняемые при направлениях ветра, позволяющих не учитывать вклад ПАО «ТольяттиАзот» в картину загрязнения атмосферного воздуха Центрального района города Тольятти.

Данные о концентрации загрязняющих веществ в воздухе атмосферного воздуха взяты из протоколов Передвижного экологического поста, опубликованных на сайте Администрации городского округа Тольятти. Единой открытой базы данных о метеорологических параметрах в Тольятти нет, по этой причине данные о метеорологических условиях приняты путём сопоставления данных нескольких открытых источников, расстояние от источника до места отбора пробы вычислены прямым снятием с карты, указанные данные приведены в таблице 5.

Таблица 4 – Характеристики модельного источника выбросов

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значение
Горизонтальные координаты	$X_0$	м	1 328 300
Вертикальные координаты	$Y_0$	м	427 700
Высота	$H$	м	10
Мощность по аммиаку	$M_{AM}$	г/с	22,645
Мощность по оксиду азота	$M_{OА}$	г/с	6,266
Диаметр устья	$D$	м	1
Скорость газовой воздушного потока в устье	$w$	м/с	5
Температура газовой воздушного потока	$T_B$	$^{\circ}C$	плюс 20

Таблица 5 – Результаты измерений и метеорологические характеристики

Номер измерения	Дата и время измерения	Место измерения (Местность)	Расстояние X, м	Расстояние Y, м	Температура воздуха $T_{возд}, ^{\circ}C$	Скорость ветра $u, м/с$	Направление Ветра (Инсоляция)	Концентрация аммиака/оксида азота $C, мг/м^3$
1	31.03.22 11:52- 12:22	Ул. 50 лет Октября д.65 (Городская)	3940	600	+2	6	Северо-Восточный (Слабая)	0,032/ 0,015
2	13.04.22 9:32- 10:02	Ул. Победы д.8 (Городская)	3740	600	+12	6	Северо-Восточный (Слабая)	0,026/ 0,021

Продолжение таблицы 5

Номер измерения	Дата и время измерения	Место измерения (Местность)	Расстояние Х,м	Расстояние У,м	Температура воздуха Т <sub>возд</sub> , °С	Скорость ветра ц, м/с	Направление Ветра (Инсоляция)	Концентрация аммиака/оксида азота С, мг/м <sup>3</sup>
3	31.05.22 23:53-00:23	Ул. Банькина д.52 (Городская)	5600	1150	+9	7	Северный (Балл облачности 5)	0,009/ 0,014
4	09.06.22 12:10-12:40	Ул. Мира д.104 (Городская)	5300	1050	+17	6	Северный (Слабая)	0,009/ 0,005
5	26.07.22 11:02-11:32	Ул. Ленина д.78 (Городская)	4880	550	+17	5	Северо-Восточный (Слабая)	0,024/ 0,035
6	18.08.22 11:59-12:29	Ул. Ленина д.81 (Городская)	5160	800	+17	5	Северо-Восточный (Слабая)	0,025/ 0,010
7	12.09.22 22:01-22:31	Ул. Самарская д.68 (Городская)	4860	800	+14	7	Северо-Восточный (Балл облачности 5)	0,036/ 0,012
8	22.11.22 15:08-15:38	Ул. Лесная д.62 (Городская)	5960	380	-1	5	Северо-Восточный (Слабая)	0,038/ 0,015
9	02.12.22 10:07-10:37	Ул. Ленина, д. 43 (Городская)	4520	630	-8	5	Северо-Восточный (Слабая)	0,042/ 0,021

Для демонстрации предлагаемого алгоритма выбора дисперсионной модели автором на основе программы Microsoft Excel разработана полуавтоматическая программа «Дисперсия», состоящая из нескольких подпрограмм. Для определения цели моделирования, анализа ограничивающих и входных параметров следует воспользоваться подпрограммой «Алгоритм», предоставленной на рисунке 13.

МЧС	Берлянд	Паскуилл	Мез. ИЭМ	Рег. ИЭМ	ИВМИМГ	
Нет	Да	Да	Да	Да	Да	Цель
						Соответствует ли данная модель цели расчёта?
-	Да	Да	Да	Да	Да	Ограничивающие параметры
						Соответствует ли радиус предельному для данной модели
-	Да	Да	Да	Да	Да	Соответствует ли тип источника допустимого для данной модели?
1 -	1 Да	1 Да	1 Да	1 Да	1 Да	
2 -	2 Да	2 Да	2 Да	2 Да	2 Да	
3 -	3 Да	3 Да	3 Да	3 Да	3 Да	Входные параметры
4 -	4 Да	4 Да	4 Да	4 Да	4 Да	Обеспечена ли данная модель входными параметрами?
5 -	5 Да	5 Да	5 Нет	5 Нет	5 Да	
6 -	6 Да	6 Да	6 Нет	6 Нет	6 Нет	Номера соответствуют номерам входных параметров
	7 Да	7 Да	7 Нет	7 Нет	7 Нет	
	8 Да		8 Нет	8 Нет	8 Да	
	9 Да		9 Нет	9 Нет	9 Да	
			10 Нет	10 Нет	10 Нет	согласно Схемам 1-6 для каждой модели индивидуально.
			11 Нет	11 Нет	11 Нет	
			12 Нет	12 Нет	12 Нет	
			13 Да	13 Да	13 Нет	
				14 Нет	14 Нет	
				15 Нет	15 Да	
-	Да	Да	Нет	Нет	Нет	Вывод применимости
						Во всех ли пунктах для данной модели да?

Рисунок 13 – Подпрограмма «Алгоритм»

Подпрограмма «Алгоритм» представляет собой заполняемый исследователем бланк.

Целью нашего расчёта является определение концентрации в конкретной точке пространства, по этой причине модель служб гражданской обороны снимается с рассмотрения на первом этапе.

Расчёт будет производиться для стационарного точечного источника в радиусе до 10 километров. Согласно рисункам 5 – 12, на втором этапе для всех анализируемых моделей ограничивающие условия удовлетворены, модели подвергаются дальнейшему рассмотрению.

Далее оцениваем обеспеченность исходными данными. Для каждой модели номера входных данных индивидуальны и соответствуют номерам, приведённым на схемах 5 – 10. На основании имеющихся у нас данных заполняем соответствующие поля. В результате видим, что на данном этапе выявлена недостаточная обеспеченность данными для расчёта по мезомасштабной и региональной моделям Института экспериментальной метеорологии и модель Института вычислительной математики и математической геофизики.

Таким образом, дальнейшему рассмотрению будут подвержены модель Берлянда и модель Паскуилла – Гиффорда. Следующий шаг – выполнение параллельного расчёта по данным методикам.

### **3.2 Расчёт по модели Берлянда**

Приведём алгоритм расчёта рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосферном воздухе по модели Берлянда [16] и выполним расчёт для двух загрязняющих веществ – аммиака и оксида азота. В исследовательских целях концентрация определяется при опасной скорости ветра, поскольку данные о скорости ветра усреднены за период больше 30 минут, то есть периода осреднения согласно методике.

Расход газовой смеси определим по формуле 24:

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot w \quad (24)$$

где  $V$  – расход смеси, м<sup>3</sup>/с;

$D$  – диаметр устья, м;

$w$  – скорость потока, м/с.

Коэффициенты, характеризующие источник выброса, определим по формулам 25 – 28.

$$v_m = 0,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{V \cdot (T_B - T_{oc})}{H}} \quad (25)$$

$$v_m' = 1,3 \cdot \frac{w \cdot D}{H} \quad (26)$$

$$f = 1000 \cdot \frac{w^2 \cdot D}{H^2 \cdot (T_B - T_{oc})} \quad (27)$$

$$f_e = 800 \cdot (v_m')^3 \quad (28)$$

где  $T_B$  – температура газовой смеси, °С;

$T_{oc}$  – температура окружающей среды, °С.

Коэффициент  $m$  определяем по формулам 29 – 30 в зависимости от параметров источника.

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{f} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{f}} \text{ при } f < 100 \quad (29)$$

$$m = \frac{1,47}{\sqrt[3]{f}} \text{ при } f \geq 100 \quad (30)$$

Коэффициент  $n$  определяем по формулам 22 – 24 в зависимости от параметров источника при  $f$  меньше 100.

$$n = 4,4 \cdot v_M \text{ при } v_M < 0,5 \quad (31)$$

$$n = 0,532 \cdot v_M^2 - 2,13 \cdot v_M + 3,13 \text{ при } 0,5 \leq v_M < 2 \quad (32)$$

$$n = 1 \text{ при } v_M \geq 2 \quad (33)$$

Концентрация определяется по формуле 34, упоминавшейся ранее в виде формулы 10.

$$C_{\max} = \frac{A \cdot F \cdot M \cdot m \cdot n}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V \cdot \Delta T}} \quad (34)$$

Коэффициент  $d$  определяем по формулам 35 – 37 в зависимости от параметров источника при  $f$  меньше 100.

$$d = 2,48 \cdot (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{f_e}) \text{ при } v_M < 0,5 \quad (35)$$

$$d = 4,95 \cdot v_M \cdot (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{f_e}) \text{ при } 0,5 \leq v_M < 2 \quad (36)$$

$$d = 7 \cdot \sqrt{v_M} \cdot (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{f_e}) \text{ при } v_M \geq 2 \quad (37)$$

Расстояние, на котором достигается максимальная концентрация, определяется по формуле 38.

$$X_M = \frac{5-F}{4} \cdot d \cdot H \quad (38)$$

Концентрация на другом удалении по оси факела определяется по формуле 39, коэффициент уравнения определяют по формулам 40 – 43 в зависимости от соотношения.

$$C = S_1 \cdot C_M \quad (39)$$

$$S_1 = 3 \cdot \left(\frac{X}{X_M}\right)^4 - 8 \cdot \left(\frac{X}{X_M}\right)^3 + 6 \cdot \left(\frac{X}{X_M}\right)^2 \text{ при } \frac{X}{X_M} \leq 1 \quad (40)$$

$$S_1 = \frac{1,13}{0,13 \cdot \left(\frac{X}{X_M}\right)^2 + 1} \text{ при } 1 < \frac{X}{X_M} \leq 8 \quad (41)$$

$$S_1 = \frac{\frac{X}{X_M}}{3,556 \cdot \left(\frac{X}{X_M}\right)^2 - 35,2 \cdot \frac{X}{X_M} + 120} \text{ при } 8 < \frac{X}{X_M} \leq 100 \quad (42)$$

$$S_1 = 144,3 \cdot \left(\frac{X}{X_M}\right)^{-\frac{7}{3}} \text{ при } \frac{X}{X_M} > 100 \quad (43)$$

Концентрация по нормали к оси факела определяется по формуле 44, коэффициент уравнения находим по формуле 45. Коэффициент формулы 45 определим по формулам 46 – 47.

$$C_y = s_2 \cdot C \quad (44)$$

$$s_2 = \frac{1}{(1 + 5 \cdot t_y + 12,8 \cdot t_y^2 + 17 \cdot t_y^3 + 45,1 \cdot t_y^4)^2} \quad (45)$$

$$t_y = \frac{u \cdot y^2}{x^2} \text{ при } u \leq 5 \text{ м/с} \quad (46)$$

$$t_y = \frac{5 \cdot y^2}{x^2} \text{ при } u > 5 \text{ м/с} \quad (47)$$

где  $u$  – скорость ветра, м/с.

Расчёт будет осуществляться с помощью подпрограммы «Берлянд», приведённой на рисунке 14. Детально приведём расчёт для первого измерения по аммиаку, результаты расчёта для следующих измерений и промежуточные расчётные данные будут приведены для аммиака в таблицах 6 – 7, для оксида азота в таблицах 8 – 9, а также в Приложении А.

$$V = \frac{\pi \cdot 1^2}{4} \cdot 5 = 3,925 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$v_M = 0,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{3,925 \cdot (20 - 2)}{10}} = 1,247$$

$$v_M' = 1,3 \cdot \frac{5 \cdot 1}{10} = 0,65$$

$$f = 1000 \cdot \frac{5^2 \cdot 1}{10^2 \cdot (20 - 2)} = 13,889$$

$$f_e = 800 \cdot (0,65)^3 = 219,7$$

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{13,889} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{13,889}} = 0,538$$

$$n = 0,532 \cdot 1,247^2 - 2,13 \cdot 1,247 + 3,13 = 1,301$$

$$C_{\max} = \frac{200 \cdot 1 \cdot 22,645 \cdot 0,538 \cdot 1,301}{10^2 \cdot \sqrt[3]{3,925 \cdot 18}} = 7,663$$

$$d = 4,95 \cdot 1,247 \cdot (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{219,7}) = 16,605$$

$$X_M = \frac{5-1}{4} \cdot 16,605 \cdot 10 = 166,048$$

$$S_1 = \frac{\frac{3940}{166,048}}{3,556 \cdot \left(\frac{3940}{166,048}\right)^2 - 35,2 \cdot \frac{3940}{166,048} + 120} = 0,0184$$

$$C = 0,0184 \cdot 7,663 = 0,141$$

$$t_y = \frac{5 \cdot 600^2}{3940^2} = 0,116$$

$$s_2 = \frac{1}{(1 + 5 \cdot 0,116 + 12,8 \cdot 0,116^2 + 17 \cdot 0,116^3 + 45,1 \cdot 0,116^4)^2} = 0,313$$

$$C_y = 0,313 \cdot 0,141 = 0,0443$$

Таблица 6 – Результаты расчёта по аммиаку, часть первая

Номер измерения	Параметр									
	$V, \text{м}^3/\text{с}$	$v_M$	$v_M'$	$f$	$f_e$	$m$	$n$	$C_{\text{max}}, \text{мг}/\text{м}^3$	$d$	$X_M$
1	3,925	1,247	0,650	13,889	219,7	0,538	1,301	7,663	16,605	166,048
2	3,925	0,952	0,650	31,250	219,7	0,435	1,585	9,891	12,672	126,718
3	3,925	1,058	0,650	22,727	219,7	0,474	1,472	9,004	14,091	140,910
4	3,925	0,686	0,650	83,333	219,7	0,326	1,919	12,450	9,138	91,380
5	3,925	0,686	0,650	83,333	219,7	0,326	1,919	12,450	9,138	91,380
6	3,925	0,686	0,650	83,333	219,7	0,326	1,919	12,450	9,138	91,380
7	3,925	0,865	0,650	41,667	219,7	0,401	1,686	10,680	11,513	115,131
8	3,925	1,313	0,650	11,905	219,7	0,558	1,250	7,264	17,480	174,803
9	3,925	1,445	0,650	8,929	219,7	0,597	1,163	6,568	19,240	192,396

Таблица 7 – Результаты расчёта по аммиаку, часть вторая

Номер измерения	Параметр					
	$X/X_M$	$S_1$	$C, \text{мг}/\text{м}^3$	$t_y$	$S_2$	$C_y, \text{мг}/\text{м}^3$
1	23,728	0,0184	0,141	0,116	0,313	0,0443
2	29,514	0,0135	0,134	0,129	0,276	0,0370
3	39,742	0,00916	0,0825	0,211	0,121	0,0100
4	58,000	0,00578	0,0719	0,196	0,140	0,0101
5	53,404	0,00637	0,0793	0,0635	0,529	0,0420
6	56,468	0,00596	0,0742	0,120	0,300	0,0223
7	42,213	0,00849	0,0907	0,135	0,258	0,0234
8	34,095	0,00111	0,0811	0,0203	0,816	0,0662
9	23,493	0,0187	0,123	0,0971	0,378	0,0465

		Исходные данные				Вариант $f_e > f, f < 100, dT = > 0,5$				
		Результат расчёта								
		Выбрать из вариантов								
1	Расчёт расхода смеси	$\rho_i$	$w, \text{м/с}$	$D, \text{м}$	$V, \text{м}^3/\text{с}$					
		3,14	5	1	3,925					
2	Коэффициенты источника	$T_b, \text{°C}$	$T_{oc}, \text{°C}$	$H, \text{м}$	$v_m$	$v_m'$	$f$	$f_e$		
		20	2	10	1,247242	0,65	13,88889	219,7		
3	Коэффициенты $m$ и $n$	$m(f < 100)$		$n, v_m < 0,5$	$n [0,5; 2)$	$n \Rightarrow 2$	$n$			
		0,537648		5,487865	1,30096	1	1,30096			
4	Концентрация приземная	$A$	$M, \text{г/с}$	$F$	$C_m, \text{мг/м}^3$					
		200	22,645	1	7,662911					
5	Дальность при $C_m$	$d, v_m < 0,5$	$d [0,5; 2)$	$d \Rightarrow 2$	$d$	$X_m, \text{м}$	$X, \text{м}$	$X/X_m$		
		6,670055	16,6048	21,02573	16,6048	166,048	3940	23,72808		
6	Концентрация на $X$	$s_1, \text{кг/км}^2 \leq 1$	$s_1 [1; 8)$	$s_1 [8; 100]$	$s_1 \geq 100$	$s_1$	$C, \text{мг/м}^3$	$Y, \text{м}$	$u, \text{м/с}$	
		847482,8	0,015231	0,018439	0,089191	0,018439	0,141293	600	6	
7	Концентрация по нормали	$t_y, u < 5$	$t_y, u \geq 5$	$t_y$	$s_2$	$C_y$				
		0,139143	0,115952	0,115952	0,31332	0,04427				

Рисунок 14 – Подпрограмма «Берлянд»

Таблица 8 – Результаты расчёта по оксиду азота, часть первая

Номер измерения	Параметр									
	$V, \text{м}^3/\text{с}$	$v_m$	$v_m'$	$f$	$f_e$	$m$	$n$	$C_{\text{max}}, \text{Мг/м}^3$	$d$	$X_m$
1	3,925	1,247	0,650	13,889	219,7	0,538	1,301	2,120	16,605	166,048
2	3,925	0,952	0,650	31,250	219,7	0,435	1,585	2,737	12,672	126,718
3	3,925	1,058	0,650	22,727	219,7	0,474	1,472	2,492	14,091	140,910
4	3,925	0,686	0,650	83,333	219,7	0,326	1,919	3,445	9,138	91,380
5	3,925	0,686	0,650	83,333	219,7	0,326	1,919	3,445	9,138	91,380
6	3,925	0,686	0,650	83,333	219,7	0,326	1,919	3,445	9,138	91,380
7	3,925	0,865	0,650	41,667	219,7	0,401	1,686	2,955	11,513	115,131
8	3,925	1,313	0,650	11,905	219,7	0,558	1,250	2,010	17,480	174,803
9	3,925	1,445	0,650	8,929	219,7	0,597	1,163	1,817	19,240	192,396

Таблица 9 – Результаты расчёта по оксиду азота, часть вторая

Номер измерения	Параметр					
	$X/X_M$	$S_1$	$C, \text{ мг/м}^3$	$t_y$	$S_2$	$C_y, \text{ мг/м}^3$
1	23,728	0,0184	0,0390	0,116	0,313	0,0122
2	29,514	0,0135	0,0371	0,129	0,276	0,0102
3	39,742	0,00916	0,0228	0,211	0,121	0,00277
4	58,000	0,00578	0,0198	0,196	0,140	0,00279
5	53,404	0,00637	0,0219	0,0635	0,529	0,0116
6	56,468	0,00596	0,0205	0,120	0,300	0,00616
7	42,213	0,00849	0,0251	0,135	0,258	0,00647
8	34,095	0,00111	0,0224	0,0203	0,816	0,0183
9	23,493	0,0187	0,0340	0,0971	0,378	0,0129

Оценка эффективности расчёта будет произведена в подразделе 3.3.

### 3.3 Оценка эффективности расчёта по модели Берлянда

Составим сравнительные таблицы расчётных и экспериментальных данных, по аммиаку – таблица 10, по оксиду азота – таблица 11. После этого изложим предлагаемый метод оценки эффективности расчётной методики.

Таблица 10 – Сравнительная таблица по аммиаку

Порядковый номер измерения	Месяц	Расчётная концентрация по Берлянду, $\text{ мг/м}^3$	Концентрация по результатам измерений, $\text{ мг/м}^3$
1	Март	0,0443	0,0320
2	Апрель	0,0370	0,0260
3	Май	0,0100	0,0090
4	Июнь	0,0101	0,0090
5	Июль	0,0420	0,0240
6	Август	0,0223	0,0250
7	Сентябрь	0,0234	0,0360
8	Ноябрь	0,0662	0,0380
9	Декабрь	0,0465	0,0420

Таблица 11 – Сравнительная таблица по оксиду азота

Порядковый номер измерения	Месяц	Расчётная концентрация по Берлянду, мг/м <sup>3</sup>	Концентрация по результатам измерений, мг/м <sup>3</sup>
1	Март	0,0122	0,0150
2	Апрель	0,0102	0,0210
3	Май	0,00277	0,0140
4	Июнь	0,00279	0,0050
5	Июль	0,0116	0,0350
6	Август	0,00616	0,0100
7	Сентябрь	0,00647	0,0120
8	Ноябрь	0,0183	0,0150
9	Декабрь	0,0129	0,0210

Результаты измерений приводятся за период осреднения, равный 30 минутам, этот же период осреднения характерен для расчётных методик, по этой причине оценка адекватности с использованием критерия Фишера не представляется возможной.

Сравнительный анализ моделей будем осуществлять посредством метода Стьюдента, изложенного в ОФС.1.1.0013.15 [15]. В качестве контролируемой величины предлагается использовать относительную погрешность, определяемую по формуле 48. Результаты расчёта по подпрограмме «Статистика» (рисунок 15) относительных погрешностей приведём в таблицах 12 и 13, а также Приложении Б.

$$\Delta C = \frac{C_{\text{расч}} - C_{\text{эксп}}}{C_{\text{эксп}}} \cdot 100 \quad (48)$$

где  $\Delta C$  – относительная погрешность, процент;

$C_{\text{расч}}$  – расчётная концентрация, мг/м<sup>3</sup>;

$C_{\text{эксп}}$  – экспериментальная концентрация, мг/м<sup>3</sup>.

Таблица 12 – Относительные погрешности по аммиаку

Порядковый номер измерения	Относительная погрешность для модели Берлянда, процент
1	38,438
2	42,308
3	11,111
4	12,222
5	75,000
6	-10,800
7	-35,000
8	74,211
9	10,714

Таблица 13 – Относительные погрешности по оксиду азота

Порядковый номер измерения	Относительная погрешность для модели Берлянда, процент
1	-18,667
2	-51,429
3	-80,214
4	-44,200
5	-66,857
6	-38,400
7	-46,083
8	22,000
9	-38,571

Расчёт статистических характеристик будем осуществлять по описанному ниже алгоритму.

Значения выстраивают по ранжиру, после чего находят размах по формуле 49 и Q – критерий по формуле 50, после чего исключают грубые погрешности, при необходимости процедуру повторяют. Далее определяют среднее квадратичное отклонение по формуле 51, абсолютную погрешность по формуле 52 и записывают доверительный интервал – формулу 53.

$$R = \Delta C_{\text{макс}} - \Delta C_{\text{мин}} \quad (49)$$

$$Q_n = \frac{x_{n+1} - x_n}{R} \quad (50)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum(\Delta c_i - \overline{\Delta c})^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad (51)$$

$$\Delta C_{abc} = S \cdot t \quad (52)$$

$$\Delta C = \overline{\Delta C} \pm \Delta C_{abc} \quad (53)$$

где  $n$  – количество измерений;

$\overline{\Delta C}$  – среднее относительное отклонение;

$t$  – критерий Стьюдента.

Приступим к расчёту для модели Берлянда по аммиаку. Предварительно определим размах и  $Q$  – критерий.

$$R = 75,000 - (-35,000) = 110,000$$

$$Q_1 = \frac{-10,800 - (-35,0)}{110,000} = 0,220$$

$$Q_8 = \frac{75,000 - 74,211}{110,000} = 0,007$$

При доверительной вероятности 0,95 и числе измерений 9 табличный  $Q$  – критерий равен 0,46. Расчётные значения не превышают его, значит, грубых погрешностей нет. Промежуточные расчёты для расчета среднеквадратического отклонения приведем в таблице 14.

Таблица 14 – Промежуточные расчётные данные

n	$\Delta C_i$	$\Delta C_i - \Delta C_{cp}$	$(\Delta C_i - \Delta C_{cp})^2$
1	-35,000	-59,245	3509,957
2	-10,800	-35,045	1228,144
3	10,714	-13,531	183,085
4	11,111	-13,134	172,499
5	12,222	-12,023	144,550
6	38,438	14,193	201,444
7	42,308	18,063	326,276
8	74,211	49,966	2496,612
9	75,000	50,755	2576,081
$\Delta C_{cp}$	24,245	$\Sigma$	10838,649

n	x	x-хср	(x-хср) <sup>2</sup>	Q1	0,22	Срарч	Сэкспп	Δ	n
1	-35	-59,2449	3509,957	Qn	0,007173	0,0122	0,015	-18,6667	1
2	-10,8	-35,0449	1228,144			0,0102	0,021	-51,4286	2
3	10,714	-13,5309	183,085			0,00277	0,014	-80,2143	3
4	11,111	-13,1339	172,499			0,00279	0,005	-44,2	4
5	12,222	-12,0229	144,5499			0,0116	0,035	-66,8571	5
6	38,438	14,19311	201,4444			0,00616	0,01	-38,4	6
7	42,308	18,06311	326,276			0,00647	0,012	-46,0833	7
8	74,211	49,96611	2496,612			0,0183	0,015	22	8
9	75	50,75511	2576,081			0,0129	0,021	-38,5714	9
хср	24,24489	Сумм	10838,65						
R	110								
S	12,26934								
t	2,31								
Хабс	28,34218								
24,24489	28,34218								

Рисунок 15 – Подпрограмма «Статистика»

Осуществим расчёт среднеквадратической погрешности, абсолютной погрешности и приведём доверительный интервал. Для доверительной вероятности 0,95 и числе степеней свободы критерий Стьюдента равен 2,31.

$$S = \sqrt{\frac{10838,649}{9 \cdot (9 - 1)}} = 12,269$$

$$\Delta C_{abc} = 12,269 \cdot 2,31 = 28,341$$

$$\Delta C = (24,245 \pm 28,341)$$

Приступим к расчёту для модели Берлянда по оксиду азота. Предварительно определим размах и Q – критерий.

$$R = 22,000 - (-80,214) = 102,214$$

$$Q_1 = \frac{-66,857 - (-80,214)}{102,214} = 0,131$$

$$Q_8 = \frac{22,000 - (-18,667)}{102,214} = 0,398$$

При доверительной вероятности 0,95 и числе измерений 9 табличный Q – критерий равен 0,46. Расчётные значения не превышают его, значит, грубых погрешностей нет. Промежуточные расчёты для расчета среднеквадратического отклонения приведем в таблице 15.

Таблица 15 – Промежуточные расчётные данные

n	$\Delta C_i$	$\Delta C_i - \Delta C_{cp}$	$(\Delta C_i - \Delta C_{cp})^2$
1	-80,214	-39,945	1595,603
2	-66,857	-26,588	706,922
3	-51,429	-11,16	124,546
4	-46,083	-5,814	33,803
5	-44,200	-3,931	15,453
6	-38,571	1,698	2,883
7	-38,400	1,869	3,493
8	-18,667	21,602	466,646
9	22,000	62,269	3877,428
$\Delta C_{cp}$	-40,269	$\Sigma$	6826,777

Осуществим расчёт среднеквадратической погрешности, абсолютной погрешности и приведём доверительный интервал. Для доверительной вероятности 0,95 и числе степеней свободы критерий Стьюдента равен 2,31.

$$S = \sqrt{\frac{6826,777}{9 \cdot (9 - 1)}} = 9,737$$

$$\Delta C_{abc} = 9,737 \cdot 2,31 = 22,493$$

$$\Delta C = (-40,269 \pm 22,493)$$

Сравнительный анализ будет приведён в подразделе 3.6.

### 3.3 Расчёт по модели Паскуилла - Гиффорда

Приведём алгоритм расчёта рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосферном воздухе по модели Паскуилла - Гиффорда [8] и выполним расчёт для двух загрязняющих веществ – аммиака и оксида азота.

Первым шагом необходимо установить класс устойчивости атмосферы по таблице 2 и выполнить расчёт коэффициентов диффузии в соответствии с указаниями таблицы 16.

Таблица 16 – Формулы для определения коэффициентов диффузии

Класс устойчивости атмосферы Паскуилла	Состояние устойчивости	$\sigma_y$	$\sigma_z$
Открытая местность			
А	Сильно неустойчивое	$0,22 \cdot X \cdot (1 + 0,0001 \cdot X)^{-1/2}$	$0,2 \cdot X$
В	Неустойчивое	$0,16 \cdot X \cdot (1 + 0,0001 \cdot X)^{-1/2}$	$0,12 \cdot X$
С	Слабо неустойчивое	$0,11 \cdot X \cdot (1 + 0,0001 \cdot X)^{-1/2}$	$0,08 \cdot X \cdot (1 + 0,0002 \cdot X)^{-1/2}$
Д	Равновесное	$0,08 \cdot X \cdot (1 + 0,0001 \cdot X)^{-1/2}$	$0,06 \cdot X \cdot (1 + 0,0015 \cdot X)^{-1/2}$
Е	Слабоустойчивое	$0,06 \cdot X \cdot (1 + 0,0001 \cdot X)^{-1/2}$	$0,03 \cdot X \cdot (1 + 0,0003 \cdot X)^{-1}$
Ф	Устойчивое	$0,04 \cdot X \cdot (1 + 0,0001 \cdot X)^{-1/2}$	$0,016 \cdot X \cdot (1 + 0,0003 \cdot X)^{-1}$
Городская местность			

Продолжение таблицы 16

A-B	Неустойчивое	$0,32 \cdot X \cdot (1 + 0,0004 \cdot X)^{-1/2}$	$0,24 \cdot X \cdot (1 + 0,001 \cdot X)$
C	Слабо неустойчивое	$0,22 \cdot X \cdot (1 + 0,0004 \cdot X)^{-1/2}$	$0,2 \cdot X$
D	Равновесное	$0,16 \cdot X \cdot (1 + 0,0004 \cdot X)^{-1/2}$	$0,14 \cdot X \cdot (1 + 0,0003 \cdot X)^{-1/2}$
E-F	Устойчивое	$0,11 \cdot X \cdot (1 + 0,0004 \cdot X)^{-1/2}$	$0,08 \cdot X \cdot (1 + 0,0015 \cdot X)^{-1/2}$

После этого осуществляется расчёт концентрации по формуле 54.

$$C(x, y, z) = \frac{1000 \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot \bar{u}} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) \cdot \left(\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{\sigma_z^2}\right)\right) \quad (54)$$

где  $C(x, y, z)$  – концентрация загрязняющего вещества, мг/м<sup>3</sup>;

$Q$  – мощность выброса, г/с;

$\bar{u}$  – средняя скорость ветра, м/с;

$h$  – высота источника, м.

Расчёт будет осуществляться с помощью подпрограммы «Паскуилл – Гиффорд», приведённой на рисунке 16. Детально приведём расчёт для первого измерения по аммиаку, результаты расчёта для следующих измерений и промежуточные расчётные данные будут приведены для аммиака в таблице 17, для оксида азота в таблице 18, а также Приложении В.

$$\sigma_y = \frac{0,16 \cdot 3940}{\sqrt{1 + 0,0004 \cdot 3940}} = 392,774$$

$$\sigma_z = \frac{0,14 \cdot 3940}{\sqrt{1 + 0,0003 \cdot 3940}} = 373,419$$

$$C(x, y, z) = \frac{1000 \cdot 22,645}{2 \cdot \pi \cdot 392,774 \cdot 373,419 \cdot 6} \cdot \exp\left(-\frac{600^2}{392,774^2}\right) \cdot \left(\exp\left(-\frac{(0-10)^2}{373,419^2}\right) + \exp\left(-\frac{(0+10)^2}{373,419^2}\right)\right) = 0,000794$$

Таблица 17 – Результаты расчёта по аммиаку

Номер измерения	Класс устойчивости атмосферы	$\sigma_y$	$\sigma_z$	C, мг/м <sup>3</sup>
1	D	392,774	373,419	0,000794
2	D	378,765	359,440	0,000717
3	D	497,778	478,904	0,0000208
4	D	480,086	461,056	0,0000454
5	D	454,445	435,239	0,00169
6	D	471,656	452,562	0,000380
7	D	453,197	433,984	0,000232
8	D	518,383	499,721	0,00325
9	D	431,579	412,267	0,000962

Таблица 18 – Результаты расчёта по оксиду азота

Номер измерения	Класс устойчивости атмосферы	$\sigma_y$	$\sigma_z$	C, мг/м <sup>3</sup>
1	D	392,774	373,419	0,000220
2	D	378,765	359,440	0,000199
3	D	497,778	478,904	0,00000575
4	D	480,086	461,056	0,0000126
5	D	454,445	435,239	0,000466
6	D	471,656	452,562	0,000105
7	D	453,197	433,984	0,0000642
8	D	518,383	499,721	0,000900
9	D	431,579	412,267	0,000266

1	Коэффициенты диффузии				u, м/с	Инсоляция					
	Сильная	Небо ясное, солнце выше 60				Сильная	Средняя	Слабая			
Инсоляц	Сильная	Небо ясное, солнце выше 60			<2	A	A-B	B			
	Средняя	Небо ясное и солнце 15-60 или небо переменное и солнце выше 60			2 ≤ u < 3	A-B	B	C			
	Слабая	Остальное			3 ≤ u < 5	B	B-C	D			
					5 ≤ u < 6	C	C-D	D			
У					6	C	D	D			
600	Городская местность										
X		A-B	C	D	Класс	D					
3940	σ <sub>y</sub>	785,549	540,0649	392,7744916	σ <sub>y</sub>	392,7745	734,1546	533,9306	367,0773	200,224	σ <sub>y</sub>
	σ <sub>z</sub>	4671,264	788	373,4194065	σ <sub>z</sub>	373,4194	788	472,8	235,7233	80,01844	σ <sub>z</sub>
							A	B	C	D	
Q, г/с	u, м/с	h, м	z, м	C, г/м <sup>3</sup>	C, мг/м <sup>3</sup>	Открытая местность					
6,266	6	10	0	2,19691E-07	0,00022						

Рисунок 16 – Подпрограмма «Паскуилл – Гиффорд»

Оценка эффективности расчета по модели Паскуилла-Гиффрда в подразделе 3.5

### 3.5 Оценка эффективности расчёта по модели Паскуилла–Гиффорда

Составим сравнительные таблицы расчётных и экспериментальных данных, по аммиаку – таблица 19, по оксиду азота – таблица 20. Относительные погрешности расчётных данных относительно экспериментальных по аммиаку – в таблице 21, по оксиду азота – в таблице 22, а также Приложении Г.

Таблица 19 – Сравнительная таблица по аммиаку

Порядковый номер измерения	Месяц	Расчётная концентрация по Паскуиллу - Гиффорду, мг/м <sup>3</sup>	Концентрация по результатам измерений, мг/м <sup>3</sup>
1	Март	0,000794	0,0320
2	Апрель	0,000717	0,0260
3	Май	0,0000208	0,0090
4	Июнь	0,0000454	0,0090
5	Июль	0,00169	0,0240
6	Август	0,000380	0,0250
7	Сентябрь	0,000232	0,0360
8	Ноябрь	0,00325	0,0380
9	Декабрь	0,000962	0,0420

Таблица 20 – Сравнительная таблица по оксиду азота

Порядковый номер измерения	Месяц	Расчётная концентрация по Паскуиллу - Гиффорду, мг/м <sup>3</sup>	Концентрация по результатам измерений, мг/м <sup>3</sup>
1	Март	0,000220	0,0150
2	Апрель	0,000199	0,0210
3	Май	0,00000575	0,0140
4	Июнь	0,0000126	0,0050
5	Июль	0,000466	0,0350
6	Август	0,000105	0,0100
7	Сентябрь	0,0000642	0,0120
8	Ноябрь	0,000900	0,0150
9	Декабрь	0,000266	0,0210

Таблица 21 – Относительные погрешности по аммиаку

Порядковый номер измерения	Относительная погрешность для модели Паскуилла - Гиффорда, процент
1	-97,519
2	-97,242
3	-99,769
4	-99,496
5	-92,958
6	-98,480
7	-99,356
8	-91,447
9	-97,710

Таблица 22 – Относительные погрешности по оксиду азота

Порядковый номер измерения	Относительная погрешность для модели Паскуилла - Гиффорда, процент
1	-98,533
2	-99,052
3	-99,959
4	-99,748
5	-98,669
6	-98,950
7	-99,465
8	-94,000
9	-98,733

Приступим к расчёту для модели Паскуилла – Гиффорда по аммиаку. Предварительно определим размах и Q – критерий.

$$R = -91,447 - (-99,769) = 8,322$$

$$Q_1 = \frac{-99,496 - (-99,769)}{8,322} = 0,033$$

$$Q_8 = \frac{-91,447 - (-92,958)}{8,322} = 0,182$$

При доверительной вероятности 0,95 и числе измерений 9 табличный Q – критерий равен 0,46. Расчётные значения не превышают его, значит, грубых погрешностей нет. Промежуточные расчёты для расчета среднеквадратического отклонения приведем в таблице 23.

Таблица 23 – Промежуточные расчётные данные

n	$\Delta C_i$	$\Delta C_i - \Delta C_{cp}$	$(\Delta C_i - \Delta C_{cp})^2$
1	-99,769	-2,660	7,078
2	-99,496	-2,387	5,700
3	-99,356	-2,247	5,051
4	-98,480	-1,371	1,881
5	-97,710	-0,601	0,362
6	-97,519	-0,410	0,168
7	-97,242	-0,133	0,018

Продолжение таблицы 23

n	$\Delta C_i$	$\Delta C_i - \Delta C_{cp}$	$(\Delta C_i - \Delta C_{cp})^2$
8	-92,958	4,151	17,227
9	-91,447	5,662	32,053
$\Delta C_{cp}$	-97,109	$\Sigma$	69,538

Осуществим расчёт среднеквадратической погрешности, абсолютной погрешности и приведём доверительный интервал. Для доверительной вероятности 0,95 и числа степеней свободы критерий Стьюдента равен 2,31.

$$S = \sqrt{\frac{69,538}{9 \cdot (9 - 1)}} = 0,983$$

$$\Delta C_{абс} = 0,983 \cdot 2,31 = 2,270$$

$$\Delta C = (-97,109 \pm 2,270)$$

Приступим к расчёту для модели Паскуилла – Гиффорда по оксиду азота. Предварительно определим размах и Q – критерий.

$$R = -94,000 - (-99,959) = 5,959$$

$$Q_1 = \frac{-99,748 - (-99,959)}{5,959} = 0,035$$

$$Q_8 = \frac{-94,000 - (-98,533)}{5,959} = 0,761$$

При доверительной вероятности 0,95 и числе измерений 8 табличный Q – критерий равен 0,48. Измерение номер 8 превышает табличный критерий и должно быть исключено. Повторим расчёт.

$$R = -98,533 - (-99,959) = 1,426$$

$$Q_1 = \frac{-99,748 - (-99,959)}{1,426} = 0,148$$

$$Q_8 = \frac{-98,533 - (-98,669)}{1,426} = 0,095$$

Расчётные значения не превышают его, значит, грубых погрешностей нет. Промежуточные расчёты для расчета среднеквадратического отклонения приведем в таблице 24.

Таблица 24 – Промежуточные расчётные данные

n	$\Delta C_i$	$\Delta C_i - \Delta C_{cp}$	$(\Delta C_i - \Delta C_{cp})^2$
1	-99,959	-0,820	0,673
2	-99,748	-0,609	0,371
3	-99,465	-0,326	0,107
4	-99,052	0,087	0,008
5	-98,950	0,189	0,036
6	-98,733	0,406	0,165
7	-98,669	0,470	0,221
8	-98,533	0,606	0,367
$\Delta C_{cp}$	-99,139	$\Sigma$	1,946

Осуществим расчёт среднеквадратической погрешности, абсолютной погрешности и приведём доверительный интервал. Для доверительной вероятности 0,95 и числе степеней свободы критерий Стьюдента равен 2,31.

$$S = \sqrt{\frac{1,946}{8 \cdot (8 - 1)}} = 0,186$$

$$\Delta C_{abs} = 0,186 \cdot 2,37 = 0,442$$

$$\Delta C = (-99,139 \pm 0,442)$$

Сравнительный анализ будет осуществлен в подразделе 3.6.

### 3.6 Сравнительный анализ результатов расчёта

Доверительные интервалы сведём в таблицу 25. Графики сравнения экспериментальных и расчётных концентраций приведём на рисунках 17 – 20.

Таблица 25 – Доверительные интервалы относительных погрешностей.

Загрязняющее вещество	Методика расчёта	Доверительный интервал относительной погрешности
Аммиак	Берлянд	$(24,245 \pm 28,341)$
Аммиак	Паскуилл-Гиффорд	$(-97,109 \pm 2,270)$
Оксид азота	Берлянд	$(-40,269 \pm 22,493)$
Оксид азота	Паскуилл-Гиффорд	$(-99,139 \pm 0,442)$

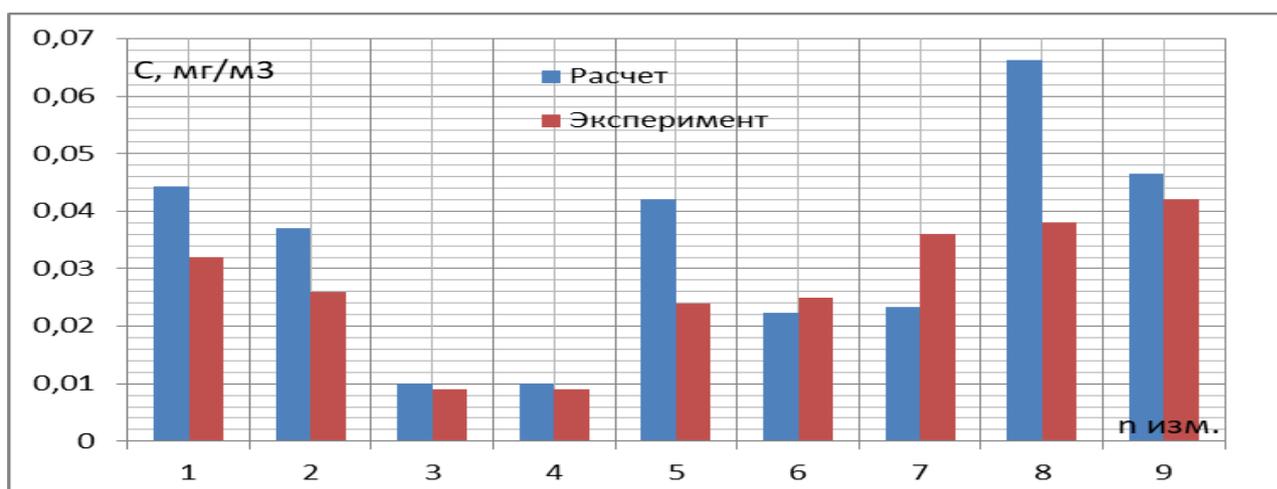


Рисунок 17 – Экспериментальная концентрация аммиака и расчётная концентрация аммиака по Берлянду

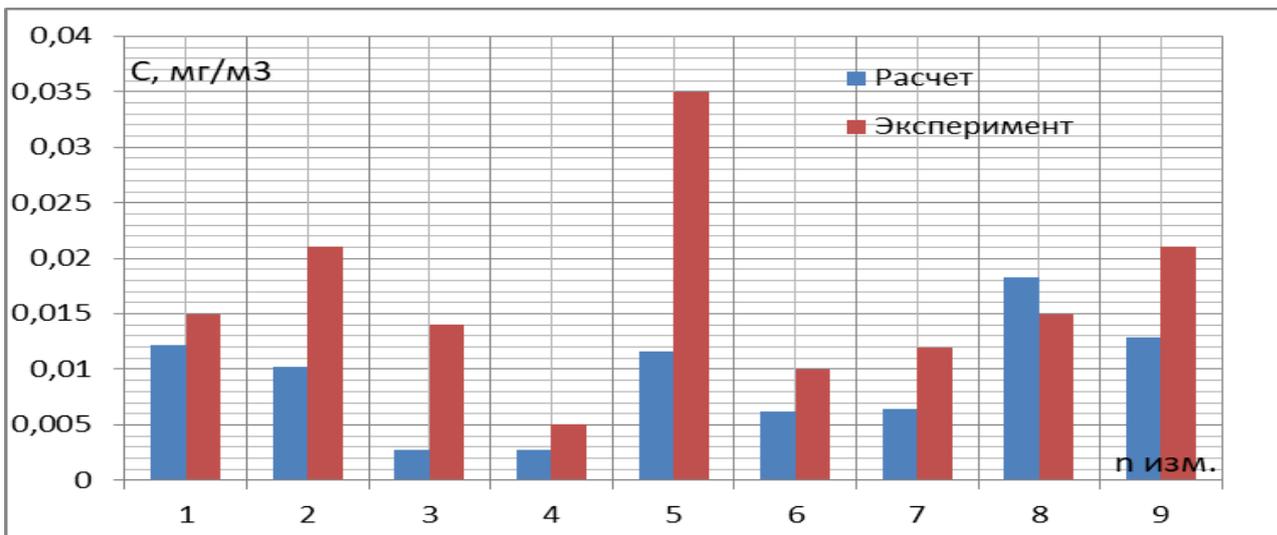


Рисунок 18 – Экспериментальная концентрация оксида азота и расчётная концентрация аммиака по Берлянду

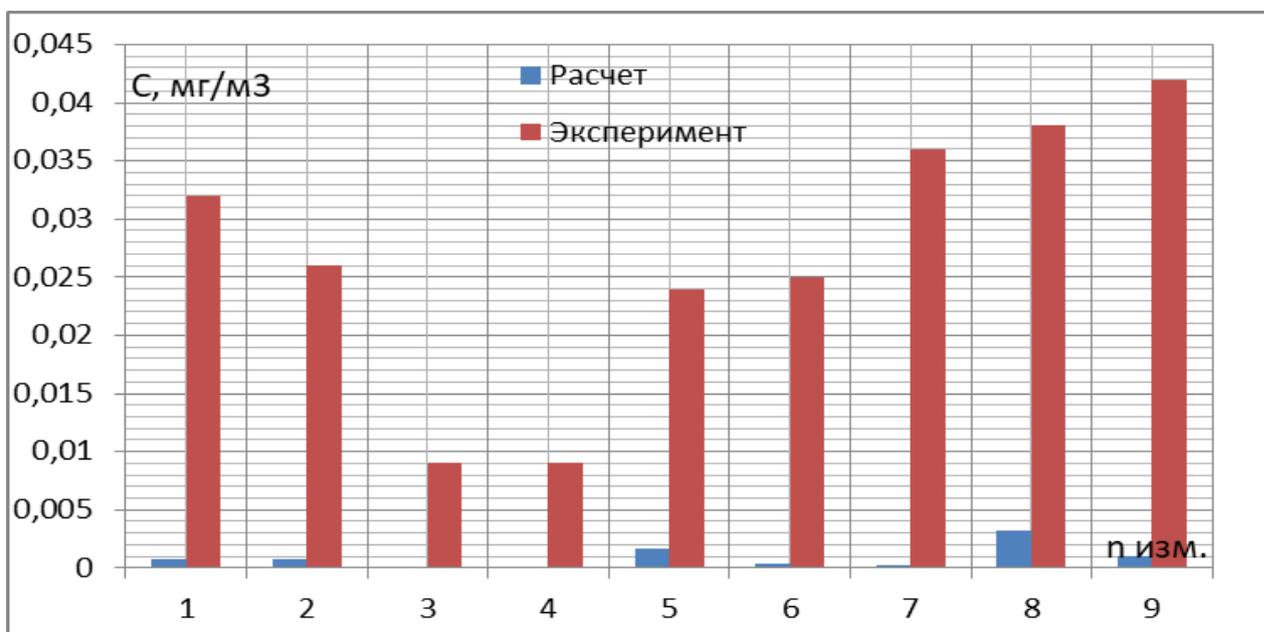


Рисунок 19 – Экспериментальная концентрация аммиака и расчётная концентрация аммиака по Паскуиллу – Гиффорду

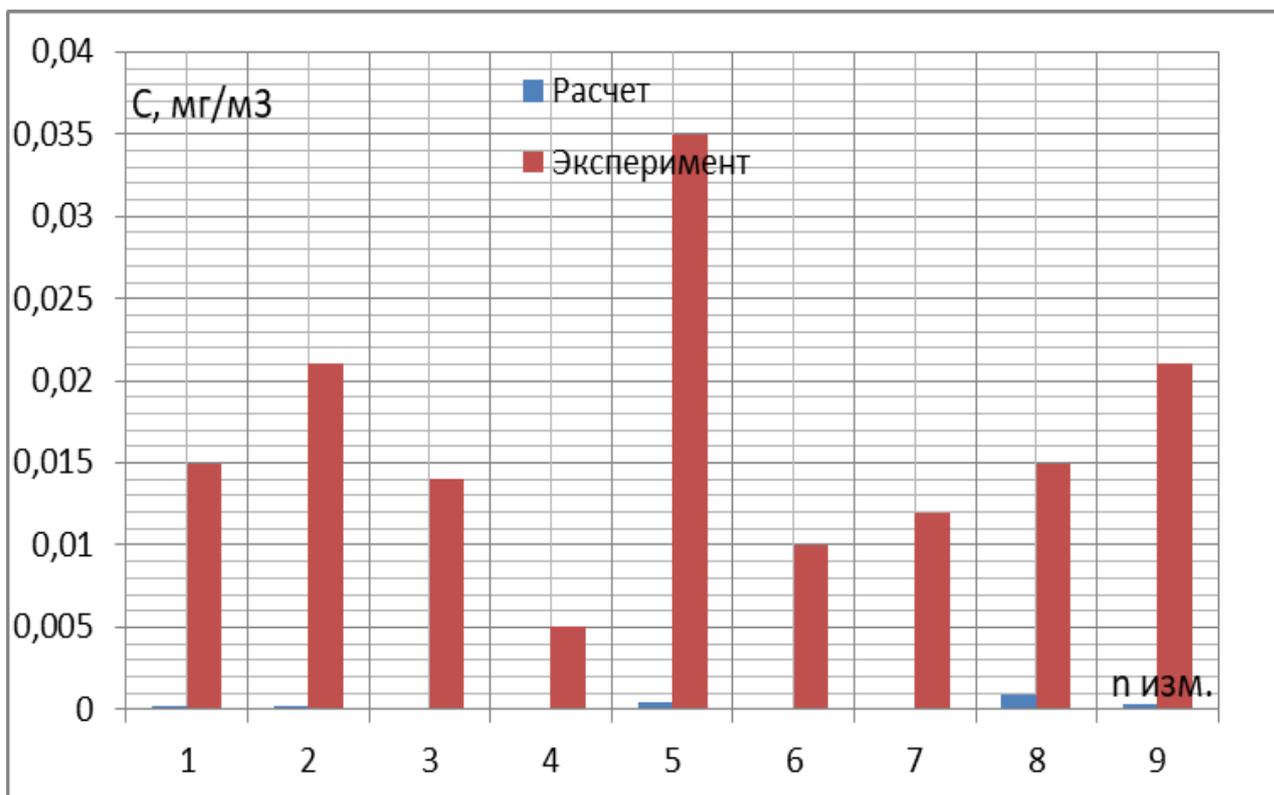


Рисунок 20 – Экспериментальная концентрация оксида азота и расчётная концентрация аммиака по Паскуиллу – Гифффорду

На основании анализа приведённых выше графиков и доверительных интервалов относительных погрешностей можем отметить:

- для аммиака модель Берлянда даёт завышенные значения, однако истинное значение попадает в доверительный интервал;
- для оксида азота модель Берлянда даёт заниженное значение, причём истинное значение не попадает в доверительный интервал;
- для аммиака и оксида азота модель Паскуилла – Гиффорда даёт заниженное значение, причём истинное значение не попадает в доверительный интервал, который демонстрирует относительно малое рассеяния величин.

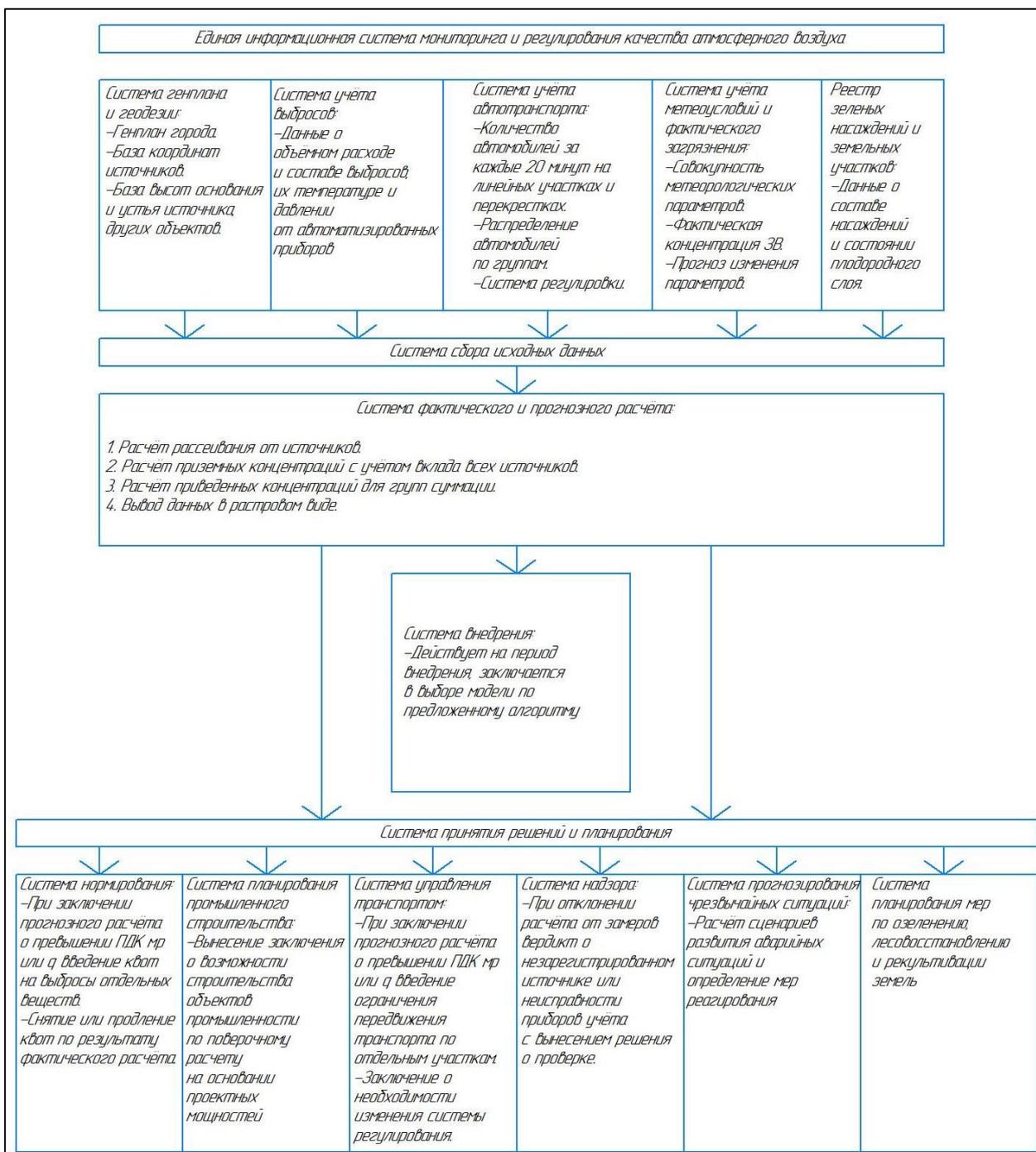
Высокие значения относительных погрешностей и рассеяние величин может быть объяснено использованием модельного источника и осреднением значений метеорологических параметров за значительные промежутки времени.

Исследование реального источника при серьёзном метеорологическом обеспечении расчёта способно обеспечить большую точность. Таким образом, приведенный выше расчет служит демонстрацией предлагаемого метода сравнительного анализа математических моделей.

Однако расчёт для модельного источника позволяет показать основные тенденции, заключающиеся в том, что модель Берлянда обеспечивает большую точность расчёта относительно модели Паскуилла – Гиффорда и принимается за расчётную модель при наших исходных данных.

#### **4 Концепция Единой информационной системы мониторинга и регулирования качества атмосферного воздуха**

Приведём структуру предлагаемой Единой информационной системы мониторинга и регулирования качества атмосферного воздуха на рисунке 21.



**Рисунок 21 – Структура Единой информационной системы**

Настоящая система разработана на основе анализа взаимодействия техносферы и атмосферы, в рамках существующего законодательства в сфере природоохраны. Единая информационная система мониторинга и регулирования качества атмосферного воздуха включает в себя несколько подсистем, и является динамичным цифровым двойником атмосферы.

Система сбора исходных данных предназначена для формирования баз данных, необходимых для процесса моделирования. Включает ряд относительно самостоятельных подсистем:

- систему генплана и геодезии, формирующую базу данных о расположении источников выделения загрязняющих веществ, а также их геометрических характеристиках;

- систему учёта выбросов, формирующую базу данных о количестве выбросов загрязняющих веществ, а также их характеристиках;

- систему учёта автотранспорта, формирующую базу данных по интенсивности движения для разных групп автотранспорта по автомобильным дорогам и формирует данные о выбросах загрязняющих веществ от транспорта по ГОСТ Р 56162 – 2019 [5];

- система учёта метеоусловий и фактического загрязнения, формирующую базу метеорологических данных и данных о фактическом уровне загрязнения, в то же время формирующая базу данных о прогнозе метеоусловий;

- реестр зеленых насаждений и земельных участков, формирующий базу данных о составе зелёных насаждений и состоянии земель в целях учёта поглощения парниковых газов [14].

Система фактического и прогнозного расчёта, выполняющая процесс моделирования на основании динамично обновляющихся исходных данных, а также прогноз состояния атмосферного воздуха по усредненным показателям выбросов и данным метеорологического прогноза, с учетом вклада множества источников и перечня групп суммации.

Система принятия решений и планирования, включающая несколько самостоятельных подсистем:

- система нормирования, позволяющая на основании фактического и прогнозного расчёта осуществить обоснование предельно – допустимого выброса загрязняющих веществ;

– система планирования промышленного строительства, позволяющая путём прогнозного расчёта обосновать допустимость строительства новых объектов в рамках процедуры оценки воздействия на окружающую среду и государственной экологической экспертизы;

– система управления автотранспортом, позволяющая выявлять загруженные участки автомобильных дорог, оказывающие наибольший вклад в общее загрязнение атмосферного воздуха, и принимать решения о изменении системы регулирования движения;

– система надзора, позволяющая выявлять факты нарушения природоохранного законодательства на основании отклонений фактического загрязнения от расчётного, как основание для надзорной деятельности;

– система прогнозирования чрезвычайных ситуаций, позволяющая прогнозировать развитие различных сценариев техногенных аварий на основании прогнозного расчёта, с последующей выработкой плана реагирования на ту или иную чрезвычайную ситуацию;

– система планирования мероприятий по озеленению, лесовосстановлению и рекультивации земель, позволяющая на основании расчётных данных выявлять участки, рекультивация которых может внести наиболее существенный вклад в процессе поглощения парниковых газов;

Таким образом, предложенный в предыдущих разделах алгоритм необходим на начальной стадии в период функционирования Системы внедрения для формирования программного обеспечения работы расчетного модуля Системы фактического и прогнозного расчёта.

## Заключение

Ниже приведём выводы и результаты, полученные в рамках выполнения настоящей работы.

Процесс рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосфере рассматривается как результат процесса переноса массы, энергии и импульса, приводятся основные закономерности, описывающие указанные процессы

Предложена классификация дисперсионных моделей по признаку основных закономерностей лежащих в основе модели. Выделены следующие типы моделей:

– аналитико – эмпирические, основывающиеся на полуэмпирическом решении уравнения турбулентной диффузии;

– статистические, основывающиеся на положении о распределении загрязняющих веществ по нормальному закону;

– численные, основывающиеся на совместном численном решении общего уравнения турбулентной диффузии и системы уравнений Навье – Стокса.

К аналитико – эмпирическим относят модель служб гражданской обороны и модель Берлянда.

К статистическим моделям относят модель Паскуилла – Гиффорда, мезомасштабную и региональную модели Института экспериментальной метеорологии.

К численным моделям относят модель Института вычислительной математики и математической геофизики.

Модель служб гражданской обороны является наиболее оперативной и требует минимального числа исходных данных, но даёт информации о распределении вещества. Этим обусловлено её применение для прогнозирования последствий техногенных аварий.

Модели Паскуилла – Гиффорда и Берлянда также позволяют провести оперативный расчёт и требуют минимальное число исходных данных и дают представление о распределении вещества, в то же время не учитывают динамичность состояния атмосферы. Эти модели являются наиболее применимыми в вопросе нормирования выбросов.

Мезомасштабная и региональная модели Института экспериментальной метеорологии, Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН учитывают динамичность состояния атмосферы, но требуют большого числа исходных данных. Это обуславливает исследовательскую направленность указанных моделей.

На основании проведённого обзора заключено, что каждая из описываемых моделей обладает своими недостатками и преимуществами, а также характерной областью применения. В то же время, автором отмечено, что нет алгоритма сравнительного анализа моделей и выбора оптимальной модели.

Предложен общий алгоритм выбора оптимальной математической модели, включающий несколько последовательных стадий. На начальной стадии некоторая выборка моделей анализируется на предмет соответствии цели исследования. На следующих этапах анализируется удовлетворение условий расчёта ограничивающим параметрам и обеспеченность расчёта входными параметрами. На заключительной стадии производится параллельный расчёт и сравнение расчётных и экспериментальных значений. Оптимальной признаётся модель, прошедшая все стадии отбора и обеспечивающая большую точность расчёта.

На основании детального анализа для выделенных моделей всех групп дисперсионных моделей составлены структурные схемы типа «чёрный ящик», отображающие входные, ограничивающие и выходные параметры данных моделей.

На основании общего алгоритма выбора оптимальной математической модели и структурных схем типа «чёрный ящик» разработан детальный алгоритм выбора оптимальной дисперсионной модели.

Таким образом, детальный алгоритм выбора оптимальной математической модели физико – химических процессов может быть получен путём детализации предложенного общего алгоритма с помощью разработки структурных схем, аналогичных предложенным.

Осуществлена апробация предложенного алгоритма на примере рассеивания выбросов загрязняющих веществ, поступающих от модельного источника в атмосферный воздух Центрального района города Тольятти. Начальные стадии отбора прошли модели Берлянда и Паскуилла – Гиффорда, для которых был осуществлен параллельный расчёт.

Для оценки точности расчётной методики предложена следующая методология. В качестве критерия точности принята относительная погрешность расчётных значений относительно экспериментальных. Для определенной выборки определены относительные погрешности и получены доверительные интервалы относительных погрешностей, по которым можно судить о точности применяемой модели. Стоит отметить, что ввиду использования данных прошлых лет и отсутствия единой базы метеорологических параметров приведённый расчёт обладает значительным рассеиванием значений и приведён для демонстрации предлагаемого алгоритма. В то же время расчёт позволяет оценить основные тенденции – модель Берлянда в условиях расчета показала большую точность расчёта, чем модель Паскуилла – Гиффорда.

Также предложена концепция Единой информационной системы мониторинга и регулирования качества атмосферного воздуха, и предложенный алгоритм выбора модели является необходимым инструментом на стадии функционирования подсистемы внедрения для формирования расчетного модуля системы.

## Список используемых источников

1. Аладинская А.Р. Мониторинг и оценка экологического риска от выбросов в атмосферу загрязняющих веществ при работе химических предприятий г.о. Тольятти /А.Р. Аладинская: дис. ... магистра. – Тольятти, 2015. – 86 с.
2. Алексеева М.Н., Яценко И.Г. Моделирование зон термического и химического воздействий при сжигании попутного нефтяного газа // Интерэкспо гео-Сибирь. 2019. Т. 4. № 1. С. 68-75.
3. Антонова А.М., Воробьев А.В., Воробьев В.А., Дутова Е.М., Покровский В.Д. Моделирование распространения в атмосфере загрязняющих веществ выбросов электростанций на базе программного комплекса «Skat» // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 6. С. 174–186.
4. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчет распространения примеси. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 279 с.
5. ГОСТ Р 56162 – 2019 Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу Метод расчета количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферу потоками автотранспортных средств на автомобильных дорогах разной категории [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200167788> (дата обращения 19.09.2022).
6. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии Часть 1 Теоретические основы процессов химической технологии Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. М.: Химия, 1995. 399 с.
7. Жижин Н.Н., Дьяков М.С., Ходяшев М.Б. Анализ средств управления качеством атмосферного воздуха в условиях крупного города // Анализ риска здоровью. 2019. № 4. С. 50-59.

8. Зарипов Ш.Х., Марданов Р.Ф., Гильфанов А.К., Шарафутдинов В.Ф., Никоненкова Т.В. Математические модели переноса загрязнений в окружающей среде / Ш.Х. Зарипов, Р.Ф. Марданов, А.К. Гильфанов, В.Ф. Шарафутдинов, Т.В. Никоненкова – Казань: Казан. ун-т, 2018. – 47с.

9. Иванова Ю.П., Надер Б.Ю., Мишаков В.А., Шаповалова Ю.А., Иванова О.О., Азаров В.Н. Влияние метеорологических условий на рассеивание вредных выбросов в городской среде // Инженерный вестник Дона. 2020. №1.

10. Клейн С.В., Зайцева Н.В., Май И.В., Балашов С.Ю., Загороднов С.Ю., Горяев Д.В., Тихонова И.В., Андришунас А.М. Формирование программ наблюдения за качеством атмосферного воздуха для задач социально-гигиенического мониторинга: практический опыт реализации мероприятий федерального проекта «Чистый воздух» // Гигиена и санитария. 2020. Т. 99. № 11. С. 1196-1202.

11. Куракина Н.И., Мышко Р.А. Моделирование загрязнения атмосферного воздуха промышленными объектами в технологии геоинформационных систем // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. № 5. С.21-27.

12. Ложкин В.Н., Буланцев Д.С. Модель диффузии угарного газа в условиях возникновения чрезвычайной ситуации на автомагистрали вблизи горящего торфяника // Научно – аналитический журнал «Вестник Санкт – Петербургского Университета Государственной Противопожарной Службы МЧС России». 2020. №1. С.10-15.

13. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200007358> (дата обращения 19.09.2022).

14. Методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456079177> (дата обращения 19.09.2022).

15. Министерство здравоохранения Российской Федерации «Общая фармакопейная статья ОФС.1.1.0013.15 Статистическая обработка результатов химического эксперимента» [Электронный ресурс]. URL: <https://nevacert.ru/reestry/pharmacopoeia/ofs.1.1.0013.15> (дата обращения 19.09.2022).

16. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации Приказ от 6 июня 2017 года №273 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных веществ в атмосферном воздухе» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456074826> (дата обращения 19.09.2022).

17. Польшиков М.С. Математическая модель распространения загрязняющих веществ на основе метода модификации цифровой волны / М.С. Польшиков: дис. ... магистра. – Белгород, 2017. – 72 с.

18. Пьянова Э.А., Пененко В.В., Фалейчик Л.М. Летний сценарий моделирования рассеивания примесей от источников выбросов в центральной экологической зоне байкальской природной территории // Интерэкспо гео-Сибирь. 2019. Т.4. №1. С.126-133.

19. Руководство по организации контроля состояния природной среды в районе расположения АЭС. Под ред. К.П. Махонько. Л.: Гидрометео-издат, 1990. 264 с.

20. Самхарадзе К.К., Ерошенко Я.Б. Применение OPENGL в построении сетки рассеивания выбросов в атмосферу дорожно – строительной техникой // Научный результат. Информационные технологии. 2018. Т.3. №2. С. 3-11.

21. Стоянов В.У., Фридман А.В. Анализ математических моделей для оценки и прогнозирования обстановки в результате чрезвычайных ситуаций на экологически опасных объектах // Строительство и техногенная безопасность. 2011. №40. С.74-84.

22. Чернышев Л.О., Матвеев Ю.Н. Автоматизированная система поддержки принятия решений для прогнозирования процессов рассеивания химически опасных веществ // Программные продукты и системы. 2021. Т. 34. № 2. С. 307–315.

23. Шагидуллин А.Р. Применение сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха для решения задач по управлению качеством окружающей среды // Российский журнал прикладной экологии. 2022. №1. С. 60-67.

24. Brickman D., Smith P.C. Lagrangian Stochastic Modelling in Coastal Oceanography // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2002. V.19. № 1. PP. 83-99.

25. Balczó M., Di Sabatino S., Franke J., Grebec M., Karpinnen A., Meijer E., Moussafir J., Reif B.P., Tinarelli G., Trijssenaar-Buhre I. Evaluation, improvement and guidance for the use of local-scale emergency prediction and response tools for airborne hazards in built environments. COST Action ES1006. Brussels, 2012.

26. Butt E.W., Turnock S.T., Rigby R., Reddington C.L., Yoshioka M., Johnson J.S., Regayre L.A., Pringle K.J., Mann G.W., Spracklen D.V. Global and regional trends in particulate air pollution and attributable health burden over the past 50 years // Environmental Research Letters. 2017. № 12.

27. Goulart A.G.O., Lazo M.J., Suarez J.M.S., Moreira D.M. Fractional derivative models for atmospheric dispersion of pollutants // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2017. V. 477. PP. 9–19.

28. Jiang W.-Mei, Liu H., Liu H.-Nian. The Numerical Simulation on Atmospheric Transport and Dispersion of the Spray Atomized from Flood Discharging by Hydropower Station over Complex Terrain // Meteorol. Atmos. Phys. 1999. V.70. PP.215–226.

29. Nguyen N.P., Marshall J.D. Impact, efficiency, inequality, and injustice of urban air pollution: variability by emission location // Environmental Research Letters. 2018. № 13.

30. Park S.K., Xu L. Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications. Springer. 2013. PP. 730.

31. Sówka I., Kobus D. Chlebowska - Styś A., Zathay M. Characteristics of selected elements of the air quality management system in urban areas in Poland // International Conference on Advances in Energy Systems and Environmental Engineering (ASEE17). 2017. № 22.

## Приложение А

### Расчёт по методу Берлянда

		Исходные данные				Вариант $fe > f, f < 100, dT = > 0,5$				
		Результат расчёта								
		Выбрать из вариантов								
1	Расчёт расхода смеси	$\rho_i$	$w, \text{ м/с}$	$D, \text{ м}$	$V, \text{ м}^3/\text{с}$					
		3,14	5	1	3,925					
2	Коэффициенты источника	$T_b, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{oc}, \text{ }^\circ\text{C}$	$H, \text{ м}$	$vm$	$vm'$	$f$	$fe$		
		20	2	10	1,247242	0,65	13,88889	219,7		
3	Коэффициенты $m$ и $n$	$m(f < 100)$		$n, vm < 0,5$	$n [0,5; 2)$	$n \Rightarrow 2$	$n$			
		0,537648		5,487865	1,30096	1	1,30096			
4	Концентрация приземная	$A$	$M, \text{ г/с}$	$F$	$C_m, \text{ мг/м}^3$					
		200	22,645	1	7,662911					
5	Дальность при $C_m$	$d, vm < 0,5$	$d [0,5; 2)$	$d \Rightarrow 2$	$d$	$X_{m,m}$	$X, \text{ м}$	$X/X_m$		
		6,670055	16,6048	21,02573	16,6048	166,048	3940	23,72808		
6	Концентрация на $X$	$s1, x/x_{m \leq 1}$	$s1 [1; 8]$	$s1 [8; 100]$	$s1 \geq 100$	$s1$	$C, \text{ мг/м}^3$	$Y, \text{ м}$	$u, \text{ м/с}$	
		847482,8	0,015231	0,018439	0,089191	0,018439	0,141293	600	6	
7	Концентрация по нормали	$ty, u < 5$	$ty, u \geq 5$	$ty$	$s2$	$Cy$				
		0,139143	0,115952	0,115952	0,31332	0,04427				

Рисунок А.1 – Расчёт по аммиаку, измерение первое

		Исходные данные				Вариант $fe > f, f < 100, dT = > 0,5$				
		Результат расчёта								
		Выбрать из вариантов								
1	Расчёт расхода смеси	$\rho_i$	$w, \text{ м/с}$	$D, \text{ м}$	$V, \text{ м}^3/\text{с}$					
		3,14	5	1	3,925					
2	Коэффициенты источника	$T_b, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{oc}, \text{ }^\circ\text{C}$	$H, \text{ м}$	$vm$	$vm'$	$f$	$fe$		
		20	12	10	0,951824	0,65	31,25	219,7		
3	Коэффициенты $m$ и $n$	$m(f < 100)$		$n, vm < 0,5$	$n [0,5; 2)$	$n \Rightarrow 2$	$n$			
		0,434792		4,188025	1,584591	1	1,584591			
4	Концентрация приземная	$A$	$M, \text{ г/с}$	$F$	$C_m, \text{ мг/м}^3$					
		200	22,645	1	9,890641					
5	Дальность при $C_m$	$d, vm < 0,5$	$d [0,5; 2)$	$d \Rightarrow 2$	$d$	$X_{m,m}$	$X, \text{ м}$	$X/X_m$		
		6,670055	12,67184	18,36767	12,67184	126,7184	3740	29,51427		
6	Концентрация на $X$	$s1, x/x_{m \leq 1}$	$s1 [1; 8]$	$s1 [8; 100]$	$s1 \geq 100$	$s1$	$C, \text{ мг/м}^3$	$Y, \text{ м}$	$u, \text{ м/с}$	
		2075955	0,009891	0,013547	0,053603	0,013547	0,133986	600	6	
7	Концентрация по нормали	$ty, u < 5$	$ty, u \geq 5$	$ty$	$s2$	$Cy$				
		0,154422	0,128685	0,128685	0,275849	0,03696				

Рисунок А.2 – Расчёт по аммиаку, измерение второе

Продолжение приложения А

		Исходные данные				Вариант fe>f, f<100, dT=>0,5			
		Результат расчёта							
		Выбрать из вариантов							
1	Расчёт расхода смеси	pi	w, м/с	D, м	V, м3/с				
		3,14	5	1	3,925				
2	Коэффициенты источника	Tв, 0C	Tос, 0C	H, м	vm	vm'	f	fe	
		20	9	10	1,058419	0,65	22,72727	219,7	
3	Коэффициенты m и n	m(f<100)	n vm<0,5		n [0,5;2)	n =>2	n		
		0,473977	4,657042		1,471541	1	1,471541		
4	Концентрация приземная	A	M, г/с	F	См, мг/м3				
		200	22,645	1	9,004388				
5	Дальность при См	d vm<0,5	d [0,5;2)	d =>2	d	Xм,м	X,м	X/Xм	
		6,670055	14,09095	19,36888	14,09095	140,9095	5600	39,74181	
6	Концентрация на X	s1 x/xмс1	s1 (1;8)	s1 (8;100)	s1 ≥100	s1	С мг/м3	Y,м	u, м/с
		6990947	0,005477	0,009162	0,026772	0,009162	0,082502	1150	7
7	Концентрация по нормали	ty u<5	ty u≥5	ty	s2	Cy			
		0,295201	0,210858	0,210858	0,121243	0,010003			

Рисунок А.3 – Расчёт по аммиаку, измерение третье

		Исходные данные				Вариант fe>f, f<100, dT=>0,5			
		Результат расчёта							
		Выбрать из вариантов							
1	Расчёт расхода смеси	pi	w, м/с	D, м	V, м3/с				
		3,14	5	1	3,925				
2	Коэффициенты источника	Tв, 0C	Tос, 0C	H, м	vm	vm'	f	fe	
		20	17	10	0,686384	0,65	83,33333	219,7	
3	Коэффициенты m и n	m(f<100)	n vm<0,5		n [0,5;2)	n =>2	n		
		0,32595	3,020089		1,91864	1	1,91864		
4	Концентрация приземная	A	M, г/с	F	См, мг/м3				
		200	22,645	1	12,44972				
5	Дальность при См	d vm<0,5	d [0,5;2)	d =>2	d	Xм,м	X,м	X/Xм	
		6,670055	9,137974	15,59765	9,137974	91,37974	5300	57,99973	
6	Концентрация на X	s1 x/xмс1	s1 (1;8)	s1 (8;100)	s1 ≥100	s1	С мг/м3	Y,м	u, м/с
		32408155	0,002578	0,005776	0,011082	0,005776	0,071915	1050	6
7	Концентрация по нормали	ty u<5	ty u≥5	ty	s2	Cy			
		0,235493	0,196244	0,196244	0,140322	0,010091			

Рисунок А.4 – Расчёт по аммиаку, измерение четвертое

Продолжение приложения А

		Исходные данные				Вариант fe>f, f<100, dT=>0,5			
		Результат расчёта							
		Выбрать из вариантов							
1	Расчёт расхода смеси	pi	w, м/с	D, м	V, м3/с				
		3,14	5	1	3,925				
2	Коэффициенты источника	Tв, 0С	Tос, 0С	H, м	vm	vm'	f	fe	
		20	17	10	0,686384	0,65	83,33333	219,7	
3	Коэффициенты m и n	m(f<100)		n vm<0,5	n (0,5;2)	n =>2	n		
		0,32595		3,020089	1,91864	1	1,91864		
4	Концентрация приземная	A	M, г/с	F	Cm, мг/м3				
		200	22,645	1	12,44972				
5	Дальность при Cm	d vm<0,5	d (0,5;2)	d =>2	d	Xm,м	X,м	X/Xm	
		6,670055	9,137974	15,59765	9,137974	91,37974	4880	53,40352	
6	Концентрация на X	s1 x/xms<1	s1 (1;8)	s1 (8;100)	s1 ≥100	s1	C мг/м3	Y,м	u, м/с
		23199301	0,00304	0,006371	0,013436	0,006371	0,079323	550	5
7	Концентрация по нормали	ty u<5	ty u≥5	ty	s2	Cy			
		0,063512	0,063512	0,063512	0,529479	0,042			

Рисунок А.5 – Расчёт по аммиаку, измерение пятое

		Исходные данные				Вариант fe>f, f<100, dT=>0,5			
		Результат расчёта							
		Выбрать из вариантов							
1	Расчёт расхода смеси	pi	w, м/с	D, м	V, м3/с				
		3,14	5	1	3,925				
2	Коэффициенты источника	Tв, 0С	Tос, 0С	H, м	vm	vm'	f	fe	
		20	17	10	0,686384	0,65	83,33333	219,7	
3	Коэффициенты m и n	m(f<100)		n vm<0,5	n (0,5;2)	n =>2	n		
		0,32595		3,020089	1,91864	1	1,91864		
4	Концентрация приземная	A	M, г/с	F	Cm, мг/м3				
		200	22,645	1	12,44972				
5	Дальность при Cm	d vm<0,5	d (0,5;2)	d =>2	d	Xm,м	X,м	X/Xm	
		6,670055	9,137974	15,59765	9,137974	91,37974	5160	56,46766	
6	Концентрация на X	s1 x/xms<1	s1 (1;8)	s1 (8;100)	s1 ≥100	s1	C мг/м3	Y,м	u, м/с
		29080150	0,00272	0,005962	0,011796	0,005962	0,074227	800	5
7	Концентрация по нормали	ty u<5	ty u≥5	ty	s2	Cy			
		0,120185	0,120185	0,120185	0,300331	0,022293			

Рисунок А.6 – Расчёт по аммиаку, измерение шестое

Продолжение приложения А

		Исходные данные				Вариант $f_e > f, f < 100, dT > 0,5$			
		Результат расчёта							
		Выбрать из вариантов							
1	Расчёт расхода смеси	$\rho_i$	$w, \text{ м/с}$	$D, \text{ м}$	$V, \text{ м}^3/\text{с}$				
		3,14	5	1	3,925				
2	Коэффициенты источника	$T_b, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{oc}, \text{ }^\circ\text{C}$	$H, \text{ м}$	$v_m$	$v_m'$	$f$	$f_e$	
		20	14	10	0,864789	0,65	41,66667	219,7	
3	Коэффициенты $m$ и $n$	$m(f < 100)$		$n, v_m < 0,5$	$n [0,5; 2]$	$n \Rightarrow 2$	$n$		
		0,400928		3,805073	1,685861	1	1,685861		
4	Концентрация приземная	$A$	$M, \text{ г/с}$	$F$	$C_m, \text{ мг/м}^3$				
		200	22,645	1	10,67973				
5	Дальность при $C_m$	$d, v_m < 0,5$	$d [0,5; 2]$	$d \Rightarrow 2$	$d$	$X_m, \text{ м}$	$X, \text{ м}$	$X/X_m$	
		6,670055	11,51313	17,50777	11,51313	115,1313	4860	42,21269	
6	Концентрация на $X$	$s_1, x/x_m \leq 1$	$s_1 [1; 8]$	$s_1 [8; 100]$	$s_1 \geq 100$	$s_1$	$C, \text{ мг/м}^3$	$Y, \text{ м}$	$u, \text{ м/с}$
		8934558	0,004857	0,008492	0,023258	0,008492	0,090698	800	7
7	Концентрация по нормали	$t_y, u < 5$	$t_y, u \geq 5$	$t_y$	$s_2$	$C_y$			
		0,189673	0,135481	0,135481	0,25772	0,023375			

Рисунок А.7 – Расчёт по аммиаку, измерение седьмое

1	Расчёт расхода смеси	$\rho_i$	$w, \text{ м/с}$	$D, \text{ м}$	$V, \text{ м}^3/\text{с}$				
		3,14	5	1	3,925				
2	Коэффициенты источника	$T_b, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{oc}, \text{ }^\circ\text{C}$	$H, \text{ м}$	$v_m$	$v_m'$	$f$	$f_e$	
		20	-1	10	1,313005	0,65	11,90476	219,7	
3	Коэффициенты $m$ и $n$	$m(f < 100)$		$n, v_m < 0,5$	$n [0,5; 2]$	$n \Rightarrow 2$	$n$		
		0,558231		5,777221	1,250458	1	1,250458		
4	Концентрация приземная	$A$	$M, \text{ г/с}$	$F$	$C_m, \text{ мг/м}^3$				
		200	22,645	1	7,264386				
5	Дальность при $C_m$	$d, v_m < 0,5$	$d [0,5; 2]$	$d \Rightarrow 2$	$d$	$X_m, \text{ м}$	$X, \text{ м}$	$X/X_m$	
		6,670055	17,48032	21,57292	17,48032	174,8032	5960	34,09549	
6	Концентрация на $X$	$s_1, x/x_m \leq 1$	$s_1 [1; 8]$	$s_1 [8; 100]$	$s_1 \geq 100$	$s_1$	$C, \text{ мг/м}^3$	$Y, \text{ м}$	$u, \text{ м/с}$
		3744124	0,007428	0,011165	0,03828	0,011165	0,081109	380	5
7	Концентрация по нормали	$t_y, u < 5$	$t_y, u \geq 5$	$t_y$	$s_2$	$C_y$			
		0,020326	0,020326	0,020326	0,815929	0,066179			

Рисунок А.8 – Расчёт по аммиаку, измерение восьмое

Продолжение приложения А

1	Расчёт расхода смеси	$\rho_i$	$w, \text{ м/с}$	$D, \text{ м}$	$V, \text{ м}^3/\text{с}$				
		3,14	5	1	3,925				
2	Коэффициенты источника	$T_b, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{oc}, \text{ }^\circ\text{C}$	$H, \text{ м}$	$vm$	$vm'$	$f$	$fe$	
		20	-8	10	1,445149	0,65	8,928571	219,7	
3	Коэффициенты $m$ и $n$	$m(f<100)$		$n, vm<0,5$	$n [0,5;2]$	$n \Rightarrow 2$	$n$		
		0,597315		6,358655	1,162891	1	1,162891		
4	Концентрация приземная	$A$	$M, \text{ г/с}$	$F$	$C_m, \text{ мг/м}^3$				
		200	22,645	1	6,567679				
5	Дальность при $C_m$	$d, vm<0,5$	$d [0,5;2]$	$d \Rightarrow 2$	$d$	$X_m, \text{ м}$	$X, \text{ м}$	$X/X_m$	
		6,670055	19,23958	22,63248	19,23958	192,3958	4520	23,49324	
6	Концентрация на $X$	$s1, \text{ х/хм} \leq 1$	$s1 [1;8]$	$s1 [8;100]$	$s1 \geq 100$	$s1$	$C, \text{ мг/м}^3$	$Y, \text{ м}$	$u, \text{ м/с}$
		813466	0,015532	0,018709	0,091285	0,018709	0,122876	630	5
7	Концентрация по нормали	$ty, u<5$	$ty, u \geq 5$	$ty$	$s2$	$Cy$			
		0,097135	0,097135	0,097135	0,378215	0,046473			

Рисунок А.9 – Расчёт по аммиаку, измерение девятое

1	Расчёт расхода смеси	$\rho_i$	$w, \text{ м/с}$	$D, \text{ м}$	$V, \text{ м}^3/\text{с}$				
		3,14	5	1	3,925				
2	Коэффициенты источника	$T_b, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{oc}, \text{ }^\circ\text{C}$	$H, \text{ м}$	$vm$	$vm'$	$f$	$fe$	
		20	2	10	1,247242	0,65	13,88889	219,7	
3	Коэффициенты $m$ и $n$	$m(f<100)$		$n, vm<0,5$	$n [0,5;2]$	$n \Rightarrow 2$	$n$		
		0,537648		5,487865	1,30096	1	1,30096		
4	Концентрация приземная	$A$	$M, \text{ г/с}$	$F$	$C_m, \text{ мг/м}^3$				
		200	6,266	1	2,120371				
5	Дальность при $C_m$	$d, vm<0,5$	$d [0,5;2]$	$d \Rightarrow 2$	$d$	$X_m, \text{ м}$	$X, \text{ м}$	$X/X_m$	
		6,670055	16,6048	21,02573	16,6048	166,048	3940	23,72808	
6	Концентрация на $X$	$s1, \text{ х/хм} \leq 1$	$s1 [1;8]$	$s1 [8;100]$	$s1 \geq 100$	$s1$	$C, \text{ мг/м}^3$	$Y, \text{ м}$	$u, \text{ м/с}$
		847482,8	0,015231	0,018439	0,089191	0,018439	0,039096	600	6
7	Концентрация по нормали	$ty, u<5$	$ty, u \geq 5$	$ty$	$s2$	$Cy$			
		0,139143	0,115952	0,115952	0,31332	0,01225			

Рисунок А.10 – Расчёт по оксиду азота, измерение первое

Продолжение приложения А

1	Расчёт расхода смеси	$\rho_i$	w, м/с	D, м	V, м <sup>3</sup> /с				
		3,14	5	1	3,925				
2	Коэффициенты источника	Tв, 0С	Tос, 0С	H, м	vm	vm'	f	fe	
		20	12	10	0,951824	0,65	31,25	219,7	
3	Коэффициенты m и n	m(f<100)		n vm<0,5	n [0,5:2)	n =>2	n		
		0,434792		4,188025	1,584591	1	1,584591		
4	Концентрация приземная	A	M, г/с	F	Cм, мг/м <sup>3</sup>				
		200	6,266	1	2,736797				
5	Дальность при Cм	d vm<0,5	d [0,5:2)	d =>2	d	Xм,м	X,м	X/Xм	
		6,670055	12,67184	18,36767	12,67184	126,7184	3740	29,51427	
6	Концентрация на X	s1 x/xms1	s1 [1:8]	s1 [8:100]	s1 ≥100	s1	C мг/м <sup>3</sup>	Y,м	u, м/с
		2075955	0,009891	0,013547	0,053603	0,013547	0,037075	600	6
7	Концентрация по нормали	ty u<5	ty u≥5	ty	s2	Cy			
		0,154422	0,128685	0,128685	0,275849	0,010227			

Рисунок А.11 – Расчёт по оксиду азота, измерение второе

1	Расчёт расхода смеси	$\rho_i$	w, м/с	D, м	V, м <sup>3</sup> /с				
		3,14	5	1	3,925				
2	Коэффициенты источника	Tв, 0С	Tос, 0С	H, м	vm	vm'	f	fe	
		20	9	10	1,058419	0,65	22,72727	219,7	
3	Коэффициенты m и n	m(f<100)		n vm<0,5	n [0,5:2)	n =>2	n		
		0,473977		4,657042	1,471541	1	1,471541		
4	Концентрация приземная	A	M, г/с	F	Cм, мг/м <sup>3</sup>				
		200	6,266	1	2,491565				
5	Дальность при Cм	d vm<0,5	d [0,5:2)	d =>2	d	Xм,м	X,м	X/Xм	
		6,670055	14,09095	19,36888	14,09095	140,9095	5600	39,74181	
6	Концентрация на X	s1 x/xms1	s1 [1:8]	s1 [8:100]	s1 ≥100	s1	C мг/м <sup>3</sup>	Y,м	u, м/с
		6990947	0,005477	0,009162	0,026772	0,009162	0,022829	1150	7
7	Концентрация по нормали	ty u<5	ty u≥5	ty	s2	Cy			
		0,295201	0,210858	0,210858	0,121243	0,002768			

Рисунок А.12 – Расчёт по оксиду азота, измерение третье

Продолжение приложения А

1	Расчёт расхода смеси	$\rho_i$	w, м/с	D, м	V, м <sup>3</sup> /с				
		3,14	5	1	3,925				
2	Коэффициенты источника	Tв, 0С	Tос, 0С	H, м	vm	vm'	f	fe	
		20	17	10	0,686384	0,65	83,33333	219,7	
3	Коэффициенты m и n	m(f<100)		n vm<0,5	n [0,5;2)	n =>2	n		
		0,32595		3,020089	1,91864	1	1,91864		
4	Концентрация приземная	A	M, г/с	F	См, мг/м <sup>3</sup>				
		200	6,266	1	3,444907				
5	Дальность при См	d vm<0,5	d [0,5;2)	d =>2	d	Xм,м	X,м	X/Xм	
		6,670055	9,137974	15,59765	9,137974	91,37974	5300	57,99973	
6	Концентрация на X	s1 x/xмс1	s1 (1;8)	s1 (8;100)	s1 ≥100	s1	C мг/м <sup>3</sup>	Y,м	u, м/с
		32408155	0,002578	0,005776	0,011082	0,005776	0,019899	1050	6
7	Концентрация по нормали	ty u<5	ty u≥5	ty	s2	Cy			
		0,235493	0,196244	0,196244	0,140322	0,002792			

Рисунок А.13 – Расчёт по оксиду азота, измерение четвертое

1	Расчёт расхода смеси	$\rho_i$	w, м/с	D, м	V, м <sup>3</sup> /с				
		3,14	5	1	3,925				
2	Коэффициенты источника	Tв, 0С	Tос, 0С	H, м	vm	vm'	f	fe	
		20	17	10	0,686384	0,65	83,33333	219,7	
3	Коэффициенты m и n	m(f<100)		n vm<0,5	n [0,5;2)	n =>2	n		
		0,32595		3,020089	1,91864	1	1,91864		
4	Концентрация приземная	A	M, г/с	F	См, мг/м <sup>3</sup>				
		200	6,266	1	3,444907				
5	Дальность при См	d vm<0,5	d [0,5;2)	d =>2	d	Xм,м	X,м	X/Xм	
		6,670055	9,137974	15,59765	9,137974	91,37974	4880	53,40352	
6	Концентрация на X	s1 x/xмс1	s1 (1;8)	s1 (8;100)	s1 ≥100	s1	C мг/м <sup>3</sup>	Y,м	u, м/с
		23199301	0,00304	0,006371	0,013436	0,006371	0,021949	550	5
7	Концентрация по нормали	ty u<5	ty u≥5	ty	s2	Cy			
		0,063512	0,063512	0,063512	0,529479	0,011622			

Рисунок А.14 – Расчёт по оксиду азота, измерение пятое

Продолжение приложения А

1	Расчёт расхода смеси	$\rho_i$	w, м/с	D, м	V, м <sup>3</sup> /с				
		3,14	5	1	3,925				
2	Коэффициенты источника	Tв, 0С	Tос, 0С	H, м	vm	vm'	f	fe	
		20	17	10	0,686384	0,65	83,333333	219,7	
3	Коэффициенты m и n	m(f<100)		n vm<0,5	n [0,5;2)	n =>2	n		
		0,32595		3,020089	1,91864	1	1,91864		
4	Концентрация приземная	A	M, г/с	F	См, мг/м <sup>3</sup>				
		200	6,266	1	3,444907				
5	Дальность при См	d vm<0,5	d [0,5;2)	d =>2	d	Xм,м	X,м	X/Xм	
		6,670055	9,137974	15,59765	9,137974	91,37974	5160	56,46766	
6	Концентрация на X	s1 x/xм<1	s1 [1;8]	s1 (8;100)	s1 ≥100	s1	С мг/м <sup>3</sup>	Y,м	u, м/с
		29080150	0,00272	0,005962	0,011796	0,005962	0,020539	800	5
7	Концентрация по нормали	ty u<5	ty u≥5	ty	s2	Cy			
		0,120185	0,120185	0,120185	0,300331	0,006169			

Рисунок А.15 – Расчёт по оксиду азота, измерение шестое

1	Расчёт расхода смеси	$\rho_i$	w, м/с	D, м	V, м <sup>3</sup> /с				
		3,14	5	1	3,925				
2	Коэффициенты источника	Tв, 0С	Tос, 0С	H, м	vm	vm'	f	fe	
		20	14	10	0,864789	0,65	41,66667	219,7	
3	Коэффициенты m и n	m(f<100)		n vm<0,5	n [0,5;2)	n =>2	n		
		0,400928		3,805073	1,685861	1	1,685861		
4	Концентрация приземная	A	M, г/с	F	См, мг/м <sup>3</sup>				
		200	6,266	1	2,955143				
5	Дальность при См	d vm<0,5	d [0,5;2)	d =>2	d	Xм,м	X,м	X/Xм	
		6,670055	11,51313	17,50777	11,51313	115,1313	4860	42,21269	
6	Концентрация на X	s1 x/xм<1	s1 [1;8]	s1 (8;100)	s1 ≥100	s1	С мг/м <sup>3</sup>	Y,м	u, м/с
		8934558	0,004857	0,008492	0,023258	0,008492	0,025097	800	7
7	Концентрация по нормали	ty u<5	ty u≥5	ty	s2	Cy			
		0,189673	0,135481	0,135481	0,25772	0,006468			

Рисунок А.16 – Расчёт по оксиду азота, измерение седьмое

Продолжение приложения А

1	Расчёт расхода смеси	$\rho_i$	w, м/с	D, м	V, м <sup>3</sup> /с				
		3,14	5	1	3,925				
2	Коэффициенты источника	Tв, 0С	Tос, 0С	H, м	vm	vm'	f	fe	
		20	-1	10	1,313005	0,65	11,90476	219,7	
3	Коэффициенты m и n	m(f<100)		n vm<0,5	n [0,5;2)	n =>2	n		
		0,558231		5,777221	1,250458	1	1,250458		
4	Концентрация приземная	A	M, г/с	F	См, мг/м <sup>3</sup>				
		200	6,266	1	2,010097				
5	Дальность при См	d vm<0,5	d [0,5;2)	d =>2	d	Xм,м	X,м	X/Xм	
		6,670055	17,48032	21,57292	17,48032	174,8032	5960	34,09549	
6	Концентрация на X	s1 x/xмс1	s1 (1;8)	s1 (8;100)	s1 ≥100	s1	С мг/м <sup>3</sup>	Y,м	u, м/с
		3744124	0,007428	0,011165	0,03828	0,011165	0,022443	380	5
7	Концентрация по нормали	ty u<5	ty u≥5	ty	s2	Cy			
		0,020326	0,020326	0,020326	0,815929	0,018312			

Рисунок А.17 – Расчёт по оксиду азота, измерение восьмое

1	Расчёт расхода смеси	$\rho_i$	w, м/с	D, м	V, м <sup>3</sup> /с				
		3,14	5	1	3,925				
2	Коэффициенты источника	Tв, 0С	Tос, 0С	H, м	vm	vm'	f	fe	
		20	-8	10	1,445149	0,65	8,928571	219,7	
3	Коэффициенты m и n	m(f<100)		n vm<0,5	n [0,5;2)	n =>2	n		
		0,597315		6,358655	1,162891	1	1,162891		
4	Концентрация приземная	A	M, г/с	F	См, мг/м <sup>3</sup>				
		200	6,266	1	1,817314				
5	Дальность при См	d vm<0,5	d [0,5;2)	d =>2	d	Xм,м	X,м	X/Xм	
		6,670055	19,23958	22,63248	19,23958	192,3958	4520	23,49324	
6	Концентрация на X	s1 x/xмс1	s1 (1;8)	s1 (8;100)	s1 ≥100	s1	С мг/м <sup>3</sup>	Y,м	u, м/с
		813466	0,015532	0,018709	0,091285	0,018709	0,034	630	5
7	Концентрация по нормали	ty u<5	ty u≥5	ty	s2	Cy			
		0,097135	0,097135	0,097135	0,378215	0,012859			

Рисунок А.18 – Расчёт по оксиду азота, измерение девятое

Приложение Б

Статистический анализ расчёта по методу Берлянда

n	x	x-хср	(x-хср) <sup>2</sup>	Q1	0,22
1	-35	-59,2449	3509,957	Qn	0,007173
2	-10,8	-35,0449	1228,144		
3	10,714	-13,5309	183,085		
4	11,111	-13,1339	172,499		
5	12,222	-12,0229	144,5499		
6	38,438	14,19311	201,4444		
7	42,308	18,06311	326,276		
8	74,211	49,96611	2496,612		
9	75	50,75511	2576,081		
хср	24,24489	Сумм	10838,65		
R	110				
S	12,26934				
t	2,31				
Хабс	28,34218				
24,24489	28,34218				

Рисунок Б.1 – Расчёт по аммиаку

n	x	x-хср	(x-хср) <sup>2</sup>	Q1	0,130677
1	-80,214	-39,945	1595,603	Qn	0,397861
2	-66,857	-26,588	706,9217		
3	-51,429	-11,16	124,5456		
4	-46,083	-5,814	33,8026		
5	-44,2	-3,931	15,45276		
6	-38,571	1,698	2,883204		
7	-38,4	1,869	3,493161		
8	-18,667	21,602	466,6464		
9	22	62,269	3877,428		
хср	-40,269	Сумм	6826,777		
R	102,214				
S	9,737368				
t	2,31				
Хабс	22,49332				
-40,269	22,49332				

Рисунок Б.2 – Расчёт по оксиду азота

## Приложение В

### Расчёт по методу Паскуилла-Гиффорда

				Исходные данные								
				Результат расчёта								
				Выбрать из вариантов								
1	Коэффициенты диффузии						м/с	Инсоляция				
Инсоляц	Сильная	Небо ясное, солнце выше 60				<2	А	А-В	В			
	Средняя	Небо ясное и солнце 15-60 или небо переменное и солнце выше 60				$2 \leq u < 3$	А-В	В	С			
	Слабая	Остальное				$3 \leq u < 5$	В	В-С	D			
						$5 \leq u < 6$	С	С-D	D			
						6	С	D	D			
Y												
600	Городская местность											
X	А-В	С	D	Класс	D							
3940	σy	785,549	540,0649	392,7744916	σy	392,7745	734,1546	533,9306	367,0773	200,224	σy	
	σz	4671,264	788	373,4194065	σz	373,4194	788	472,8	235,7233	80,01844	σz	
		А	В	С	D							
		Открытая местность										
Q, г/с	u, м/с	h, м	z, м	C, г/м <sup>3</sup>	C, мг/м <sup>3</sup>							
22,645	6	10	0	7,93953E-07	0,000794							

Рисунок В.1 – Расчёт по аммиаку, измерение первое

				Исходные данные								
				Результат расчёта								
				Выбрать из вариантов								
1	Коэффициенты диффузии						м/с	Инсоляция				
Инсоляц	Сильная	Небо ясное, солнце выше 60				<2	А	А-В	В			
	Средняя	Небо ясное и солнце 15-60 или небо переменное и солнце выше 60				$2 \leq u < 3$	А-В	В	С			
	Слабая	Остальное				$3 \leq u < 5$	В	В-С	D			
						$5 \leq u < 6$	С	С-D	D			
						6	С	D	D			
Y												
600	Городская местность											
X	А-В	С	D	Класс	D							
3740	σy	757,529	520,8012	378,7645233	σy	378,7645	701,9415	510,5029	350,9707	191,4386	σy	
	σz	4254,624	748	359,440449	σz	359,4404	748	448,8	226,3033	77,02295	σz	
		А	В	С	D							
		Открытая местность										
Q, г/с	u, м/с	h, м	z, м	C, г/м <sup>3</sup>	C, мг/м <sup>3</sup>							
22,645	6	10	0	7,1739E-07	0,000717							

Рисунок В.2 – Расчёт по аммиаку, измерение второе

## Продолжение приложения В

				Исходные данные									
					Результат расчёта								
					Выбрать из вариантов								
1	Коэффициенты диффузии					um/c	Инсоляция						
									Сильная	Средняя	Слабая		
Инсоляц	Сильная	Небо ясное, солнце выше 60				<2	А	А-В	В				
	Средняя	Небо ясное и солнце 15-60 или небо переменное и солнце выше 60				$2 \leq u < 3$	А-В	В	С				
	Слабая	Остальное				$3 \leq u < 5$	В	В-С	D				
						$5 \leq u < 6$	С	С-D	D				
У					6	С	D	D					
1150	Городская местность												
Х			А-В	С	D	Класс	D						
5600	ou	995,5556	684,4444	497,777778	ou	497,7778	986,3894	717,3741	493,1947	269,0153	ou		
	oz	8870,4	1120	478,9042219	oz	478,9042	1120	672	307,6877	102,6223	oz		
						А	В	С	D				
Q, г/с	u, м/с	h, м	z, м	C, г/м <sup>3</sup>	C, мг/м <sup>3</sup>	Открытая местность							
22,645	7	10	0	2,07728E-08	2,08E-05								

Рисунок В.3 – Расчёт по аммиаку, измерение третье

				Исходные данные									
					Результат расчёта								
					Выбрать из вариантов								
1	Коэффициенты диффузии					um/c	Инсоляция						
									Сильная	Средняя	Слабая		
Инсоляц	Сильная	Небо ясное, солнце выше 60				<2	А	А-В	В				
	Средняя	Небо ясное и солнце 15-60 или небо переменное и солнце выше 60				$2 \leq u < 3$	А-В	В	С				
	Слабая	Остальное				$3 \leq u < 5$	В	В-С	D				
						$5 \leq u < 6$	С	С-D	D				
У					6	С	D	D					
1050	Городская местность												
Х			А-В	С	D	Класс	D						
5300	ou	960,1709	660,1175	480,0854625	ou	480,0855	942,6551	685,5674	471,3276	257,0878	ou		
	oz	8013,6	1060	461,0563664	oz	461,0564	1060	636	295,4148	98,79779	oz		
						А	В	С	D				
Q, г/с	u, м/с	h, м	z, м	C, г/м <sup>3</sup>	C, мг/м <sup>3</sup>	Открытая местность							
22,645	6	10	0	4,54138E-08	4,54E-05								

Рисунок В.4 – Расчёт по аммиаку, измерение четвертое















