

**И. В. Антонов
А. В. Епифанов**

**МАССОПЕРЕНОС В ВОЗДУШНОЙ
И ВОДНОЙ СРЕДАХ**

Учебное пособие

**Санкт-Петербург
2024**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики**

**И. В. Антонов
А. В. Епифанов**

МАССОПЕРЕНОС В ВОЗДУШНОЙ И ВОДНОЙ СРЕДАХ

Учебное пособие

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД

Санкт-Петербург
2024

УДК 628 (075)
ББК 38.761я7
A724

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

М. В. Романов;

кандидат технических наук, доцент Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна

С. В. Тихов

Антонов, И. В.

A724 Массоперенос в воздушной и водной средах: учебное пособие / И. В. Антонов, А. В. Епифанов. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2024. — 87 с.

ISBN 978-5-91646-406-1

Учебное пособие соответствует программам и учебным планам дисциплины «Массоперенос в воздушной и водной средах» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 20.04.01 «Техносферная безопасность». В пособии изложены основы теории переноса веществ в воздушной и в водной средах, рассмотрены модели, которые описывают перемещение и превращение веществ, приведены основные положения нормативных документов в данной области.

Пособие предназначено для подготовки магистров очной и заочной форм обучения.

УДК 628 (075)
ББК 38.761я7

ISBN 978-5-91646-406-1

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2024
© Антонов И. В., Епифанов А. В., 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. ОСНОВНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ КОНВЕКТИВНО-ДИФФУЗИОННОГО ПЕРЕНОСА И ПРЕВРАЩЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ.....	7
1.1. Виды источников загрязнения водных объектов.....	7
1.2. Дифференциальные уравнения переноса загрязняющих веществ и турбулентной диффузии примесей	10
1.2.1 Примеры решения дифференциальных уравнений переноса загрязняющих веществ в водотоках.....	18
1.2.2. Расчет процессов переноса загрязняющих веществ в водоемах.....	19
1.2.3. Алгоритм расчета ветровых течений	22
1.2.4. Алгоритм решения дифференциального уравнения переноса загрязняющих веществ для озер и морей	24
2. РАСЧЕТ ПЕРЕНОСА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ ОТДЕЛЬНЫХ ВЫПУСКОВ ПО УПРОЩЕННЫМ МОДЕЛЯМ	28
2.1. Расчет кратности разбавления при сбросе сточных вод в водотоки	28
2.1.1. Расчет начального разбавления методом Лапшева	28
2.1.2. Расчет кратности основного разбавления в водотоках методом Фролова-Родзиллера	30
2.1.3. Расчет основного разбавления экспресс-методом ГГИ	32
2.1.4. Расчет основного разбавления методом Таллинского политехнического института	34
2.1.5. Расчет основного разбавления детальным методом расчета турбулентной диффузии.....	36
2.2. Расчет кратности разбавления при сбросе сточных вод в водоемы	42
2.2.1. Расчет кратности начального разбавления.....	43
2.2.2. Расчет кратности основного разбавления.....	43
2.3. Расчет кратности разбавления при сбросе сточных вод в моря.....	44
2.3.1. Расчет кратности начального разбавления.....	44
2.3.2. Расчет кратности основного разбавления.....	46
3. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПОВЕДЕНИЕ ПОТОКОВ В АТМОСФЕРЕ.....	48
3.1. Поведение потока, выбрасываемого в атмосферу	48
3.1.1. Поверхностное трение	49
3.1.2. Температура	50
3.1.3. Ветер	53
3.1.4. Турбулентность	54
3.2. Характеристики источников выбросов	56
3.3. Методы оценки дисперсии	57
3.4. Перечень основных моделей, используемых для оценки загрязнения атмосферы	59

4. МЕТОДЫ РАСЧЕТА РАССЕЙВАНИЯ ОТ ВЫБРОСОВ ОДИНОЧНОГО ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА	62
4.1. Расчет максимальных разовых концентраций	62
4.2. Расчет рассеивания выбросов ЗВ в атмосферном воздухе с учетом влияния застройки	67
4.2.1. Основные расчетные характеристики	67
4.2.2. Расчет распределения концентрации ЗВ от одиночного точечного источника выброса при произвольно заданных направлениях и скоростях ветра	76
4.2.3. Расчет концентрации ЗВ от одиночного точечного источника выброса при наличии двух зданий	80
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	83
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	86

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВНИИВО	Всероссийский научно-исследовательский институт охраны воды
СПАВ	Синтетические поверхностно-активные вещества
БПК	Биохимическая потребность в кислороде
КДП и ПВ	Конвективно-диффузионный перенос и превращение веществ
ГГИ	Государственный гидрологический институт
НДС	Норматив допустимого сброса
ГО	Гражданская оборона
ОНД-86	Общесоюзный нормативный документ-86
МАГАТЭ	Международное агентство по атомной энергетике
НДВ	Норматив допустимого выброса
НМУ	Неблагоприятные метеорологические условия
ГВС	Газовоздушная смесь
ЗВ	Загрязняющее вещество
ПДК _{м.р}	Предельно допустимая концентрация максимально разовая

ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации производственных объектов образуются загрязняющие вещества, которые поступают в атмосферный воздух и водные объекты. В окружающей среде загрязняющие вещества подвергаются процессам трансформации и конвективно-диффузионному переносу в различных направлениях. При нормировании допустимых выбросов и сбросов следует учитывать множество факторов окружающей среды и источников загрязнения с разработкой их математических моделей.

В данном учебном пособии изложены основные методы, описывающие превращение и перенос веществ в воздушной и водной средах.

Пособие предназначено для подготовки магистров по государственному образовательному стандарту направления подготовки 20.04.01 – «Техносферная безопасность».

Пособие разбито на 4 главы.

Первая глава посвящена описанию видов источников загрязнения водных объектов. Рассмотрены различные дифференциальные уравнения конвективно-диффузионного переноса загрязняющих веществ в водных объектах, приведены частные примеры решения уравнений массопереноса для водотоков, водоемов и морей. Подробно рассмотрен алгоритм расчета ветровых течений.

Во второй главе рассмотрены варианты расчета кратностей разбавления при сбросе сточных вод в водотоки, водоемы и моря. Приведены следующие методы расчета кратностей разбавления: Лапшева, Фролова-Родзиллера, экспресс-метод ГГИ, метод Таллинского политехнического института, детальный метод расчета турбулентной диффузии.

В третьей главе приводятся факторы, которые следует учитывать при расчете переноса и превращений загрязняющих веществ при выходе выбросов в атмосферный воздух.

Четвертая глава посвящена методам расчета рассеивания от выбросов одиночного точечного источника. В ней показано, как определяются максимально разовые концентрации в приземном слое атмосферы при выбросе загрязняющих веществ. Разобран алгоритм расчета рассеивания выбросов загрязняющих веществ с учетом влияния застройки.

Учебное пособие написано на основе опыта чтения лекций по дисциплине «Массоперенос в воздушной и водной средах» для студентов Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна.

1. ОСНОВНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ КОНВЕКТИВНО-ДИФФУЗИОННОГО ПЕРЕНОСА И ПРЕВРАЩЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

Прогнозирование качества воды водных объектов необходимо для решения многих экологических задач, включая обоснование допустимых масс сброса загрязняющих веществ от водопользователей, оценку потенциальных негативных воздействий от планируемой в акватории деятельности, учет неблагоприятных природных процессов и т.д.

Как правило, прогнозирование качества воды водных объектов осуществляется методами математического моделирования. Расчет переноса загрязняющих веществ осуществляют при расчете нормативов допустимых сбросов, разработке проектов охраны окружающей среды, в части негативного воздействия на водные объекты, оптимизации нагрузки между группами водопользователей, проведении гидротехнических, дноуглубительных и прочих работ в акваториях.

1.1. Виды источников загрязнения водных объектов

Согласно водному кодексу РФ [1] источниками загрязнения являются объекты, с которых осуществляется сброс или иное поступление в водные объекты вредных веществ, ухудшающих качество поверхностных и подземных вод, ограничивающих их использование, а также негативно влияющих на состояние дна и берегов водных объектов

Источники поступления загрязняющих веществ в водные объекты можно разделить на сосредоточенные и диффузные.

Сосредоточенный сток сбрасывается в водные объекты водопользователями посредством водовыпусков. Для водовыпуска могут быть определены точные координаты и параметры сточных вод, включая расход сточных вод и содержание загрязняющих веществ.

Диффузный сток – это, прежде всего, сток с территории: с сельскохозяйственных полей, промплощадок, территорий населенных пунктов, дорог, объектов судоходства и т.д. Он является стихийным и неконтролируемым. Источниками диффузного стока являются также зоны аномального техногенного загрязнения почв, которые систематически «питают» водные объекты опасными веществами. Как правило не удается точно определить точные координаты диффузного стока, его расход и химический состав.

Выпуски сточных вод по своим конструктивным параметрам крайне многообразны. Среди них выделяют береговые и русловые. Через береговые выпуски сточных вод сброс осуществляется непосредственно с берега. Через русловые выпуски сброс сточных вод осуществляется на некотором расстоянии от берега.

Использование рассеивающих водовыпусков позволяет повысить кратность начального разбавления. В рассеивающих водовыпусках сброс осуществляется через несколько водоотводящих патрубков.

Основные типы водовыпусков приведены на рис. 1.1 – 1.5.

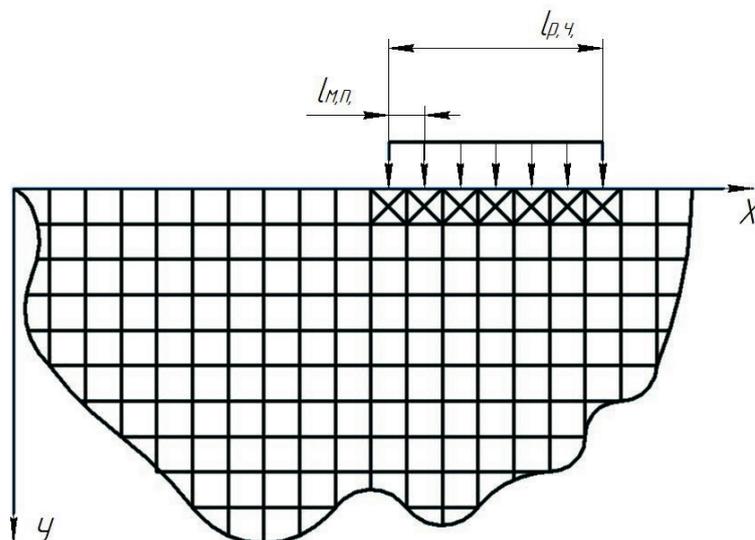


Рисунок 1.1 – Береговой распределенный выпуск:
 X – координата начальной точки выпуска, км; $l_{р,ч}$ – длина распределенной части выпуска, м; $l_{м,л}$ – расстояние между патрубками

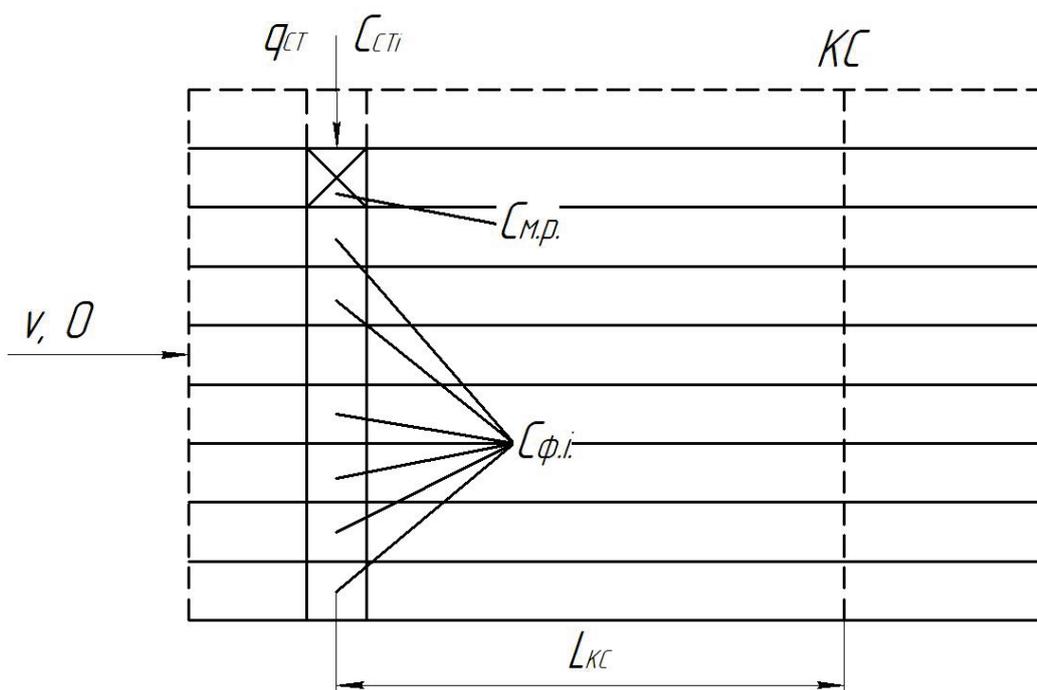


Рисунок 1.2 – Береговой сосредоточенный выпуск

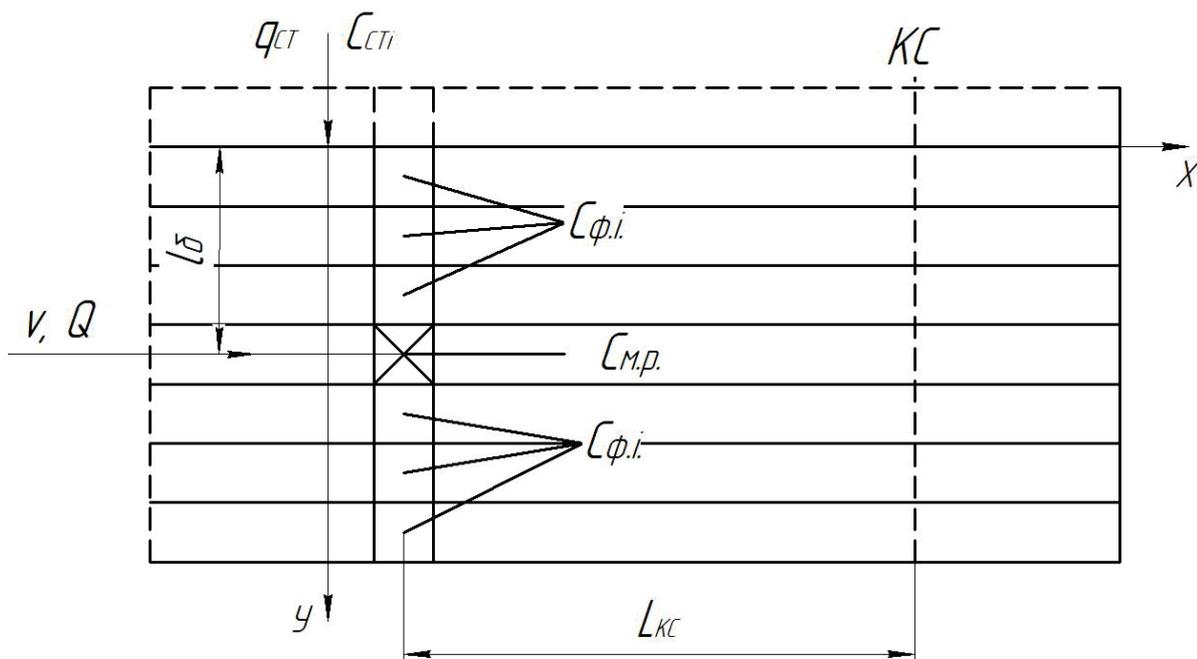


Рисунок 1.3 – Русловой сосредоточенный выпуск:
 x – координата ветки выпуска, км; l_{δ} – расстояние от берега до точки выпуска, м.

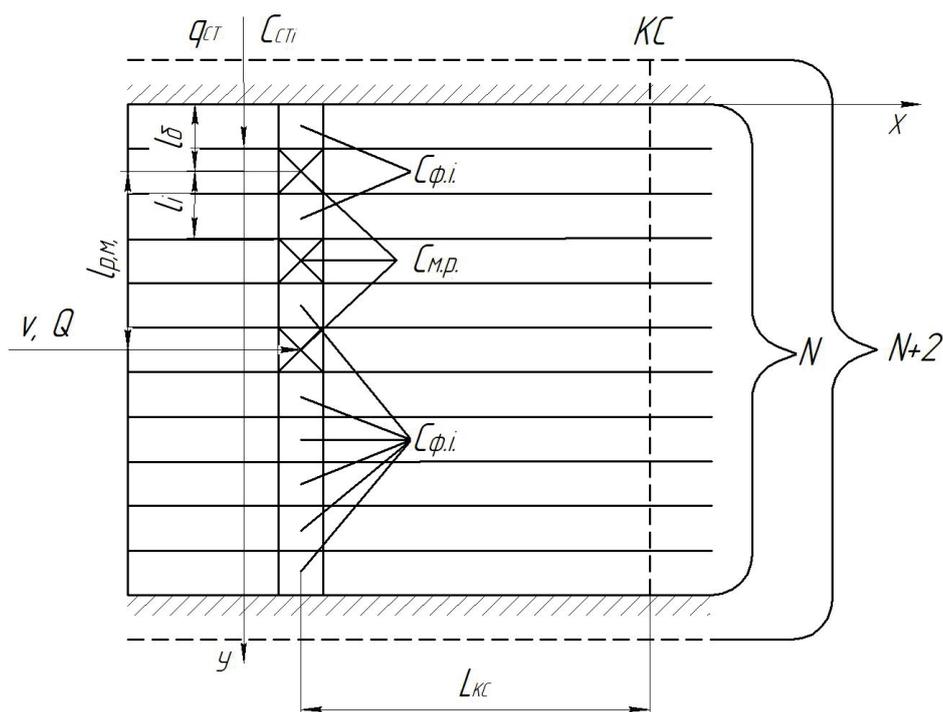


Рисунок 1.4 – Русловой рассеивающий выпуск:
 x – координата ветки выпуска, км; l_{δ} – расстояние от берега до первого патрубка выпуска, м; $l_{рч}$ – длина рассеивающей части, м; l_i – расстояние между патрубками, м; N – количество расчетных элементов; $N+2$ – количество расчетных элементов с учетом граничных условий

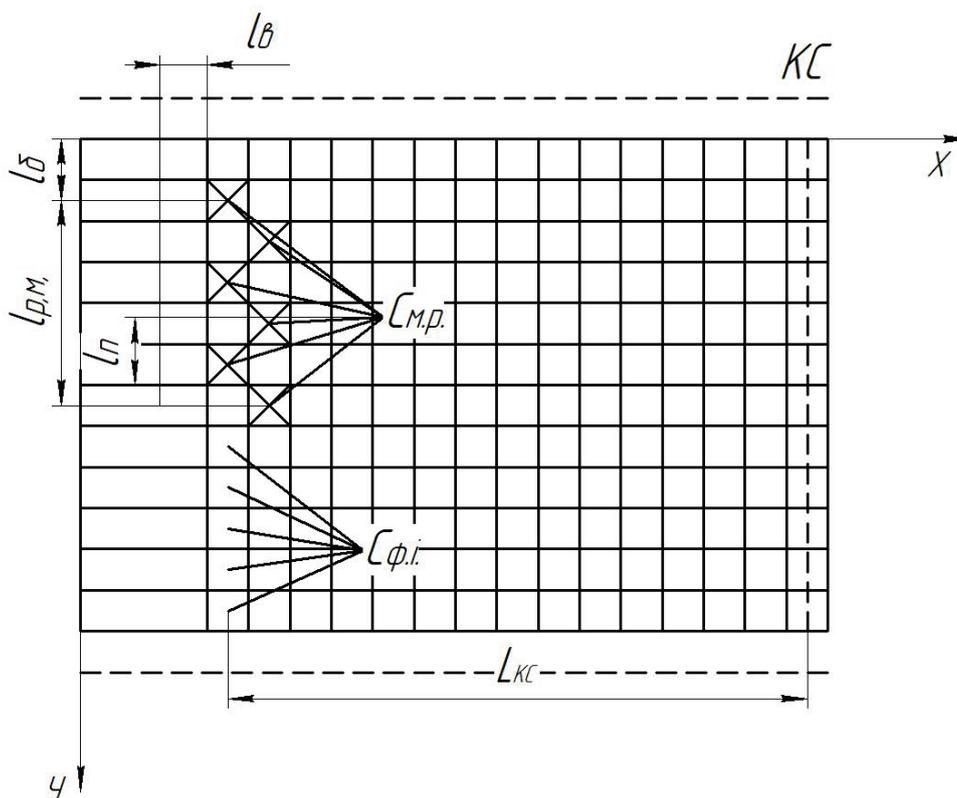


Рисунок 1.5 – Русловой рассеивающий водовыпуск с двумя ветками
 x – координата первой ветки выпуска, км; l_b – расстояние между веками, м; Для каждой ветки указываются: l_b – расстояние от берега до первого патрубка выпуска, м; $l_{р.ч.}$ – длина рассеивающей части, м; l_i – расстояние между патрубками, м

Для источников, оказывающих значительное влияние на качество воды в водоеме, целесообразно применение рассеивающих водовыпусков с расчётом необходимого количества патрубков и оптимальной ширины между ними. Общая длина водовыпуска не должна превышать $1/3$ ширины реки. Эффективность работы рассеивающего водовыпуска оценивается по величине концентрации начального разбавления и максимальной концентрации в контрольном створе в сравнении с соответствующими величинами для сосредоточенного водовыпуска по каждому показателю загрязнения. Изменение конструкции водовыпуска принимается обоснованным, если уменьшение максимальной концентрации в контрольном створе произойдет более чем на 15 %, а изменение концентрации начального разбавления более чем на 50 %.

1.2. Дифференциальные уравнения переноса загрязняющих веществ и турбулентной диффузии примесей

Перенос загрязняющих веществ в водных объектах описывается уравнением турбулентной диффузии.

В общем виде массоперенос описывается уравнением конвективно-диффузионного переноса [2]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + u_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} + u_z \cdot \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (1.1)$$

где C – концентрация, мг/л;

t – время, с;

x, y и z – координаты длины, ширины и высоты, м;

D_x, D_y и D_z – коэффициенты диффузии по x, y и z ;

k – параметр неконсервативности, с⁻¹;

V – скорость, м/с;

$\frac{\partial C}{\partial t}$ – величина, характеризующая нестационарность системы;

$u_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + u_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} + u_z \cdot \frac{\partial C}{\partial z}$ – величины, характеризующие конвективные составляющие переноса;

$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \right)$, – величины, характеризующие диффузную составляющую переноса.

Основное уравнение турбулентной диффузии не имеет точного решения, а учет всех входящих в него факторов требует значительного количества исходных параметров моделирования.

В инженерной практике для решения этого уравнения используют типизацию моделей.

Основными схемами типизации водных объектов являются:

I. Типизация по мерности модели:

- а) одномерные;
- б) двумерные;
- в) трехмерные.

II. По типу режима переноса:

- а) стационарные;
- б) нестационарные.

III. По граничным условиям:

- а) первого рода;
- б) второго рода;
- в) третьего рода.

IV. В зависимости от направления:

- а) изотропные;
- б) анизотропные;
- в) смешанные.

V. В зависимости от характера процесса:

- а) однородные;
- б) неоднородные.

VI. В зависимости от типа загрязняющего вещества:

- а) консервативные;
- б) неконсервативные.

Трехмерные математические модели применяют при переносе вещества в

трехмерном пространстве. Например, при выбросе загрязняющих веществ предприятием в атмосферный воздух загрязнения будут распространяться во все стороны света, а также вверх и вниз. Применение двумерных математических моделей может быть обусловлено соотношением геометрических размеров моделируемой среды. Например, для неглубокого водоема, в котором глубина значительно меньше длины и ширины можно предположить, что вырывание концентраций загрязняющих веществ по глубине происходит моментально. Соответственно на любой вертикали концентрации загрязняющих веществ будут одинаковыми, а изменение концентраций по глубине можно приравнять нулю. Аналогично одномерные модели могут применяться, когда один из геометрических параметров значительно превосходит два других. Например, можно рассмотреть вопрос переноса загрязняющего вещества в придорожной канаве, в которой ширина и глубина канавы значительно меньше ее длины. Можно предположить, что выравнивание концентраций по ширине и глубине канавы происходит моментально, соответственно изменение концентраций по этим направлениям в математической модели приравнивается нулю.

Как было указано выше, стационарные модели могут применяться для конкретных моментов времени, и, если модель стационарна, то изменение концентраций во времени приравнивается нулю.

В случае граничных условий I рода (задача Дирихле) на границе расчётной области Z задаётся распределение значений исходной функции:

$$C|_L = f_1(x, y, z), \quad (1.2)$$

Граничные условия II рода (задача Неймана) задаются на границе области в виде нормальной производной (градиента) искомой функции:

$$\left. \frac{\partial C}{\partial n} \right|_L = f_2(x, y, z), \quad (1.3)$$

где n – внутренняя нормаль к границам объекта.

Перенос вещества через берега, ограничивающие водный объект, предполагается равным нулю, т. е. ложе водотока совершенно непроницаемо для загрязняющего вещества, тогда имеем, что

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0. \quad (1.4)$$

Граничные условия III рода представляют линейную комбинацию первых двух:

$$v \cdot C - D \cdot \left. \frac{\partial C}{\partial n} \right|_L = f_3(x, y, z), \quad (1.5)$$

где $v, D, f_3(x, y, z)$ – известные функции, определённые в каждой точке границы потока.

Если обозначить перенос субстанции через единицу площади, ограничивающей поток поверхности в единицу времени через q , тогда получим:

$$q = v_n \cdot C - D_n \cdot \frac{\partial C}{\partial n}, \quad (1.6)$$

где v_n – проекция осредненной скорости на внутреннюю нормаль к границам водоема;

D_n – коэффициент турбулентной диффузии в направлении n .

Математически граничные условия следует считать предельными условиями в том смысле, что для фиксированного $t > 0$ данная комбинация концентрации вещества и ее производных стремится к заданной величине по мере приближения точки к поверхности.

Изотропные процессы не зависят от направления движения, например, изотропная диффузия протекает одинаково во всех направлениях. В инженерной практике часто приравнивают коэффициенты диффузии по ширине и длине водоема. При высоких скоростях течения, коэффициенты диффузии по течению и перпендикулярно течению будут различны, поэтому в данном случае говорят об анизотропной диффузии.

В однородных процессах параметры моделирования одинаковы во всех точках моделируемого пространства. Например, при однородной диффузии постоянные коэффициенты диффузии в уравнении (1) можно вынести за скобку, и оно примет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial C}{\partial z} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - k_1 \cdot C. \quad (1.7)$$

Все вещества условно можно разделить на консервативные и неконсервативные. Консервативные вещества – это вещества, не претерпевающие изменений в окружающей среде за счет химических процессов.

Интенсивность и характер физико-химических и биохимических процессов, в которые вовлекаются сточные воды при конвективно-диффузионном переносе, определяется степенью неконсервативности веществ.

Наиболее разработанным в настоящее время является учет самоочищающей способности водотоков, связанный с превращением органических веществ, интенсивность которых характеризуется коэффициентом неконсервативности. Величина коэффициента биохимического разложения k_1 зависит от ряда факторов (категория и нагрузка загрязнения, гидродинамические характеристики потока, температура воды и т.д.) и изменяется во времени. Это объясняется тем, что первыми в превращения вовлекаются наиболее легкоокисляемые вещества, и остаются все более трудноокисляемые вещества с меньшими коэффициентами неконсервативности. Несмотря на то, что каждое отдельное вещество может потребляться с постоянным кинетическим коэффициентом, общий коэффициент неконсервативности смеси будет уменьшаться.

Значения коэффициентов неконсервативности при температуре 20 °С для многих химических веществ можно узнать из справочников физико-химических величин. В таблице 1.1 приведены значения констант неконсервативности основных загрязняющих веществ.

Таблица 1.1 – Коэффициенты неконсервативности (скорости разложений) веществ при температуре 20 °С для основания натуральных логарифмов

Вещество (показатель)	Значение коэффициента, 1/сут.		
	По С. Н. Черкинскому	по «Справочнику проектировщика канализации населенных мест и промышленных предприятий»	по данным ВНИИВО
1. БПК ₂₀	0,23	-	-
2. Азот аммонийный	-	0,069	0,069 – 0,207
3. Азот нитритов	-	10,8	0,190 – 10,8
4. Азот нитратов	-	-	0,112 – 0,46
5. Растворенный кислород	0,46	0,35 – 1,8	0,27 – 0,46
6. Нефтепродукты	-	0,043	-
7. Фенол	-	0,320	-
8. СПАВ	-	0,045	-

На нужную температуру константа неконсервативности может быть пересчитана по формуле:

$$k(T) = k(20) \cdot 1,04^{(T-20)}, \quad (1.8)$$

где $k(20)$ – константа неконсервативности при температуре 20 °С;

T – температура водной среды, °С

В таблице 1.2 приведены типовые математические модели конвективно-диффузионного переноса и превращения веществ в водной среде.

Таблица 1.2 – Основные типы моделей КДП и ПВ

№№	Тип уравнения, описывающего модель КДП и ПВ	
1.	$\frac{\partial C}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = f(x, t, C)$	(1.9)
2.	$\frac{dC_1}{dt} = -k_1 \cdot C_1$	(1.10)
3.	$\frac{dC_2}{dt} = \frac{dC_1}{dt} + k_2 \cdot (C_{2np} - C_2)$	(1.11)
4.	$\frac{dC_1}{dt} = -\alpha \cdot C_1 \cdot C_2$	(1.12)
5.	$\frac{dC_2}{dt} = \frac{dC_1}{dt} + \beta \cdot (C_{2np} - C_2)$	(1.13)
6.	$\frac{\partial C}{\partial t} + v_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = D_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - k_1 \cdot C$	(1.14)
7.	$\frac{\partial}{\partial x}(Q \cdot C) = \frac{\partial}{\partial y}(\omega \cdot D_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y}) - k_1 \cdot \omega \cdot C$	(1.15)
8.	$\frac{\partial(\omega \cdot C_1)}{\partial t} + \frac{\partial(Q \cdot C_1)}{\partial x} = \frac{\partial[\omega \cdot D_x \cdot \frac{\partial C_1}{\partial x}]}{\partial x} - k_1 \cdot \omega \cdot C_1$	(1.16)

9.	$\frac{\partial(\omega \cdot C_2)}{\partial t} + \frac{\partial(Q \cdot C_2)}{\partial x} = \frac{\partial[\omega \cdot D_x \cdot \partial C_2 / \partial x]}{\partial x} - k_1 \cdot \omega \cdot C_1 + k_2 \cdot \omega \cdot (C_{2\text{ПР}} - C_2)$	(1.17)
10.	$\frac{\partial(\omega \cdot T)}{\partial t} + \frac{\partial(Q \cdot T)}{\partial x} = \frac{\partial[\omega \cdot D_x \cdot \partial T / \partial x]}{\partial x} - k_1 \cdot \omega \cdot (T - T_1)$	(1.18)
11.	$\frac{\partial(\omega \cdot C_1)}{\partial t} + \frac{\partial(Q \cdot C_1)}{\partial x} = \frac{\partial[\omega \cdot D_x \cdot \partial C / \partial x]}{\partial x}$	(1.19)
12.	$B \cdot \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$	(1.20)
13.	$\frac{\partial}{\partial t}(\omega \cdot C) + \frac{\partial}{\partial x}(Q \cdot C) = \frac{\partial}{\partial x}(\omega \cdot D_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x}) - k_1 \cdot \omega \cdot C$	(1.21)
14.	$v_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = D_y \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - k_1 \cdot C$	(1.22)
15.	$\frac{\partial C}{\partial t} + v_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = D_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - k_1 \cdot C$	(1.23)
16.	$v \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial[D_y(\partial C / \partial y)]}{\partial y} + \frac{\partial[D_z(\partial C / \partial z)]}{\partial z} - k_1 \cdot C$	(1.24)
17.	$v \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = D_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - k_1 \cdot C$	(1.25)
18.	$v \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = D_y \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - k_1 \cdot C$	(1.26)
19.	$v \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = D_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial[D_z(\partial C / \partial z)]}{\partial z} - k_1 \cdot C$	(1.27)
20.	$v_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial C}{\partial z} = D_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - k_1 \cdot C,$	(1.28)

где Q – расход воды, м³/с;

k_1 – коэффициент биохимического окисления, 1/сут;

ω – площадь поперечного сечения русла, м²;

v_x, v_y, v_z (v_x, v_y, v_z) – средние скорости течения, м/с;

D_x, D_y, D_z – коэффициенты продольной, поперечной диффузии и диффузии по вертикали соответственно, м²/с;

C – концентрация вещества, мг/л;

t – время, с;

T – температура воды, °С;

x – продольная координата, м;

y – поперечная координата, м;

z – координата по вертикали;

B – коэффициент;

L – длина расчётного участка, м.

Получить точное решение дифференциального уравнения удастся лишь для немногих частных случаев. Поэтому эти задачи решают в основном приближенно. Одним из наиболее универсальных и эффективных методов, получивших на сегодняшний день широкое распространение, является метод конечных разностей или метод сеток [3].

Суть метода состоит в том, что область непрерывного изменения

аргументов заменяется дискретным множеством точек, которое называется сеткой или решёткой. Вместо функции непрерывного аргумента рассматриваются функции дискретного аргумента, определённые в узлах сетки и называемые сеточными функциями. Производные, входящие в дифференциальное уравнение и граничные условия, заменяются разностными производными, при этом краевая задача для дифференциального уравнения заменяется системой линейных или нелинейных алгебраических уравнений (сеточных или разностных уравнений). Такие системы часто называют разностными схемами. Метод конечных разностей является старейшим методом решения краевых задач.

Алгоритм метода конечных разностей состоит из этапов, традиционных для метода сеток [3]:

Этап 1. Построение сетки в заданной области. В методе конечных разностей используется сетка, задаваемая конечным множеством узлов. В узлах сетки определяются приближенные значения искомой функции.

Этап 2. Замена дифференциального оператора в исходном дифференциальном уравнении известным аналогом, построенным по одной из схем. При этом непрерывная функция аппроксимируется сеточной функцией.

Этап 3. Решение полученной системы алгебраических уравнений.

Построение сетки в заданной области.

В методе конечных разностей используют, как правило, регулярные сетки, шаг которых либо постоянен, либо меняется по несложному закону. Ниже на рис. 1.6 приведен пример построения двумерной сетки в методе конечных разностей.

Каждый участок, в свою очередь, делится на «ячейки», исходя из условий устойчивости. В «ячейках» определяется значение концентрации в соответствии с конечно-разностным уравнением. При рассмотрении ячеек, удаленных от точки загрязнения, за начальные условия принимаются значения концентраций, вычисленные в предыдущих ячейках.

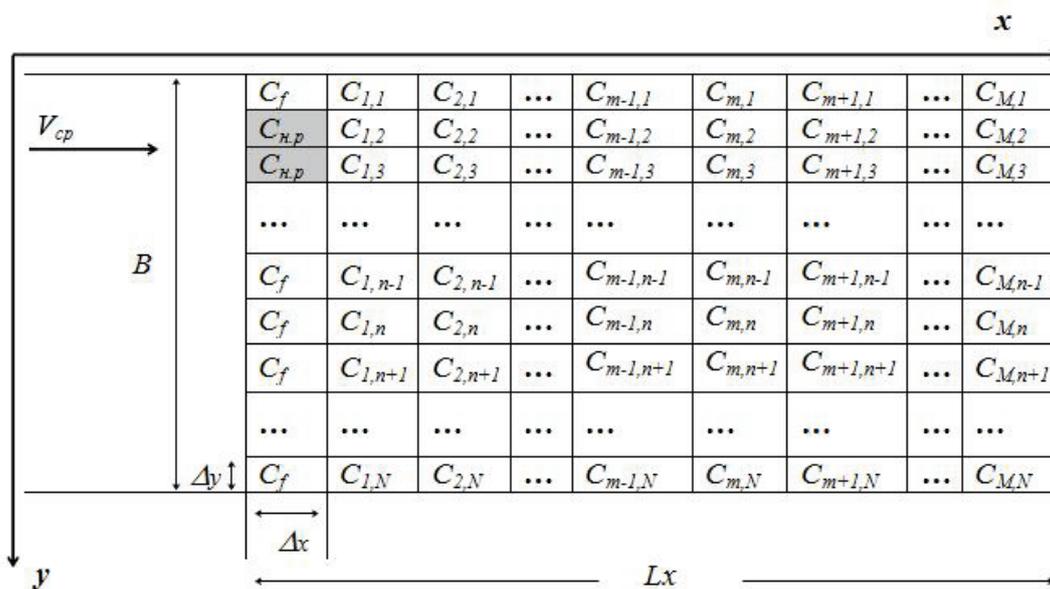


Рисунок 1.6 – Поле распределения концентрации загрязняющего вещества

Количество участков по длине и ширине участка водотока определяется параметрами M и N соответственно.

Чем меньше размеры Δx и Δy , тем более точен, но и более трудоёмок расчёт.

Шаг вдоль берега Δx и шаг в сечении водного объекта Δy выбираются исходя из условия устойчивости, накладываемого при использовании явных конечно-разностных схем аппроксимации задачи КДП и ПВ [2]:

$$\frac{D_y \cdot \Delta x}{V_{\text{ср}} \cdot \Delta y^2}, \quad (1.29)$$

Далее вычисляется количество расчетных клеток для поля распределения концентрации. По сечению водного объекта оно равно

$$N_y = B / \Delta y, \quad (1.30)$$

где B – средняя ширина водотока.

Вдоль берега оно равно

$$M_x = (L_x - l_c) / \Delta x, \quad (1.31)$$

где L_x – местоположение контрольного створа;

l_c – расстояние между исследуемым выпуском и выпуском, самым ближним к устью.

Замена дифференциального оператора разностным аналогом.

Необходимо произвести замену в дифференциальном уравнении членов, содержащих дифференцирование, членами, в которых используются только алгебраические операции.

1. Аппроксимация первых производных [4]:

а. Аппроксимация разностью вперед:

$$\left. \frac{dC}{dx} \right|_l \approx \frac{C_{l+1} - C_l}{\Delta x}, \quad (1.32)$$

б. Аппроксимация разностью назад:

$$\left. \frac{dC}{dx} \right|_l \approx \frac{C_l - C_{l-1}}{\Delta x}, \quad (1.33)$$

в. Аппроксимация центральной разностью – более точная:

$$\left. \frac{dC}{dx} \right|_l \approx \frac{C_{l+1} - C_{l-1}}{2 \cdot \Delta x}, \quad (1.34)$$

2. Аппроксимация вторых производных [4]:

$$\left. \frac{d^2C}{dx^2} \right|_l \approx \frac{C_{l+1} - 2 \cdot C_l + C_{l-1}}{(\Delta x)^2}, \quad (1.35)$$

Кажущаяся простота построения разностной схемы в рассмотренном примере обманчива. В реальных задачах при построении разностных схем возникают проблемы. При исследовании разностных схем даже простых линейных задач часто выясняется, что разностная схема дает решение, не сходящееся при измельчении сетки к точному решению дифференциальной задачи. Поэтому построение сходящейся разностной схемы – это центральный и наиболее сложный вопрос метода конечных разностей [5,6].

1.2.1. Примеры решения дифференциальных уравнений переноса загрязняющих веществ в водотоках

Рассмотрим указанные выше этапы на примере двумерного стационарного уравнения КДП и ПВ для неконсервативной примеси вида:

$$V_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = D_y \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - k \cdot C. \quad (1.36)$$

Данное уравнение является двумерным, поэтому оно должно быть аппроксимировано двумерной сеткой (см. рис 1.6)

Аппроксимируя первую и вторую производную, получим:

$$V_x \cdot \frac{C_{(m+1;n)} - C_{(m;n)}}{\Delta x} = D_y \cdot \frac{C_{(m;n+1)} - 2 \cdot C_{(m;n)} + C_{(m;n-1)}}{\Delta y^2} - k \cdot C. \quad (1.37)$$

Для дальнейших расчетов выразим C_{m+1n} :

$$C_{(m+1;n)} = \frac{D_y \cdot \Delta x}{V_x \cdot \Delta y^2} \cdot (C_{(m;n+1)} - 2 \cdot C_{(m;n)} + C_{(m;n-1)}) + C_{(m;n)} - \frac{k \cdot C \cdot \Delta x}{V_x}. \quad (1.38)$$

Для расчета коэффициента диффузии D_y в зависимости от параметров водотока используются следующие методы:

1) метод Элдера:

$$D_y = 0,23 \cdot V_x \cdot H; \quad (1.39)$$

$$V_x = \sqrt{g \cdot R \cdot J}; \quad (1.40)$$

$$R = \frac{B \cdot H}{B + 2 \cdot H}. \quad (1.41)$$

2) метод Потапова:

$$D_y = \frac{H \cdot V_x}{200}. \quad (1.42)$$

3) метод Караушева:

$$D_y = \frac{H \cdot V_x}{m \cdot C_{III}}; \quad (1.43)$$

$$C_{III} = \frac{V_x}{\sqrt{H \cdot J}}; \quad (1.44)$$

$$m = 0,7 \cdot C_{III} + 6. \quad (1.45)$$

4) метод Банзала:

$$\log \frac{D_y}{H \cdot V_x} = -3,547 + 1,378 \cdot \log \frac{B}{H}. \quad (1.46)$$

5) комбинированный метод:

$$D_y = 0,72 \cdot V_x \cdot H \cdot f^2 \cdot g \cdot H^m; \quad (1.47)$$

$$m = 2,5 \cdot \sqrt{g} - 0,75 \cdot \sqrt{H} \cdot (\sqrt{g} - 0,1) - 0,13, \quad (1.48)$$

где V_x – средняя скорость воды в реке, м/с;

R – гидравлический радиус, м;

H – средняя глубина, м;

J – уклон (отношение высоты падения к длине падения реки) $\times 1000$;

B – ширина реки, м;

f – коэффициент извилистости;

g – коэффициент шероховатости дна;

C_m – коэффициент Шези;

m – вспомогательный коэффициент.

1.2.2. Расчет процессов переноса загрязняющих веществ в водоемах

В водоемах ветер играет существенную роль в формировании течений, а, следовательно, в распространении загрязняющих веществ от предприятий. При расчете ветровых течений в морях применимо уравнение, описанное в труде Марчука Г. И., Саркисяна А. С. Математические модели циркуляции в океане, 1980 [7-10].

В этом уравнении принимаются следующие приближения:

1. Уравнение тепловой конвекции, приближение гидростатики;

2. Параметр Кориолиса константа;

3. Уравнение переноса энтропии приближенно записывается в форме уравнения переноса тепла в движущейся среде;

4. В качестве уравнения состояния пресной воды используется нелинейное эмпирическое уравнение [7].

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - lv = -\frac{1}{\rho_w} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial u}{\partial y} \right); \quad (1.49)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + lu = -\frac{1}{\rho_w} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial v}{\partial y} \right); \end{aligned} \quad (1.50)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g; \quad (1.51)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (1.52)$$

где $V = (u(x, y, z, t), v(x, y, z, t), w(x, y, z, t))$ – вектор скорости течения воды, м/с;

l – параметр Кориолиса;

$P(x, y, z, t)$ – давление, Па;

ρ – плотность пресной воды, кг/м³;

ρ_w – средняя плотность пресной воды, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$\kappa_x(x, y, z, t)$, $\kappa_y(x, y, z, t)$, $\kappa_z(x, y, z, t)$, – коэффициенты турбулентной диффузии, м²/с.

Выпишем граничные условия на поверхности при $z=0$:

$$k_z \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau_x}{\rho_w}; \quad (1.53)$$

$$k_z \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\tau_y}{\rho_w}, \quad (1.54)$$

где τ_x, τ_y – напряжения трения ветра, дин/см².

Для w на поверхности при $z=0$ ставится граничное условие

$$w = a \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}; \quad a = 0, 1. \quad (1.55)$$

При $a = 0$ – это условие «твердой крышки», при $a = 1$ – линейное приближение условия на свободной поверхности:

$$w = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y}. \quad (1.56)$$

На дне водного объекта при $z = -H(x, y)$ для u, v, w задаются либо условия прилипания:

$$u = v = w = 0; \quad (1.57)$$

либо условия

$$\frac{\partial u}{\partial N} = \frac{\tau_x^H}{\rho_w}; \quad \frac{\partial v}{\partial N} = \frac{\tau_y^H}{\rho_w}; \quad (1.58)$$

$$w = -u \frac{\partial H}{\partial x} - v \frac{\partial H}{\partial y}, \quad (1.59)$$

где τ_x^H, τ_y^H – напряжение трения воды о дно, дин/см².

На вертикальной боковой границе водоема граничные условия ставятся следующим образом. На твердой части границы:

$$u = v = 0; \quad (1.60)$$

в створах втекающих рек

$$u = u_r; \quad v = v_r, \quad (1.61)$$

где u_r, v_r – заданные функции координат и времени.

Помимо граничных условий необходимо задать начальные условия для времени $t=0$:

$$u(x, y, z, 0) = u_0(x, y, z); \quad v(x, y, z, 0) = v_0(x, y, z). \quad (1.62)$$

В зависимости от конкретных условий уравнение приобретает более упрощенный вид для расчетов течений в озерах.

Для решения задач распространения загрязняющих веществ в неглубоком водном объекте используется двумерная модель течений, которая позволяет вычислять распределение осредненных по глубине скоростей в плане водного

объекта. Для получения такой модели необходимо численно решить уравнение мелкой воды [14]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_x}{\partial t} + g \cdot H \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} - l \cdot V_y &= \frac{\tau_x}{\rho} - a \cdot \frac{V_x \cdot G}{H}; \\ \frac{\partial V_y}{\partial t} + g \cdot H \cdot \frac{\partial \xi}{\partial y} - l \cdot V_x &= \frac{\tau_y}{\rho} - a \cdot \frac{V_y \cdot G}{H}; \\ \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} &= 0, \end{aligned} \quad (1.63)$$

где x, y – оси координат;

t – время, сек;

V_x, V_z – потоки в направлении осей x и y соответственно ($V_x = v_x \cdot H$, $V_z = v_z \cdot H$, здесь v_x, v_z – составляющие вектора скорости), м/с;

H – отметка уровня свободной поверхности, м;

$H_0(x, z)$ – глубина водоема, м;

$\xi(x, z, t)$ – возмущение свободной поверхности, м;

l – параметр Кориолиса;

$l = 2 \cdot \omega \cdot \sin \varphi$;

$\omega = 7,29 \cdot 10^{-5}$ – угловая скорость вращения Земли, с⁻¹;

φ – географическая широта;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

ρ – плотность воды кг/см³;

$G = \sqrt{V_x^2 + V_z^2}$;

τ_x, τ_z – составляющая вектора тангенциального напряжения ветра τ , дин/см²:

$$\tau = a \cdot \rho_a \cdot \vec{W} \cdot |\vec{W}|, \quad (1.64)$$

где a – безразмерный коэффициент трения, безразмерный коэффициент, зависящий от шероховатости поверхности моря и высоты, на которой измеряется скорость ветра. Как показали исследования, если скорость ветра измеряется, как обычно, на высоте около 8 м над поверхностью моря, то a обладает следующими двумя постоянными значениями, соответствующими скоростям ветра ниже или выше 5 м/сек., а именно:

$$a = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ при } W_z < 5 \text{ м/сек.};$$

$$a = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ при } W_z > 5 \text{ м/сек.};$$

\vec{W} – вектор скорости ветра, м/с;

ρ_a – плотность воздуха кг/м³, зависящая от его влажности, температуры и атмосферного давления.

Граничные условия задаются следующим образом. На твердых границах $(\vec{V})_n = 0$, где $\vec{V} = (V_x, V_y)$, n – нормаль к границе. На открытой границе Γ задается либо изменение уровня $\xi|_{\Gamma} = \xi(t)$, либо $(\vec{V})_n|_{\Gamma} = (\xi \cdot \sqrt{g \cdot H})|_{\Gamma}$. Впадающие реки моделируются условием $(\vec{V})_n = Q/\Delta x = \text{const}$, где Q – приходящаяся на грань расчетной клетки доля расхода реки [12].

Если необходимо рассчитать стационарное поле скоростей, задачу можно

несколько упростить, вводя функцию полного потока ψ такую, что:

$$V_x = -\frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad V_z = \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad (1.65)$$

где $V_x = \int_0^H V_x dx$, $V_z = \int_0^H V_z dz$.

Изолинией функции ψ является линия тока для полного потока $V=(V_x, V_y)$, а разность значений ψ в двух точках определяет расход воды между этими точками. Уравнение для функции полных потоков имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K_y}{H^3} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K_y}{H^3} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = \frac{1}{2} \text{rot} \frac{\vec{\tau}}{H}, \quad (1.66)$$

где K_y – коэффициент вертикального турбулентного обмена.

В модели Фельзенбаума K_y является функцией скорости ветра и глубины

$$K_y = \gamma \cdot W \cdot \frac{H}{\rho}, \quad (1.67)$$

где $\gamma=0,065 \text{ кг/м}^3$ – постоянная.

При разработке двумерной модели течений в мелководном водоеме будем учитывать следующие факторы, которые определяют возникающие течения:

- 1) ветер с учетом его неравномерности;
- 2) конфигурацию берегов и рельеф дна.

В двумерной модели не учитываются: турбулентная диффузия в вертикальном направлении, наклоны поверхности моря и трение о дно, сила Кориолиса, а также турбулентный обмен в горизонтальных направлениях. Первое, как это показал Экман, оказывается возможным ввиду близости дна, второе – ввиду вертикальной однородности морской воды, обусловленной ветровым перемешиванием.

Наблюдения за течениями, а также теоретические расчеты Н. А. Багрова показывают, что при действии постоянного ветра течение в мелком водоеме быстро достигает установившегося состояния, причем необходимое для этого время не превышает 3 – 4 часов. Указанное обстоятельство позволяет при расчете течений мелководного водоема считать их установившимися [8].

1.2.3. Алгоритм расчета ветровых течений

Для решения двумерного дифференциального уравнения расчета ветровых течений строят двумерную сеточную область (рис. 1.7).

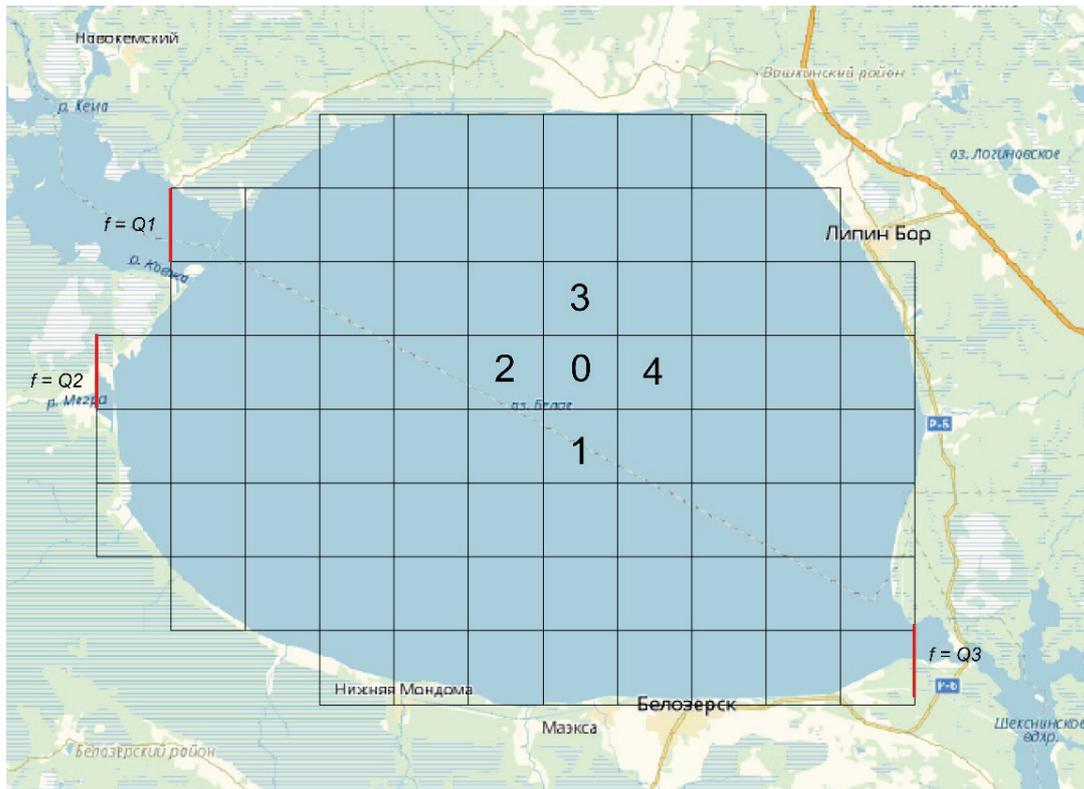


Рисунок 1.7 – Пример двумерной сеточной области для расчета ветровых течений

Уравнение (1.49) решается по следующему алгоритму:

1. Ввести значения проекций скорости ветра в сеточную область по вектору x и y (W_x и W_y).

2. Задать коэффициент a .

3. Рассчитать тангенциальное давление ветра (T_x и T_y , дин/см²):

$$T_x = a \cdot \rho_a \cdot W_x \cdot |W_x|, \quad T_y = a \cdot \rho_a \cdot W_y \cdot |W_y| \quad (1.68)$$

4. Вычислить функцию $rot T$:

$$rot T = \frac{1}{2x} (T_{y(4)} - T_{y(2)} - T_{x(3)} + T_{x(1)}). \quad (1.69)$$

Значения для ячеек 4 и 2 берутся из рассчитанной сеточной области для T_y , а для 1 и 3 из рассчитанной для T_x . Распределение ячеек по номерам представлено на рисунке: $rot T = T_0$.

5. Рассчитать функцию f_0 для каждой ячейки:

$$f_0 = \frac{rot T \cdot 200 \cdot x}{\gamma}, \quad (1.70)$$

где f_0 – выражается целым числом.

6. Для первого приближения расчета принять $\bar{\psi} = f_0$.

Формула для первого приближения

$$\bar{\psi}_0 = \frac{1}{4} (f_{0(1)} + f_{0(2)} + f_{0(3)} + f_{0(4)}) - f_0. \quad (1.71)$$

Для последующих приближений

$$\overline{\psi}_0 = \frac{1}{4}(\overline{\psi}_1 + \overline{\psi}_2 + \overline{\psi}_3 + \overline{\psi}_4) - f_0. \quad (1.72)$$

Значения необходимо брать из ячеек соответствующего номера.

После этого строятся вычислительные шаблоны и начинается процесс последовательных приближений, который продолжается до тех пор, пока в пределах заданной точности два последовательных шаблона не совпадут.

7. Вычислить функцию полных потоков по формуле:

$$\psi = \overline{\psi} \cdot H; \quad (1.73)$$

8. Определить, на каком горизонте нужно считать скорость и задать горизонт z в метрах.

$$u = \frac{3 \cdot (H^2 - z^2) \cdot (\psi_4 - \psi_2)}{4 \cdot H^3} + \frac{T_x}{4 \cdot A_z} \cdot (H^2 - 4 \cdot H \cdot z + 3 \cdot z^2); \quad (1.74)$$

$$v = \frac{3 \cdot (H^2 - z^2) \cdot (\psi_3 - \psi_1)}{4 \cdot H^3} + \frac{T_y}{4 \cdot A_z} \cdot (H^2 - 4 \cdot H \cdot z + 3 \cdot z^2). \quad (1.75)$$

Скорость на поверхности рассчитывается по формулам:

$$u_0 = \frac{3 \cdot (\psi_4 - \psi_2)}{4 \cdot h \cdot H} + \frac{T_x \cdot H}{4 \cdot A_z}; \quad (1.76)$$

$$v_0 = \frac{3 \cdot (\psi_3 - \psi_1)}{4 \cdot h \cdot H} + \frac{T_y \cdot H}{4 \cdot A_z}. \quad (1.77)$$

1.2.4. Алгоритм решения дифференциального уравнения переноса загрязняющих веществ для озер и морей

В основе модели лежит выражение единичного адвективного и турбулентного переноса вещества через контрольную поверхность в водной среде r_s (г/(м²·с)) [13]. Это выражение имеет вид:

$$r_s = v_n \cdot C - D \cdot \frac{\partial C}{\partial n}, \quad (1.78)$$

где v_n – значение осредненной скорости течения, м/с;

C – концентрация вещества в точке пересечения нормали n с контрольной поверхностью, г/м³;

D – коэффициент турбулентной диффузии в той же точке, м²/с.

На первом этапе рассчитываем шаг по времени:

$$\Delta t \leq \frac{\gamma \cdot H \cdot \Delta x}{\sum_{r=1}^m (v_r \cdot H_r)}, \quad (1.79)$$

где γ – часть водных масс, $\gamma = 0,5$;

m – число граней, через которые осуществляется вынос водных масс;

r – порядковый номер грани.

При оценке Δt берем контрольный элемент на гранях, которого наблюдаются наиболее значительные компоненты скорости.

Дальнейший расчет производится, как и в случае ветровых течений, методом сеток.

Расход воды через грань a :

$$q_a = v_a \cdot \Delta z \cdot H_a . \quad (1.80)$$

Для случая нестационарного процесса переноса загрязняющих веществ на фоне стационарного скоростного поля необходимо записать следующее дифференциальное уравнение:

$$q_{ija}^k - q_{ijb}^k + q_{ijc}^k - q_{ijd}^k = \left(H \cdot \frac{\partial C}{\partial t} \right) \cdot \Delta x \cdot \Delta z . \quad (1.81)$$

Расход вещества через грань а для контрольного элемента ij:

$$q_{sija} = \frac{v_{ija}^+ \cdot C_{i-1,j} - D \cdot (C_{ij} - C_{i-1,j})}{H_{ija} \cdot \Delta z} . \quad (1.82)$$

Уравнение баланса вещества в конечно-разностной форме:

$$C_{ij}^{k+1} - C_{ij}^k = \frac{(q_{sija}^k - q_{sijb}^k + q_{sijc}^k - q_{sijd}^k) \cdot \Delta t}{H_{ij} \cdot \Delta x^2} . \quad (1.83)$$

Некоторая вспомогательная функция φ :

$$\varphi_{ija}^k = \frac{q_{sija}^k \cdot \Delta t}{H_{ij} \cdot \Delta x^2} . \quad (1.84)$$

Преобразуем выражение 1.82, вводя обозначения:

$$m_{ija} = \frac{H_{ija}}{H_{ij}} ; \quad (1.85)$$

$$\eta_{ija} = \frac{D \cdot m_{ija} \cdot \Delta t}{\Delta x^2} ; \quad (1.86)$$

$$v_{ija} = \frac{v_{ija} \cdot \Delta x}{D} . \quad (1.87)$$

Все эти величины являются безразмерными и при стационарном поле скоростей течения не изменяются во времени. Величина m_{ija} выражает относительную среднюю глубину на грани а (по отношению к средней глубине H_{ij} элемента ij). Аналогичные формулы используются для расчета параметров m , v и η для остальных граней элемента. Параметры m и η всегда положительны, а параметр v принимает знак проекции скорости на нормаль к грани.

Расчетные формулы для функции φ для всех четырех граней:

$$\varphi_{ija}^k = [v_{ija} \cdot (C_{i-1,j}^{+k} + C_{ij}^{-k}) + C_{i-1,j}^k - C_{ij}^k] \cdot n_{ija} ; \quad (1.88)$$

$$\varphi_{ijb}^k = [v_{ijb} \cdot (C_{i,j}^{+k} + C_{i+1,j}^{-k}) + C_{i,j}^k - C_{i+1,j}^k] \cdot n_{ijb} ; \quad (1.89)$$

$$\varphi_{ijc}^k = [v_{ijc} \cdot (C_{i,j-1}^{+k} + C_{ij}^{-k}) + C_{i,j-1}^k - C_{ij}^k] \cdot n_{ijc} ; \quad (1.90)$$

$$\varphi_{ijd}^k = [v_{ijd} \cdot (C_{i,j}^{+k} + C_{i,j+1}^{-k}) + C_{i,j}^k - C_{i,j+1}^k] \cdot n_{ijd} . \quad (1.91)$$

Предусматривается выборочный расчет: при положительном значении v_{ij} оно умножается на значение концентрации, помеченное сверху знаком +, а концентрация, помеченная знаком -, отбрасывается. Если v_{ij} меньше нуля, то оно умножается на значение концентрации, помеченное сверху знаком -, а помеченное знаком + отбрасывается.

При учете всех принятых обозначений расчетная формула концентрации в элементе записывается в виде:

$$C_{ij}^{k+1} = C_{ij}^k + \varphi_{ija}^k - \varphi_{ijb}^k + \varphi_{ijc}^k - \varphi_{ijd}^k. \quad (1.92)$$

Расчет полей концентрации выполняется по формуле (1.92) при соответствующем учете начальных, граничных условий и источников загрязнения, находящихся внутри расчетной области водоема.

Кроме того, в формуле могут быть учтены взмыв и осаждение частиц, неконсервативность вещества и приток реки. С этими условиями уравнение приобретает следующий вид:

$$C_{ij}^{k+1} = C_{ij}^k + \varphi_{ija}^k - \varphi_{ijb}^k + \varphi_{ijc}^k - \varphi_{ijd}^k + \varphi_{ijст}^k + \varphi_{ijр}^k + \varphi_{ijнк}^k + \varphi_{ijвзм}^k - \varphi_{ijос}^k, \quad (1.93)$$

где $\varphi_{ijст}^k$ – функция, учитывающая приток сточных вод непосредственно в расчетный элемент;

$$\varphi_{ij,ст}^k = \frac{Q_{ст} \cdot C_{ст}^k \cdot \Delta t}{H_{ij} \cdot \Delta x^2}, \quad (1.94)$$

где $C_{ст}^k$ – концентрация загрязняющего вещества в сточных водах в момент t^k .

$\varphi_{ijр}^k$ – функция, учитывающая приток реки:

$$\varphi_{ijр}^k = \frac{Q_p \cdot C_p^k \cdot \Delta t}{H_{ij} \cdot \Delta x^2}, \quad (1.95)$$

где Q_p – расход воды в реке;

C_p^k – концентрация загрязняющего вещества в реке;

$\varphi_{ijнк}^k$ – функция, учитывающая неконсервативность вещества:

$$\varphi_{ijнк}^k = k \cdot C_{ij}^k \cdot \Delta t, \quad (1.96)$$

где k – коэффициент неконсервативности.

$\varphi_{ijвзм}^k$ – функция, определяющая взмыв частиц со дна:

$$\varphi_{ijвзм}^k = \frac{E_{ijn} \cdot C_{ijвзмn}^k \cdot \Delta t}{H_{ij}}, \quad (1.97)$$

где E – безразмерный параметр. Данный параметр при малых скоростях течения менее 0,1-0,2 м/с определяется следующим отношением

$$E_n \approx 0,2 \cdot u_n;$$

u_n – гидравлическая крупность (скорость осаждения частиц), м/с;

$\varphi_{ijос}^k$ – функция, определяющая осаждение частиц на дно:

$$\varphi_{ijос}^k = \frac{(u_n + E_n)_{ij} \cdot C_{ijn}^k \cdot \Delta t}{H_{ij}}. \quad (1.98)$$

Для начала расчета необходимо ввести начальные и граничные условия.

Основным граничным условием при расчете переноса растворенного вещества в водоеме или водотоке является условие непроницаемости свободной поверхности, дна и берегов водоема. В рассматриваемом случае плановой задачи речь будет идти лишь об учете влияния непроницаемых берегов.

Непроницаемости для адвективного переноса отвечает равенство нулю компоненты осредненной скорости, нормальной к берегу.

Отсутствие турбулентного переноса вещества через стенку выражается равенством нулю производной концентрации этого вещества по нормали к стенке (к берегу):

$$\left(\frac{\partial c}{\partial y}\right)_{ij} = \left(\frac{\partial c}{\partial y}\right)_{\text{гран}} = 0. \quad (1.99)$$

Это равенство учитывает непроницаемость стенки.

Формула 1.100 соответствует условию зеркального отражения поля концентрации от граничной поверхности, что легко реализуется при выполнении вычислений. Если какая-либо грань расчетного элемента совпадает с непроницаемой поверхностью водоема (в частности, с береговой линией), то значение функции на этой грани равно нулю.

В общем виде граничное условие записывается так:

$$\varphi_{ij,\text{гран}}^k = 0. \quad (1.100)$$

Для каждого источника загрязнения рассчитывается поле концентраций за вычетом фоновых характеристик. Для расчета суммарного поля производится сложение индивидуальных полей источников загрязнений и поля с фоновой концентрацией.

2. РАСЧЕТ ПЕРЕНОСА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ ОТДЕЛЬНЫХ ВЫПУСКОВ ПО УПРОЩЕННЫМ МОДЕЛЯМ

В XX веке для упрощения решения дифференциальных уравнений массопереноса российскими учеными были обоснованы упрощённые методы. В первую очередь стоит выделить работы Караушева, Лапшева, Линейкина, Фельзембаума и многих других [15]. В настоящее время, несмотря на бурное развитие компьютерной техники, именно упрощенными моделями необходимо пользоваться при расчете нормативов допустимых сбросов.

Основной величиной необходимой для расчета нормативов допустимых сбросов является кратность разбавления, которая показывает, во сколько раз (без учета фоновой концентрации) разбавились сточные воды от места водовыпуска до контрольного створа.

Начальное разбавление происходит вследствие эжекции окружающей воды турбулентным струйным потоком, образующимся при истечении сточных вод из выпуска. В результате этого наблюдается значительное снижение начальных концентраций загрязнения, которое происходит до сечения, где разность скоростей струйного потока и окружающей фоновой среды становится незначительной.

Основное разбавление возникает при перемещении воды от места выпуска к расчетному створу.

Кратность общего разбавления рассчитывают по формуле:

$$n = n_n \cdot n_o, \quad (2.1)$$

где n_n – кратность начального разбавления;

n_o – кратность основного разбавления.

Гидрологический режим значительно отличается в водотоках, водоемах и морях, что привело к разработке отдельных методов расчета кратности общего разбавления в водотоках, водоемах и морях.

2.1. Расчет кратности разбавления при сбросе сточных вод в водотоки

Как было указано выше, для расчета кратности общего разбавления необходимо найти кратность начального разбавления и кратность основного разбавления.

2.1.1. Расчет начального разбавления методом Лапшева

В настоящее время в водотоках кратность начального разбавления рассчитывают методом Лапшева [16].

Данный метод применим при одновременном выполнении двух следующих условий:

а) для напорных сосредоточенных и рассеивающих выпусков в водоток при соотношении скоростей v_p (скорость потока реки) и выпуска $v_{ст}$ (скорость истечения сточных вод):

$$v_{ст} \geq 4 \cdot v_p \quad (2.2)$$

б) при абсолютных скоростях истечения струи из выпуска, большие 2 м/с.

Если любое из этих условий не выполняется, то кратность начального разбавления принимается равной единице.

Для единичного напорного выпуска кратность начального разбавления рассчитывается по следующей формуле:

$$n_H = \frac{0,248}{1-m} \tilde{d}^2 \left(\sqrt{m^2 + 8,1 \frac{(1-m)}{\tilde{d}^2}} - m \right), \quad (2.3)$$

где

$$m = \frac{v_p}{v_{ст}}. \quad (2.4)$$

Относительный диаметр \tilde{d} находится из соотношения $\tilde{d} = \frac{d}{d_0}$, в котором d – диаметр загрязненной струи; d_0 – диаметр оголовка.

Значение \tilde{d} вычисляется по следующей формуле:

$$\tilde{d} = \sqrt{\frac{8,1}{\frac{(1-m)\Delta v_m^2}{0,92} + \frac{2m\Delta v_m}{0,96}}}. \quad (2.5)$$

Величина Δv_m определяется по следующей формуле:

$$\Delta v_m = v_m - v_p, \quad (2.6)$$

где v_m – скорость на оси струи. Принимается $\Delta v_m \approx 0,10 \div 0,15$ м/с.

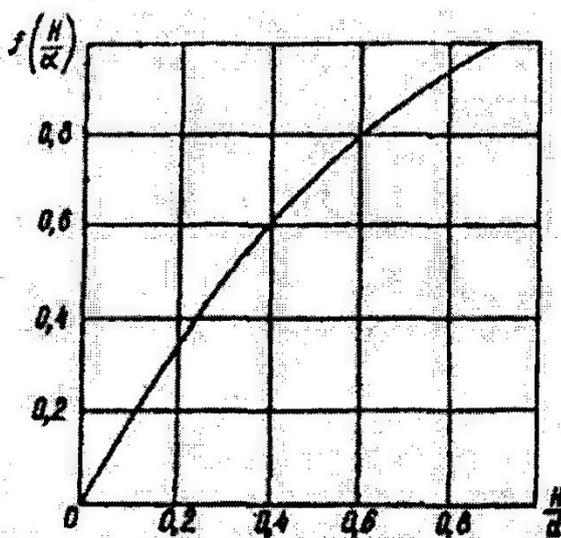


Рисунок 2. 1. – Номограмма для определения поправочного коэффициента

Для определения кратности начального разбавления определяется отношение $\frac{d}{d_0}$ и найденное значение d сравнивается с глубиной реки H . Если

$d < H$, то кратность начального разбавления n_H рассчитывают по формуле 2.3. Для случая стеснения струи ($d > H$) соответствующая ему кратность разбавления n_H находится умножением найденного значения n_H на поправочный коэффициент $f\left(\frac{H}{d}\right)$, который определяется из рисунка 2.1

Для рассеивающего напорного выпуска расчет осуществляется с учетом числа выпускных отверстий оголовка выпуска N_0 и скорости истечения сточных вод из них $v_{ст} \geq 2,0$ м/с, диаметр отверстия или оголовка рассеивающего выпуска определяется по следующей формуле:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot q}{\pi \cdot v_{ст} \cdot N_0}}, \quad (2.7)$$

где q – суммарный расход сточных вод, м³/с.

Расстояние до пограничного сечения зоны начального разбавления определяется по формуле:

$$l_H = \frac{d}{0,48 \cdot (1 - 3,12 \cdot m)}. \quad (2.8)$$

Расход смеси сточных вод и воды водотока в том же сечении находится по формуле:

$$Q_H = n_H \cdot q, \quad (2.9)$$

где q – расход сточных вод на выходе из отверстий или оголовков рассеивающего выпуска, м³/с.

Средняя концентрация вещества в граничном сечении определяется по формуле:

$$C_{ср} = C_{\phi} + \frac{C_{ст} - C_{\phi}}{n_H}, \quad (2.10)$$

где $C_{ст}$ – концентрация загрязняющего вещества в сточных водах, г/м³.

Максимальная концентрация в центре пятна примеси в этом сечении равна:

$$C_{макс} = \frac{C_{ст}}{0,428}. \quad (2.11)$$

2.1.2. Расчет кратности основного разбавления в водотоках методом Фролова-Родзиллера

Кратность основного разбавления методом Фролова-Родзиллера может быть рассчитана при следующих соотношениях расходов сточных вод и воды в реке:

$$0,0025 \leq \frac{q}{Q} \leq 0,1. \quad (2.12)$$

Кратность основного разбавления n_0 определяется по формуле:

$$n_0 = \frac{q + \gamma \cdot Q}{q}, \quad (2.13)$$

где Q – расчетный расход водотока, м³/с;

γ – коэффициент смешения, показывающий какая часть речного расхода

смешивается со сточными водами в максимально загрязненной струе расчетного створа, определяемый по следующей формуле:

$$\gamma = \frac{1 - e^{-\alpha \sqrt[3]{l}}}{1 + \frac{Q}{q} \cdot e^{-\alpha \sqrt[3]{l}}}, \quad (2.14)$$

где l – расстояние от выпуска до расчетного створа по фарватеру, м;
 α – коэффициент, учитывающий гидравлические условия в реке, определяемый по формуле:

$$\alpha = \varphi \cdot \xi \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{q}}, \quad (2.15)$$

где φ – коэффициент извилистости (отношение расстояния до контрольного створа по фарватеру к расстоянию по прямой);

ξ – коэффициент, зависящий от места выпуска сточных вод (при выпуске у берега $\xi = 1$, при выпуске в стрежень реки $\xi = 1,5$);

D – коэффициент турбулентной диффузии, м²/с.

Для летнего времени:

$$D = \frac{g \cdot \vartheta \cdot H}{37 \cdot n_{ш} \cdot C^2}, \quad (2.16)$$

где g – ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с²;

ϑ – средняя скорость течения реки, м/с;

H – средняя глубина реки, м;

$n_{ш}$ – коэффициент шероховатости ложа реки, определяемый по справочным данным;

C – коэффициент (м^{0,5}/с), определяемый по формуле (при $H \leq 5$ м):

$$C = \frac{R^y}{n_{ш}}, \quad (2.17)$$

где R – гидравлический радиус потока, м ($R \approx H$);

$$y = 2,5 \cdot \sqrt{n_{ш}} - 0,13 - 0,75 \cdot \sqrt{R} \cdot (\sqrt{n_{ш}} - 0,1). \quad (2.18)$$

Для зимнего времени (периода ледостава):

$$D = \frac{g \cdot R_{пр} \vartheta}{37 \cdot n_{пр} \cdot C_{пр}^2}, \quad (2.19)$$

где $R_{пр}$, $n_{пр}$, $C_{пр}$ – приведенные значения гидравлического радиуса, коэффициента шероховатости русла реки;

$$R_{пр} = 0,5 \cdot H; \quad (2.20)$$

$$n_{пр} = n_{ш} \cdot \left[1 + \left(\frac{n_{л}}{n_{ш}} \right)^{1,5} \right]^{0,67}, \quad (2.21)$$

где $n_{л}$ – коэффициент шероховатости нижней поверхности льда определяемые

по справочным данным;

$$C_{\text{пр}} = \frac{R_{\text{пр}}^{y_{\text{пр}}}}{n_{\text{пр}}}, \quad (2.22)$$

где

$$y_{\text{пр}} = 2,5 \cdot \sqrt{n_{\text{ш}}} - 0,13 - 0,75 \cdot \sqrt{R_{\text{пр}}} \cdot (\sqrt{n_{\text{пр}}} - 0,1). \quad (2.23)$$

Для повышения точности расчетов вместо средних значений v , H , $n_{\text{ш}}$ и C берут их значения в зоне непосредственного смешения сточной жидкости с речной водой.

Если также производится расчет начального разбавления по методу Лапшева, то расчетные формулы имеют следующий вид

$$\gamma = \frac{1 - \beta}{(1 + \beta Q_p / Q_n)}; \quad (2.24)$$

$$n_0 = \frac{Q_n + \gamma(Q_p - Q_n + Q_{\text{ст}})}{Q_{\text{ст}}}; \quad (2.25)$$

$$\beta = \exp(-\alpha \sqrt[3]{L}), \quad (2.26)$$

где Q_n – расход смеси сточных вод и воды водного объекта в пограничном сечении зоны начального разбавления.

Если не соблюдаются условия применимости метода (2.13), то сразу рассчитывается кратность общего разбавления по формуле:

$$n = \frac{(C_{\text{ст}} - C_{\text{ф}})}{(C_{\text{макс}}^{\text{кк}} - C_{\text{ф}})}, \quad (2.27)$$

где $C_{\text{ст}}$ – концентрация загрязняющего вещества в сточных водах, г/м³;

$C_{\text{макс}}^{\text{кк}}$ – максимальная концентрация загрязняющего вещества в поперечном сечении водотока, находящемся на контрольном расстоянии от створа выпуска сточных вод вниз по течению, г/м³;

$C_{\text{ф}}$ – фоновая концентрация вещества в водотоке, г/м³.

2.1.3. Расчет основного разбавления экспресс-методом ГГИ

Экспресс-метод ГГИ применяют, если численные методы решений вызывают затруднения. Данный метод разработан М. А. Бесценной [17].

В качестве характеристики концентрации загрязняющего вещества в заданном сечении принимается величина χ (показатель разбавления) и определяется по формуле (2.28).

$$\chi = \left(\frac{C_{\text{макс}}}{C_{\text{ст}}} - \frac{C_n}{C_{\text{ст}}} \right), \quad (2.28)$$

где C_n – концентрация в створе достаточного перемешивания, г/м³.

Если рассматриваются приведенные концентрации загрязняющего вещества, то есть величины $C_{\text{макс.прив}} = C_{\text{макс}} - C_{\text{ф}}$; $C_{\text{ст.прив}} = C_{\text{ст}} - C_{\text{ф}}$; $C_{n.\text{прив}} = C_n - C_{\text{ф}}$, в указанном случае формула (2.28) преобразуется в формулу (2.29).

$$\chi = \frac{C_{\text{макс.прив}} - C_{n.\text{прив}}}{C_{\text{ст.прив}}}, \quad (2.29)$$

где $C_{\text{макс.прив}}$ – максимальная приведенная концентрация загрязняющего вещества в поперечном сечении реки, находящемся на контрольном расстоянии от створа выпуска сточных вод вниз по течению, г/м³;

$C_{n.\text{прив}}$ – приведенная концентрация в створе достаточного перемешивания, г/м³;

$C_{\text{ст.прив}}$ – приведенная концентрация загрязняющего вещества в сточных водах, г/м³.

Показатель разбавления α применяется как при неизменности расхода воды реки, так и в тех случаях, когда на рассматриваемом участке происходит изменение расхода вдоль потока. Аналитическая зависимость между интенсивностью снижения показателя разбавления χ вдоль потока и его гидравлическими характеристиками рассчитывается по следующей формуле:

$$\chi = \frac{0,14q\sqrt{\frac{N}{H}}}{\chi(q+Q)\varphi} B, \quad (2.30)$$

где x – расстояние, отсчитываемое вдоль потока от источника загрязнения до створа, на котором показатель разбавления принимает конкретное значение χ ;

N – характеристическое число, вычисляемое по следующей формуле:

$$N = \frac{Mc}{g}. \quad (2.31)$$

Формула (2.30) применяется при выборе контрольного створа предприятия для расчета расстояния от места выпуска сточных вод до створа наиболее полного (90 %) перемешивания речной и сточной воды (контрольный створ), а также для расчета расстояния до створов с заданными значениями максимальных концентраций.

Обратная кратность разбавления $\left(\frac{1}{n} = \frac{C_{\text{макс}}}{C_{\text{ст}}}\right)$ вычисляется по следующей формуле:

$$\frac{C_{\text{макс}}}{C_{\text{ст}}} = \frac{C_n}{C_{\text{ст}}} + \frac{0,14q\sqrt{\frac{N}{H}}}{\chi(q+Q)\varphi}, \quad (2.32)$$

где M – коэффициент, зависящий от C ;

g – ускорение силы тяжести, м/с².

Формула (2.30) применяется для определения максимальных концентраций на любых расстояниях x от места выпуска сточных вод.

При $10 < C < 60$ параметр $M = 0,7 \cdot C + 6$, при $C \geq 60$ параметр $M = 48 = \text{const}$.

Произведение $M \cdot C$ имеет размерность м/с².

C – коэффициент, характеризующий интенсивность турбулентного перемешивания в реках, м^{1/2}/с. При большем значении C турбулентное

перемешивание оказывается менее интенсивным, при меньшем значении C турбулентное перемешивание оказывается более интенсивным.

Коэффициент C вычисляется по следующей формуле:

$$C = \frac{\vartheta_p}{\sqrt{R * I}}, \quad (2.33)$$

где I – уклон поверхности

Параметр извилистости φ вычисляется по следующей формуле:

$$\varphi = \frac{l_{\text{фарв}}}{l_{\text{пр}}}, \quad (2.34)$$

где $l_{\text{фарв}}$ – длина участка, измеренная по фарватеру, м;

$l_{\text{пр}}$ – длина этого же участка, измеренная по прямой, м.

Безразмерная глубина \tilde{H} вычисляется по следующей формуле:

$$\tilde{H} = \frac{H}{B}, \quad (2.35)$$

где B – средняя ширина русла реки на рассматриваемом участке, м.

2.1.4. Расчет основного разбавления методом Таллинского политехнического института

Метод разработан Л. Л. Паалем и В. А. Сууркаском [18] и предназначен для вычисления максимальной концентрации загрязняющих неконсервативных веществ в заданном створе при различных положениях выпуска сточных вод. Используется аналитическое решение уравнения турбулентной диффузии применительно к простейшему случаю.

Данный метод применяется для небольших водотоков с коэффициентом извилистости меньше 1,5.

Расчет осуществляется по следующим формулам:

а) выпуск сточных вод находится на расстоянии b от берега:

$$C_{\text{макс}} = C_{\phi} + \frac{C_{\text{ст}} Q_{\text{ст}}}{H \sqrt{\pi \nu D_y^* x}} \frac{1}{\Phi(\xi_1 \sqrt{2}) - \Phi(\xi_2 \sqrt{2})} e^{k_{\text{н}} \frac{x}{\nu}}, \quad (2.36)$$

где $\Phi(\xi_1 \sqrt{2})$ и $\Phi(\xi_2 \sqrt{2})$ – интегралы вероятности (определяются в соответствии с приложением 1), верхние пределы интегрирования которых вычисляются по следующим формулам:

$$\xi_1 = \frac{-b \sqrt{\nu}}{2 \sqrt{D_y^* x}}; \quad (2.37)$$

$$\xi_2 = \frac{(b-B) \sqrt{\nu}}{2 \sqrt{D_y^* x}}. \quad (2.38)$$

б) выпуск находится у берега реки:

$$C_{\text{макс}} = C_{\phi} + \frac{C_{\text{ст}} Q_{\text{ст}}}{H \sqrt{\pi \nu D_y^* x}} \frac{1}{\Phi(\xi \sqrt{2})} e^{k_{\text{н}} \frac{x}{\nu}}, \quad (2.39)$$

где

$$\xi = \frac{B \sqrt{\nu}}{2 \sqrt{D_y^* x}}. \quad (2.40)$$

в) выпуск находится в середине речного потока:

$$C_{\text{макс}} = C_{\phi} + \frac{C_{\text{ст}} Q_{\text{ст}}}{2H \sqrt{\pi v D_y^* x}} \frac{1}{\Phi(\xi \sqrt{2})} e^{k_H \frac{x}{v}}, \quad (2.41)$$

где

$$\xi = \frac{B \sqrt{v}}{4 \sqrt{D_y^* x}}. \quad (2.42)$$

Интеграл вероятности является табличной величиной (Приложение 1).

Коэффициент поперечной дисперсии в условиях небольших рек (ширина до 50 – 60 м) определяется по следующей формуле:

$$D_y^* = \frac{R u_* \cdot 41,6}{\sqrt{Re}}, \quad (2.43)$$

где R – гидравлический радиус;

u_* – динамическая скорость потока, определяемая по следующей формуле:

$$u_* = \sqrt{g R I} = \frac{v \sqrt{g}}{c}; \quad (2.44)$$

Re – число Рейнольдса, определяемое по следующей формуле:

$$Re = \frac{R v}{\nu}, \quad (2.45)$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости потока. Для рек с большой шириной ($B > 100$ м) коэффициент поперечной дисперсии вычисляется по следующей формуле:

$$D_y^* = \frac{H_{\text{ср}} v_{\text{ср}}}{3524} \left(\frac{B}{H} \right)^{1.378}. \quad (2.46)$$

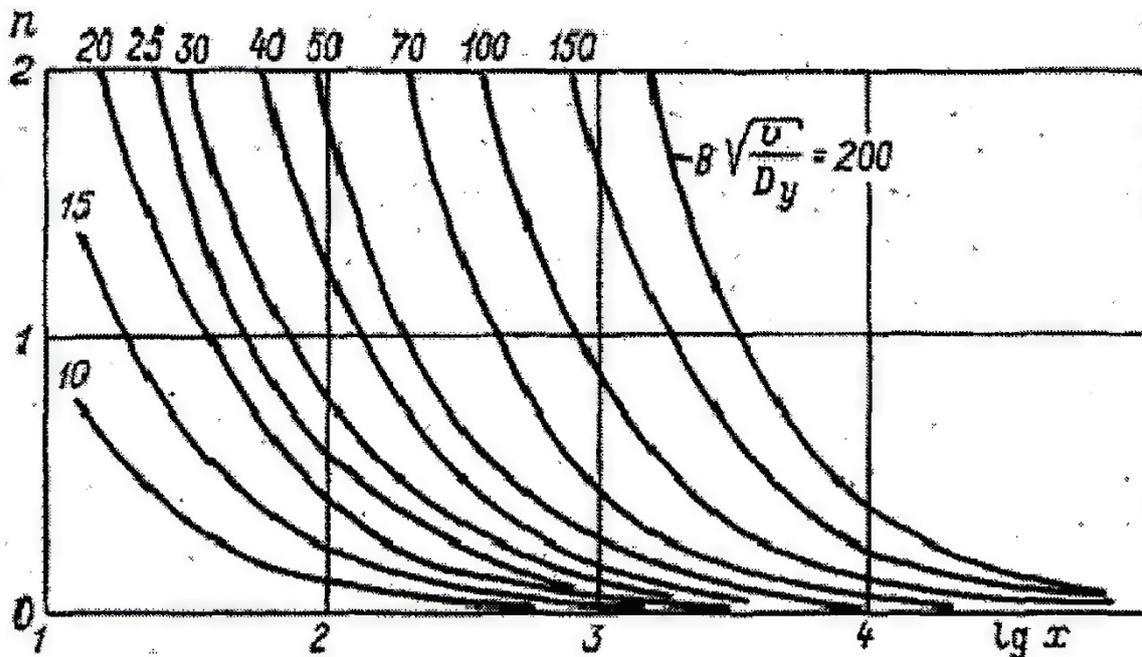


Рисунок 2.2 – Номограмма для определения максимальной концентрации загрязняющего вещества при выпуске сточных вод в середине потока

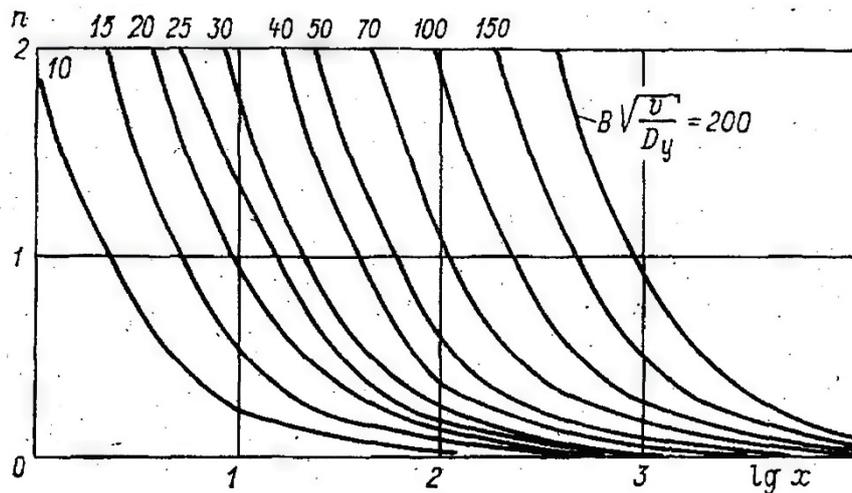


Рисунок 2.3 – Номограмма для определения максимальной концентрации загрязняющего вещества, если выпуск сточных вод находится на берегу реки

2.1.5. Расчет основного разбавления детальным методом расчета турбулентной диффузии

Основа метода – общее дифференциальное уравнение турбулентной диффузии. При расчете по методу 3 дифференциалы ds , dx , dy и так далее заменяются конечными приращениями Δs , Δx , Δy и так далее. Метод разработан А. В. Карашевым [19].

При условии пространственной задачи при малых поперечных скоростях течения и стационарного во времени процесса применяется следующая формула:

$$\frac{\Delta_x C}{\Delta x} = \frac{D_{\text{ср}}}{v_{\text{ср}}} \left(\frac{\Delta_y^2 C}{\Delta y^2} + \frac{\Delta_z^2 C}{\Delta z^2} \right). \quad (2.47)$$

Расчетная область потока делится плоскостями, параллельными координатным, на расчетные клетки – элементы (параллелепипеды со сторонами Δs , Δx , Δy).

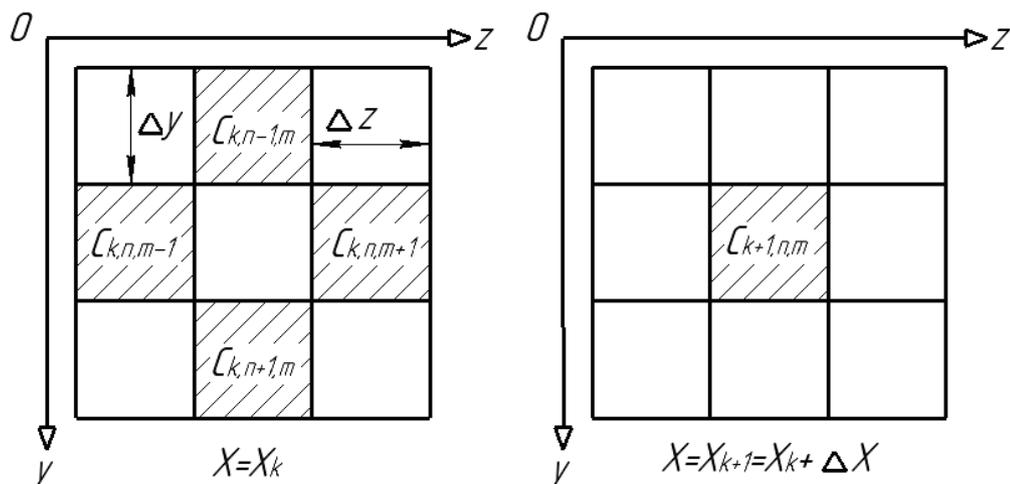


Рисунок 2.4 – Сетка к расчету турбулентной диффузии. Пространственная задача

Рисунок 2.4 показывает деление в плоскости yOz . Каждому элементу присваивается свой индекс по соответствующим осям координат: по оси $x - k$, по оси $y - n$, по оси $z - m$.

Если $\Delta y = \Delta z$, то для расчета применяется следующая формула:

$$C_{k+1,n,m} = \frac{1}{4} (C_{k,n+1,m} + C_{k,n-1,m} + C_{k,n,m+1}). \quad (2.48)$$

При обязательном выполнении соотношения между продольным и поперечным размерами расчетных элементов используется следующая формула:

$$\Delta x = \frac{v_{\text{ср}} \Delta z^2}{4D}. \quad (2.49)$$

Для условий плоской задачи используется следующая формула:

$$C_{k+1,m} = \frac{1}{2} (C_{k,m-1} + C_{k,m+1}). \quad (2.50)$$

при этом значения Δx и Δz связаны формулой:

$$\Delta x = \frac{v_{\text{ср}} \Delta z^2}{2D}. \quad (2.51)$$

Коэффициент D определяется по следующей формуле:

$$D = \frac{v_{\text{ср}} g H}{M C}, \quad (2.52)$$

где H – средняя глубина на рассматриваемом участке, м;

M – коэффициент, зависящий от C ;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

При $10 < C < 60$ параметр $M = 0,7 \cdot C + 6$, при $C \geq 60$ параметр $M = 48 = \text{const}$. Произведение $M \cdot C$ имеет размерность м/с^2 .

Когда раствор загрязняющего вещества достигает граничных поверхностей потока, для расчета диффузии используется соотношение, учитывающее особое условие у стенок.

Это условие определяется по следующей формуле:

$$\left(\frac{ds}{dz}\right)_0 = \left(\frac{ds}{dy}\right)_0 = 0, \quad (2.53)$$

которая в конечных разностях используется в виде формулы:

$$\left(\frac{ds}{dz}\right)_{\text{гр.пов}} = \left(\frac{ds}{dy}\right)_{\text{гр.пов}} = 0. \quad (2.54)$$

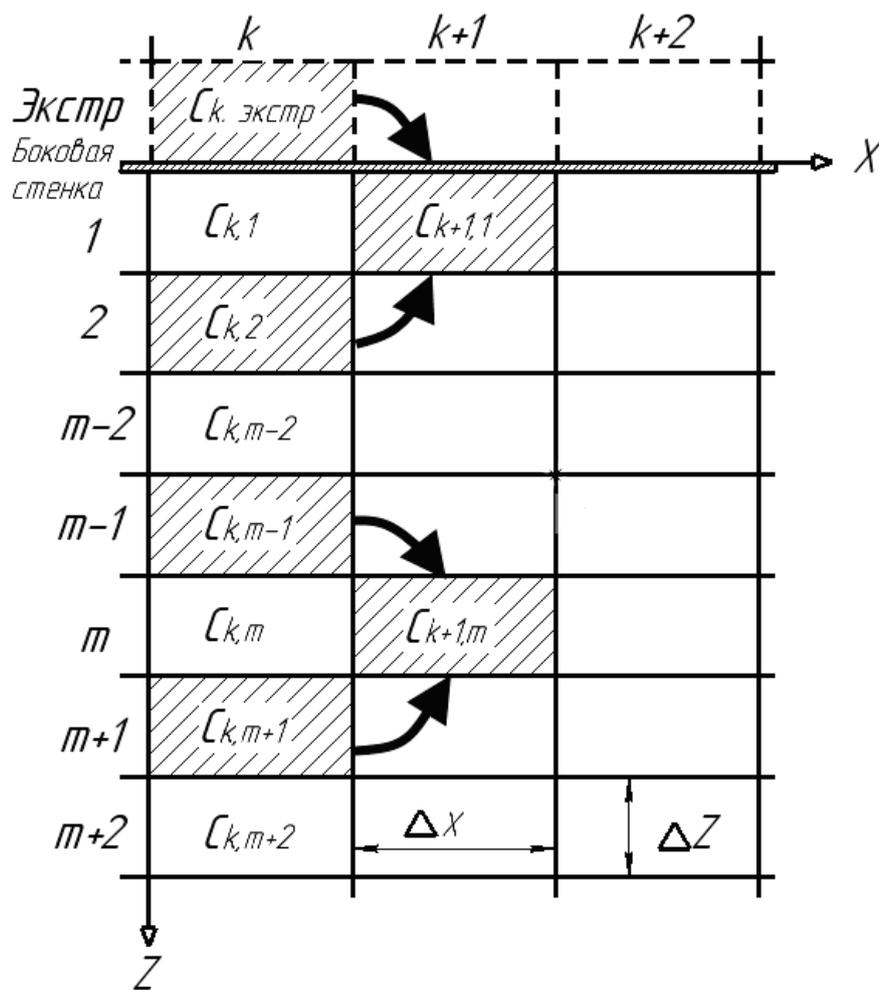


Рисунок 2.5 – Сетка к расчету турбулентной диффузии. Плоская задача

Поле концентрации и расчетную сетку условно распространяют за пределы потока экстраполяцией концентрации за ограничивающие поток поверхности. При этом экстраполяционное значение концентрации $C_{\text{экстр}}$ в клетке, примыкающей к внешней поверхности стенки, и значение концентрации C_i в клетке, находящейся в потоке и примыкающей к внутренней поверхности стенки на том же поперечнике, должны удовлетворять описанному выше условию, что возможно только в случае, если $C_{\text{экстр}} = C_i$. Указанное соотношение определяет правило экстраполяции концентрации раствора.

При расчете диффузии экстраполяционные значения концентрации используются как действительные.

Начальные условия учитываются при задании места выпуска сточных вод, его расхода и концентрации вещества (начальной концентрации $C_{\text{ст}}$).

На плане реки (или водоема) обозначается место поступления сточных вод, через которое проводят начальный поперечник. Ниже по течению речной поток схематизируется и делится на расчетные клетки.

Скорость сточных вод $u_{\text{ст}}$, сбрасываемых в водный объект, в месте их поступления принимается равной скорости течения реки $u_{\text{ср}}$. Условная площадь

поперечного сечения притока δ в месте его впадения вычисляется по следующей формуле:

$$\delta = \frac{q}{v_{cp}}. \quad (2.55)$$

Если решается плоская задача и при этом выполняется расчет распределения концентрации в плане потока, то следующим этапом является определение ширины загрязненной струи потока b в начальном створе по следующей формуле:

$$b = \frac{\delta}{H_{cp}} = \frac{q}{v_{cp}H_{cp}}. \quad (2.56)$$

В соответствии с величиной b назначается ширина расчетной клетки Δz . Наибольшая допустимая величина Δz при впадении сточных вод у берега находится по следующей формуле:

$$\Delta z = b = \frac{q}{v_{cp}H_{cp}}. \quad (2.57)$$

При выпуске сточных вод на некотором расстоянии от берега или на середине потока используется следующая формула:

$$\Delta z = \frac{b}{2} = \frac{q}{2v_{cp}H_{cp}}. \quad (2.58)$$

Если получаемые значения Δz очень велики ($\Delta z > \frac{1}{10}B$), то их уменьшают, чтобы выполнялось неравенство ($\Delta z \leq \frac{1}{10}B$). При расчете турбулентной диффузии рассматриваемую часть потока делят на клетки со сторонами Δx , Δz , получая расчетную сетку. Клетки, попадающие в струю притока сточных вод в начальном поперечнике, заполняются числами, выражающими начальную концентрацию, то есть концентрацию загрязняющего вещества в сточных водах $C_{ст}$, остальные клетки – числами, выражающими концентрацию загрязняющего вещества в водотоке.

Если расчет осуществляется для приведенных значений концентрации, то соответственно на начальном створе клетки, попадающие в струю сточных вод, заполняются значениями приведенной концентрации, а остальные нулями. Далее расчет ведется по схеме, изложенной на рисунке 2.5.

При расчете по схеме, изложенной на рисунке 2.4, площадь поперечного сечения загрязненной струи на начальном створе определяется по следующей формуле:

$$\delta = \frac{q}{v_{cp}}. \quad (2.59)$$

Площадь одной расчетной клетки, находящейся в поперечном сечении потока $\Delta\omega = \Delta y \Delta z$, вычисляется из соотношения $n_{заг} \Delta\omega = \delta$, где $n_{заг}$ – число клеток, занятых загрязненными водами; соотношение должно удовлетворять неравенству $n_{заг} \geq 4$.

Если размеры клеток получаются очень малыми, то расчет с принятым делением потока на элементы ведется до определенного створа, в котором загрязняющее вещество окажется распределенным в 20-50 клетках. После этого клетки в сечении объединяют по 2-4 (плоская задача) или по 4-9 (пространственная задача), получая новые средние значения концентрации в

клетках и новые линейные размеры. Новые значения концентрации получаются как среднее арифметическое из суммы концентраций в объединяемых клетках, новые значения Δy и Δz – как Δy и Δz , увеличенные соответственно в 2-3 раза (пространственная задача), или Δz , увеличенные в 2-4 раза (плоская задача). Величина ΔX после укрупнения клеток рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta X = \Delta x \mu^2, \quad (2.60)$$

где μ – число, показывающее, во сколько раз увеличено значение Δx , после объединения клеток.

При расчетах, выполняемых последовательно от поперечника к поперечнику, получается поле концентрации на участке ниже сброса сточных вод. Данное поле представляется в виде изолиний концентраций. Изолиния концентрации загрязняющего вещества, отвечающая значению норматива качества этого вещества, является границей зоны загрязнения. Расчет позволит определить указанную зону и вычислить ее параметры.

Метод 3 применяется для расчетов разбавления как при сосредоточенных, так и при рассеивающих выпусках сточных вод. В случае рассеивающих выпусков расчет на участке от створа выпуска до створа слияния загрязненных струй ведется для одной струи. Начиная от створа слияния струй, вычисления производят для зоны, расположенной между двумя соседними выпусками и ограниченной осями двух соседних струй, и отдельно для струи, примыкающей к берегу.

В случае необходимости учета поперечных течений и неравномерности распределения глубин при расчете диффузии детальным методом применяются формулы (2.61 – 2.65).

При преобразовании основного уравнения турбулентной диффузии для получения практических схем расчета используется условие о приближенном равенстве нулю поперечных составляющих скорости v_y и v_x и для пространственной задачи, взятой при известных ограничениях, используется следующая формула:

$$\frac{ds}{dx} = \frac{D}{v_x} \left(\frac{d^2c}{dy^2} + \frac{d^2c}{dz^2} \right), \quad (2.61)$$

решение которой выполняется методом сеток (методом конечных разностей). При использовании указанного метода учитывается внутренняя циркуляция (то есть величины v_y и v_z).

В случае, когда v_x значительно больше, чем v_y и v_z , вводится новая криволинейная ось X , направленная по траектории движения жидких частиц и определяемая относительно прежней системы координат по следующей формуле:

$$\frac{dx}{v_x(x, y, z)} = \frac{y}{v_y(x, y, z)} = \frac{dz}{v_z(x, y, z)}. \quad (2.62)$$

С целью расчета, поперечный профиль потока разбивается на элементы (или клетки) $\Delta\omega = \Delta y \Delta z$. Отметив каждую клетку соответствующим индексом, можно проследить движение каждой клетки от избранного профиля вниз по

течению. Когда поперечные составляющие (в первоначальной прямоугольной системе координат) скорости v_y и v_z равняются нулю, все траектории клеток параллельны и каждый элемент $\Delta\omega$ не меняет своего относительного расположения при переходе от профиля к профилю. Все поверхностные клетки остаются на поверхности, донные – у дна и так далее. При наличии поперечной циркуляции каждый элемент, кроме движения вниз по течению, совершает еще некоторое перемещение в поперечном направлении. Данное перемещение определяется поперечной составляющей скорости и вызывает изменение в относительном расположении клеток: поверхностные клетки переместятся в направлении правого берега, некоторые из них опустятся вниз и займут место нескольких донных клеток; донные клетки переместятся влево и частично выйдут на поверхность. В связи с этим клетки различных слоев, соприкасающиеся друг с другом на профиле k , на профиле $(k + 1)$ будут удалены одна от другой и будут соприкасаться уже с другими клетками.

Метод сеток в обычном виде применяется при условии выделения в потоке на достаточно коротком участке некоторой области близких друг к другу траекторий с целью нахождения для этой области средней траектории, которая приближенно принимается в качестве прямой. Пограничные условия для каждой из таких областей заключаются в том, что диффузия через ограничивающие их поверхности равна взятому со знаком минус произведению коэффициента турбулентной диффузии на производную от концентрации по нормали к этим поверхностям, то есть условия на поверхностях раздела ничем не отличаются от условий на любой произвольно взятой поверхности внутри потока.

В данном случае расстояние между расчетными профилями измеряется не по оси x , а по траектории X . Вследствие обычной малости поперечных составляющих скорости без особой погрешности ведется отсчет по прямолинейной оси x . Учет внутренней циркуляции осуществляется путем перемещения каждой клетки по ее собственной траектории.

При выполнении расчета для короткого участка потока с прямоугольным сечением русла используется следующий расчет: в потоке имеется внутреннее течение, являющееся следствием закругления русла, в поверхностном слое это течение направлено от левого берега к правому, в придонном слое – в противоположную сторону. На рассматриваемом участке поперечная составляющая скорости некоторого горизонтального слоя остается постоянной по длине потока и мало меняется по ширине. Используется только два слоя по глубине и равенство средних абсолютных значений поперечных составляющих скорости для каждого из них: поверхностного v_z и донного ($-v_z$). Восходящие ($-v_y$) и нисходящие течения (v_y) принимаются приуроченными к береговым областям. Траектории клеток поверхностного слоя для средней части потока вычисляются по следующей формуле:

$$\frac{dx}{v_x} = \frac{dz}{v_z}. \quad (2.63)$$

Траектория клеток донного слоя – по следующей формуле:

$$\frac{dx}{v_x} = -\frac{dz}{v_z}. \quad (2.64)$$

В формулах (2.63) и (2.64) функции $v(x,y,z)$ заменены средними значениями соответствующих составляющих. Полученные траектории клеток поверхностного слоя $x_{\text{пбв}}$ и донного слоя $x_{\text{дон}}$ изображены на рисунке 2.6.

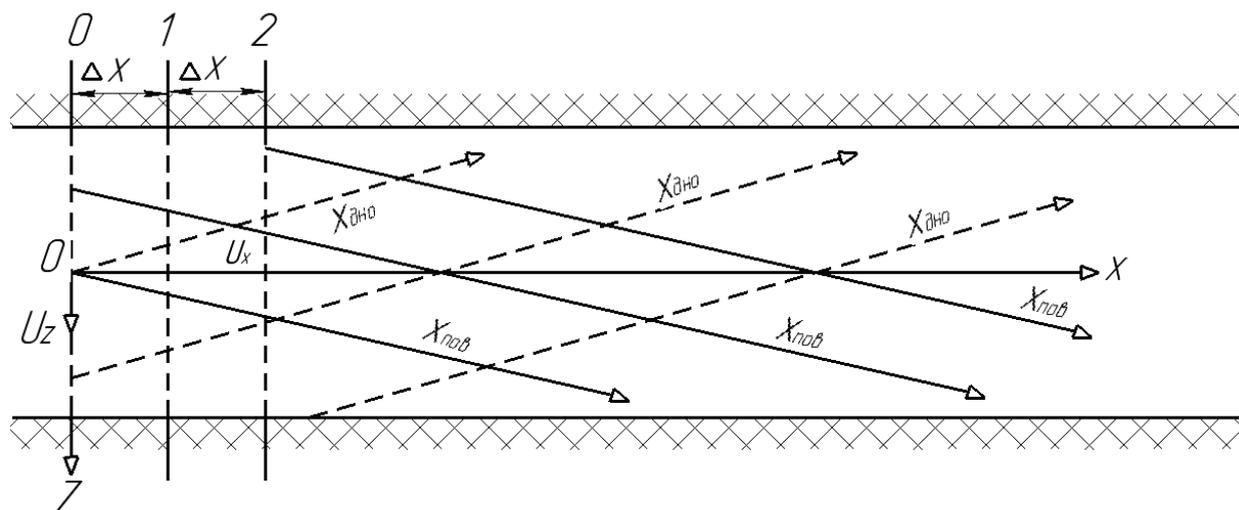


Рисунок 2.6 – Расположение координатных осей в поверхностном и придонном слоях потока

Расчет диффузии с учетом поперечной циркуляции сводится к вычислениям по следующей формуле:

$$C_{k+1,n,m} = \frac{1}{4}(C_{k,n+1,m} + C_{k,n-1,m} + C_{k,n,m+1} + C_{k,n,m-1}) \quad (2.65)$$

и последующему смещению клеток по их траекториям. Расчет диффузии и смещение клеток чередуются.

2.2. Расчет кратности разбавления при сбросе сточных вод в водоемы

При наличии в водоеме устойчивых ветровых течений для расчета кратности общего разбавления n рассматриваются два случая:

а) выпуск в мелководную часть или в верхнюю треть глубины водоема – загрязненная струя распространяется вдоль берега под воздействием прямого поверхностного течения, имеющего одинаковое с ветром направление;

б) выпуск в нижнюю треть глубины водоема – загрязненная струя распространяется к береговой полосе против выпуска под воздействием донного компенсационного течения, имеющего направление, обратное направлению ветра, при этом должны соблюдаться следующие условия: зона смешения не превышает 10 м, расстояние от выпуска до контрольного створа вдоль берега в первом случае не превышает 20 км, расстояние от выхода сточных вод до берега против выпускного оголовка во втором случае не превышает 0,5 км.

2.2.1. Расчет кратности начального разбавления

Кратность начального разбавления при наличии в водоеме устойчивых ветровых течений вычисляется по следующим формулам:

а) при выпуске в мелководье или в верхнюю треть глубины:

$$n_H = \frac{q + 0,00215 \cdot \vartheta \cdot H_{cp}^2}{q + 0,000215 \cdot \vartheta \cdot H_{cp}^2}, \quad (2.66)$$

где q – расход сточных вод выпуска, м³/с;

ϑ – скорость ветра над водой в месте выпуска сточных вод, м/с;

H_{cp} – средняя глубина водоема вблизи выпуска, м. Значение H_{cp} определяется в зависимости от средней глубины водоема H_0 следующим образом: при $H_0 = (3 \div 4)$ м на участке протяженностью 100 м; при $H_0 = (5 \div 6)$ м на участке протяженностью 150 м; при $H_0 = (7 \div 8)$ м на участке протяженностью 200 м; при $H_0 = (9 \div 10)$ м на участке протяженностью 250 м;

б) при выпуске в нижнюю треть глубины:

$$n_H = \frac{q + 0,00158 \cdot \vartheta \cdot H_{cp}^2}{q + 0,000079 \cdot \vartheta \cdot H_{cp}^2}. \quad (2.67)$$

2.2.2. Расчет кратности основного разбавления

Кратность основного разбавления вычисляется по следующим формулам:

а) при выпуске в мелководье или в верхнюю треть глубины:

$$n_0 = 1 + 0,412 \left(\frac{l}{\Delta x} \right)^{0,627 + \frac{0,0002 \cdot l}{\Delta x}}, \quad (2.68)$$

где: l – расстояние от места выпуска до контрольного створа, м;

$$\Delta x = 6,53 \cdot H_{cp}^{1,17}. \quad (2.69)$$

б) при выпуске в нижнюю треть глубины:

$$n_0 = 1,85 + 2,32 \left(\frac{l}{\Delta x} \right)^{0,41 + \frac{0,0064 \cdot l}{\Delta x}}; \quad (2.70)$$

$$\Delta x = 4,41 \cdot H_{cp}^{1,17}. \quad (2.71)$$

При наличии в водоеме устойчивых течений расчет кратности основного разбавления проводится с использованием аналитического решения уравнения турбулентной диффузии для сосредоточенного выпуска сточных вод:

$$n_0 = \frac{\varphi(z_1)}{\gamma_0 \cdot z_2}; \quad (2.72)$$

$$z_1 = \frac{l+x_0}{x^*+x_0} ; \quad (2.73)$$

$$(2.74)$$

$$\varphi(z_1) = \begin{cases} z_1, & \text{если } z_1 \leq 1 \\ \sqrt{z_1}, & \text{если } z_1 > 1 \end{cases} \quad (2.75)$$

$$x^* = \frac{u_m \cdot H_{\text{ср}}^2}{4 \cdot \pi \cdot D} - x_0 ; \quad (2.76)$$

$$x_0 = \begin{cases} \frac{q^2 \cdot n_H^2}{4 \cdot \pi \cdot D \cdot u_m \cdot H_{\text{ср}}^2} - l_n, & \text{если } z_1 \leq 1 \\ \frac{q \cdot n_H}{4 \cdot \pi \cdot D}, & \text{если } z_1 > 1 \end{cases} \quad (2.77)$$

$$\gamma_0 = 1 + e^{\frac{u_m \cdot b^2}{D \cdot (l+x_0)}} , \quad (2.78)$$

где x^* – параметр сопряжения участка двумерной диффузии с участком трехмерной диффузии, м;

x_0 – параметр сопряжения начального участка разбавления с основным участком;

γ_0 – параметр, учитывающий влияние ближайшего берега на кратность основного разбавления;

u_m – характерная минимальная скорость течения в водоеме в месте сброса, м/с;

l_0 – расстояние выпуска от ближайшего берега, м;

l_n – длина начального участка разбавления, рассчитываемая по формуле (2.8), м;

D – коэффициент турбулентной диффузии, м²/с, определяемый по формулам (2.16) и (2.19), в которых вместо средней скорости течения, глубины и коэффициента шероховатости ложа реки принимаются, соответственно, характерная минимальная скорость течения в водоеме u_m , средняя глубина водоема вблизи выпуска $H_{\text{ср}}$ и коэффициент шероховатости ложа водоема в зоне течения.

2.3. Расчет кратности разбавления при сбросе сточных вод в моря

2.3.1. Расчет кратности начального разбавления

Расчет значения кратности начального разбавления производится независимо от типа выпуска (сосредоточенный или рассеивающий).

Учитывая, что на процесс перемешивания сточных вод в этой зоне существенное влияние оказывают силы плавучести, если плотность сточных вод существенно отличается от плотности морской воды, применяют разные методы расчета кратности начального разбавления в зависимости от величины, определяемой по формуле:

$$Fr = \frac{v_{ст}}{\sqrt{\frac{g \cdot d_0}{\rho_M} |\rho_M - \rho_{ст}|}} \quad (2.79)$$

где d_0 – диаметр выпускного отверстия, м;

g – ускорение силы тяжести, равное $9,81 \text{ м/с}^2$;

ρ_M – плотность морской воды в месте сброса сточных вод, т/м^3 ;

$\rho_{ст}$ – плотность сточной воды, т/м^3 ;

$v_{ст}$ – скорость истечения сточной воды из выпускного отверстия, м/с , вычисляемая по расходу сточных вод:

$$v_{ст} = \frac{4 \cdot q}{N_0 \cdot \pi \cdot d_0^2} \quad (2.80)$$

где q – расход сточных вод, $\text{м}^3/\text{с}$;

N_0 – число выпускных отверстий оголовка выпуска.

Если сточная вода легче морской ($\rho_{ст} < \rho_M$) и расчетная величина Fr удовлетворяет условию:

$$Fr \leq 1,12 \frac{H_B}{d_0} \quad (2.81)$$

где H_B – расстояние (по вертикали) от выпуска до поверхности моря, м, то кратность начального разбавления определяется по формуле:

$$n_H = 0,54 \cdot Fr \cdot \left(\frac{0,38 \cdot H_B}{d_0 + Fr} + 0,66 \right)^{1,67} \quad (2.82)$$

Если сточная вода тяжелее морской ($\rho_{ст} > \rho_M$) и расчетная величина Fr удовлетворяет условию:

$$Fr \leq \frac{0,434 \cdot H_B}{d_0 \cdot (\sin \varphi)^{1,5}} \quad (2.83)$$

где φ – угол истечения струй сточных вод из выпускного отверстия относительно горизонта;

то расчет кратности начального разбавления выполняется по следующей формуле:

$$n_H = 0,524 \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{\sin \varphi} \cdot Fr \cdot F \quad (2.84)$$

где F – параметр, зависящий от угла φ и определяемый по таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значение функции F при различных углах наклона φ оголовка выпуска

φ	F	φ	F	φ	F
5°	1,00	35°	1,17	65°	2,01
10°	1,01	40°	1,23	70°	2,42
15°	1,03	45°	1,31	75°	3,12
20°	1,05	50°	1,42	80°	4,55
25°	1,08	55°	1,55	85°	8,91
30°	1,12	60°	1,74		

Если сточная вода легче морской, но не выполняется условие формулы (2.81), или сточная вода тяжелее морской, но не выполняется условие формулы (2.83), или плотность сточной воды равна плотности морской воды в месте сброса, то расчет кратности начального разбавления выполняется по следующей формуле:

$$n_H = \frac{0,425 \cdot \vartheta_{CT} \cdot f}{0,051 + \vartheta_M}, \quad (2.85)$$

где ϑ_M – характерная минимальная скорость течения морских вод в месте сброса, м/с;

f – параметр, учитывающий стеснение струи сточных вод при их сбросе на мелководье, для определения которого вычисляется диаметр струи сточных вод d в конце зоны начального разбавления по формуле:

$$d = \vartheta_{CT} \cdot d_0 \cdot \sqrt{\frac{38,6 \cdot (1 - \frac{\vartheta_M}{\vartheta_{CT}})}{0,051 + \vartheta_M}}. \quad (2.86)$$

Если значение d не превышает глубины моря в месте сброса H , то $f = 1$, в противном случае:

$$f = 1,825 \frac{H}{d} - 0,781 \frac{H^2}{d^2} - 0,0038. \quad (2.87)$$

В случае если расчетная кратность начального разбавления n_H меньше 1, то для дальнейших вычислений принимают $n_H = 1$.

2.3.2. Расчет кратности основного разбавления

Расчет кратности основного разбавления производится с использованием аналитического решения уравнения турбулентной диффузии для сосредоточенного выпуска сточных вод в море по следующим формулам:

$$n_0 = \frac{\varphi(Z_1)}{\gamma_0 \cdot Z_2}, \quad (2.88)$$

$$Z_1 = \frac{l + x_2}{x^* + x_0}, \quad (2.89)$$

$$Z_2 = \frac{q \cdot n_H \sqrt{D_B}}{U_M \cdot H_{CP} \sqrt{D_T}}, \quad (2.90)$$

$$\varphi(Z_1) = \begin{cases} Z_1, & \text{если } Z_1 \leq 1 \\ \sqrt{Z_1}, & \text{если } Z_1 > 1 \end{cases} ; \quad (2.91)$$

$$x^* = \frac{U_M \cdot H_{\text{ср}}^2}{4 \cdot \pi \cdot D_B} - x_0; \quad (2.92)$$

$$x_0 = \begin{cases} \frac{q^2 \cdot n_H^2}{4 \cdot \pi \cdot D_T \cdot U_M \cdot H_{\text{ср}}^2} - l_H, & \text{если } Z_2 \leq 1 \\ \frac{q \cdot n_H}{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{D_T D_B}}, & \text{если } Z_2 > 1 \end{cases} ; \quad (2.93)$$

$$\gamma_0 = \left[1 + \exp\left(-\frac{U_M \cdot l_0^2}{D_T(l + X_0)}\right) \right], \quad (2.94)$$

где l – расстояние от выпуска до ближайшей границы района водопользования (контрольного створа), м;

U_M – характерная минимальная скорость морского течения в месте сброса, м/с;

x^* – параметр сопряжения участка двумерной диффузии с участком трехмерной диффузии, м;

$D_{\text{вг}}$ и D_T – соответственно коэффициенты вертикальной и горизонтальной турбулентной диффузии, м²/с;

$H_{\text{ср}}$ – средняя глубина моря в месте выпуска, м;

l_H – длина начального участка разбавления, м;

γ_0 – параметр, учитывающий влияние ближайшего берега на кратность основного разбавления;

l_0 – расстояние выпуска от берега, м.

В расчетах кратности основного разбавления при отсутствии данных о коэффициентах диффузии для конкретного района расположения выпуска используют значение коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии D_G , определяемое по формуле:

$$D_T = 0,032 + 21,8 \cdot U_M^2. \quad (2.95)$$

Значение коэффициента вертикальной турбулентной диффузии принимают равным $D_B = 5 \cdot 10^{-4}$, м².

Кратность основного разбавления при сбросе сточных вод через линейный рассеивающий выпуск в море при направлении течения перпендикулярно к оси оголовка выпуска определяется по формуле:

$$n_0 = \frac{7,28}{l_B} \sqrt{\frac{D_T \cdot l}{U_M}}, \quad (2.96)$$

где l_B – длина рассеивающего оголовка выпуска, м.

Если значение n_0 , полученное из формулы (2.96), меньше 2, кратность основного разбавления при рассеивающем выпуске сточных вод для определения НДС не учитывают, $n_0 = 1$.

3. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПОВЕДЕНИЕ ПОТОКОВ В АТМОСФЕРЕ

Вопросы охраны атмосферного воздуха от загрязнения промышленными выбросами являются одними из важнейших задач современности. Эти вопросы неразрывно связаны с прогнозированием переноса загрязняющих веществ в атмосфере.

Применение методов математического моделирования позволяет оценить распространение примесей при расчете нормативов допустимого выброса действующих и проектируемых предприятий, разработке проектов санитарно-защитных зон, прогнозировании зон заражения при аварийных выбросах и других работах, связанных с выбросами и переносом загрязняющих веществ.

3.1. Поведение потока, выбрасываемого в атмосферу

Перенос загрязнений в атмосфере обуславливается двумя составляющими атмосферного движения: полем среднего ветра, переносящего загрязнение от одной точки к другой, и турбулентными движениями, которые рассеивают загрязнения относительно некоторого центра.

Планетарный пограничный слой – часть атмосферы, располагающаяся между поверхностью земли и свободной атмосферой, где движения в основном не подвержены влиянию приземного трения, охлаждения и нагревания поверхности земли. На рисунке 3.1 показана область атмосферных движений в планетарном пограничном слое и дана примерная оценка их высот. В первых 50 – 150 м над поверхностью земли мы имеем дело с приземным пограничным слоем, где движение ветра существенно зависит от шероховатости земной поверхности и вертикального градиента температуры, который в свою очередь зависит от температуры подстилающей поверхности.

В слое выше 100 м до высоты 500 – 1000 м наблюдается переходный слой. Воздушные течения в переходном слое зависят от воздействия приземного трения, градиентов плотности или температуры вращения земли. Выше планетарного пограничного слоя в свободной атмосфере ветер параллелен градиенту давления с учетом влияния вращения земли; однако верхняя граница этого слоя может изменяться. Например, в случае, когда холодный воздух проходит над теплой поверхностью, в очень теплый весенний день при сильном солнечном сиянии конвективные потоки от поверхности земли могут подниматься до высоты 3000 м. Следует добавить, что конвективная деятельность внутри грозы может нарушить понятие планетарного пограничного слоя. Большинство моделей рассеяния в атмосфере, которые используются в настоящее время, не учитывают таких интенсивных движений, и мы ограничим наше обсуждение условиями более нормального пограничного слоя.

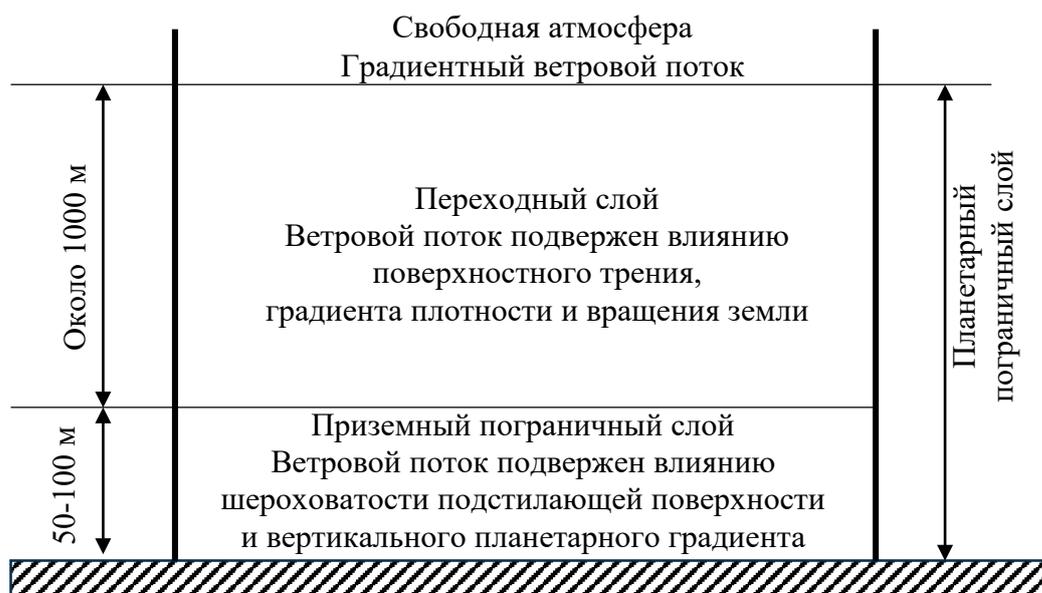


Рисунок 3.1 – Область атмосферных движений над поверхностью земли

В общем случае выделяют следующие факторы, влияющие на движение воздушных масс в атмосфере, которые будут рассмотрены подробнее ниже:

- поверхностное трение;
- температура подстилающей поверхности;
- ветер и локальные ветровые потоки;
- турбулентность.

3.1.1. Поверхностное трение

Главное воздействие поверхностного трения – его влияние на профиль ветра, т. е. на изменение скорости и направления ветра с высотой над поверхностью земли.

Если рассматривать ламинарный поток газа между двумя параллельными пластинами, то напряжение сдвига на единицу площади будет пропорционально градиенту скорости. Это соотношение дополняется введением коэффициента пропорциональности, характеризующего динамическую вязкость.

В пределах слоя воздуха вблизи земли эффект вязкости преобладает. С удалением от поверхности земли напряжение сдвига становится частично турбулентным, частично вязким и, наконец, достаточно далеко от земли напряжение сдвига определяется главным образом турбулентными движениями.

С увеличением скорости ветра над некоторой данной поверхностью или при заметном увеличении шероховатости подстилающей поверхности и постоянной скорости ветра может наступить такое состояние, когда эффект воздействия сил давления, связанный с вихреобразованием, возникающим от элементов шероховатости, станет преобладать над чисто вязкостным напряжением. Поток в таком случае становится аэродинамическим шероховатым и вязкость больше не влияет на профиль.

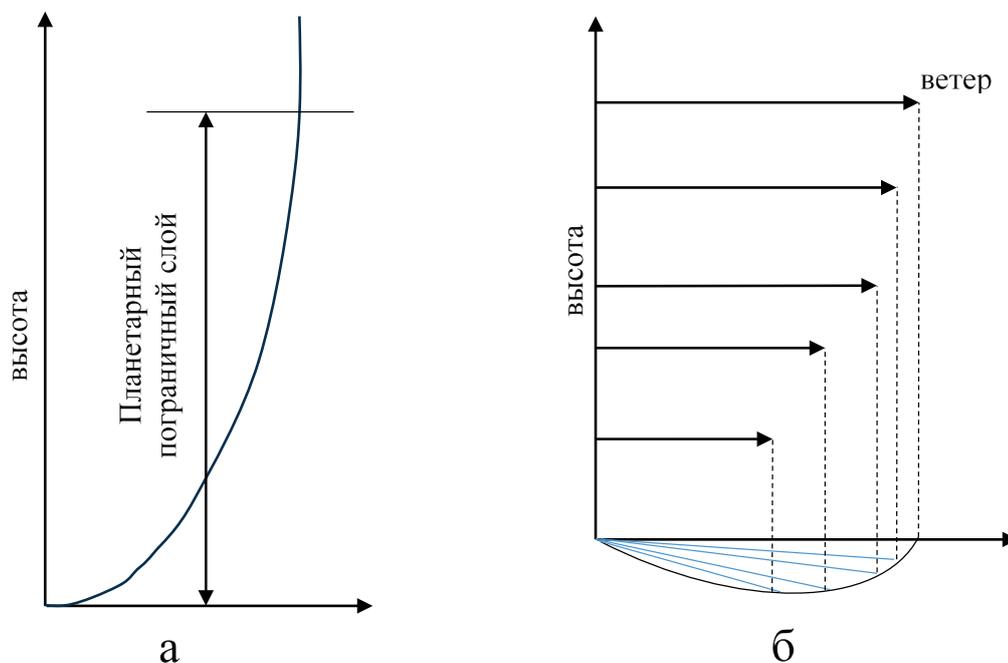


Рисунок 3.2 – Изменение скорости и направления ветра с высотой

На рис. 3.2а представлен профиль скорости ветра, который показывает изменения скорости ветра с высотой. Другой аспект влияния трения на нижние слои атмосферы представлен на рисунке 3.2б, который иллюстрирует так называемую спираль Экмана. Спираль Экмана впервые была обнаружена при изучении потоков в океане и затем теоретически применена к атмосфере. Она демонстрирует влияние трения и на направление, и на скорость ветра. Градиентный ветер на верхней границе пограничного слоя постепенно с понижением высоты подвергается воздействию приземного трения, вызывающему в северном полушарии поворот направления ветра. Теоретически спираль Экмана дает примерно разницу в 45° между направлением ветра у поверхности и ветром на верхней границе пограничного слоя; однако наблюдения показывают, что изменение направления часто оказывается меньше 6° и обычно не превосходит 30° . Следовательно, спираль Экмана теоретически важна, но на практике имеет существенно меньшее значение.

3.1.2. Температура

Если температура окружающего воздуха понижается с высотой, нагретые струи воздуха поднимаются вверх (конвекция), а взамен них опускаются холодные. Такие условия называются конвективными.

Если вертикальный градиент температуры будет отрицательным (температура возрастает с высотой), то вертикально поднимающийся поток становится холоднее окружающих масс и его движение затухает. Такие условия называются устойчивыми инверсионными.

Инверсия температуры (инверсионная стратификация) – повышение температуры воздуха с высотой. Если повышение температуры начинается непосредственно от поверхности земли, инверсию называют приземной

(радиационная инверсия), если же с некоторой высоты над поверхностью земли – приподнятой (инверсия осаднения).

Инверсии затрудняют вертикальный воздухообмен и рассеивание примесей в атмосфере.

Инверсии температуры в нижней тропосфере возникают в результате следующих явлений:

- охлаждение земной поверхности вследствие радиационного излучения;
- охлаждение приземного слоя за счет затрат тепла на испарении воды или таяние снега;
- сток холодного воздуха в пониженные части рельефа;
- на побережье морей в теплое время года при морских бризах.

Градиент температуры и устойчивость атмосферы

Любая масса газа при перемещении в атмосфере вверх расширяется, а при перемещении вниз – сжимается в соответствии с распределением давления в атмосфере по вертикали. Если градиент температуры по вертикали равен $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ на каждые 100 м, эти изменения объема протекают адиабатно, т.е. без подвода и отвода тепла. При различных метеоусловиях градиент температуры может быть, как больше, так и меньше адиабатного значения. При возникновении температурной инверсии он приобретает противоположный знак.

Возможность теплового перемешивания можно определить, сравнив реальный температурный градиент в окружающей среде с адиабатическим вертикальным градиентом температуры. Несколько возможных температурных градиентов в окружающей среде в сопоставлении с адиабатическим градиентом температуры представлены на рисунке 3.3.

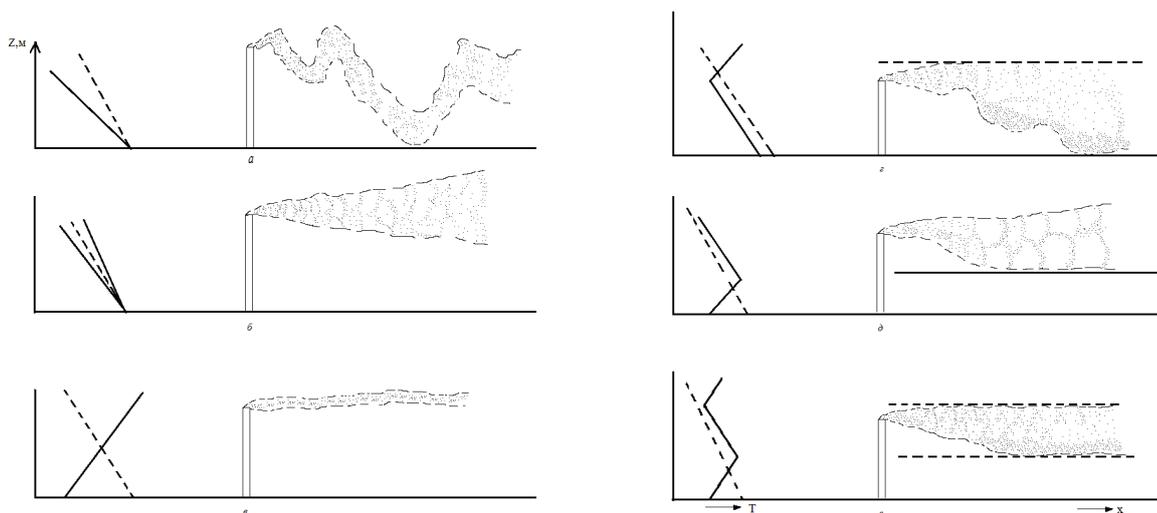


Рисунок 3. – Температурный профиль и форма струи дыма в плоскости XZ:
 Пунктирная линия – адиабатический вертикальный градиент температуры;
 Сплошная линия – градиент температуры в окружающем воздухе
 (фактический)

а – волнообразная струя, сильная неустойчивость

Сверхадиабатный вертикальный температурный градиент. Сильная конвективная турбулентность. Неустойчивое состояние атмосферы. Возникают клубы дыма, загрязнения интенсивно рассеиваются в больших объемах. На отдельных участках приземного слоя могут оказаться высокие концентрации. Картина характерна для ясных дней при нагревании земной поверхности солнцем, при слабых ветрах.

б – конусообразная струя, устойчивость близка к безразличной;

Малые температурные градиенты. Доминирует мелкомасштабная механическая турбулентность. Атмосферное состояние устойчиво и условия рассеивания загрязняющих веществ менее благоприятны. Дымовой факел имеет форму конуса (половина угла раствора струи составляет $\approx 10^\circ$). Большая часть примесей переносится далеко в направлении ветра, прежде чем в значительной концентрации достигнет уровня земли.

Картина характерна для облачных дней и ночей при умеренных ветрах. Облачность препятствует притоку солнечной радиации днем и оттоку ее от поверхности земли ночью.

в – веерообразная струя, поверхностная инверсия, сильная устойчивость

Большой отрицательный градиент температуры. Толстый инверсионный слой. Слабая механическая турбулентность. Струя приобретает веерообразную форму и распространяется горизонтально. Сечение струи приближается к эллиптическому, загрязнения удаляются на большие расстояния. Земной поверхности достигают низкие концентрации примесей.

Картина характерна для безветренных ясных ночей, когда земля охлаждается, излучая тепло.

г – задымляющая струя, приподнятая инверсия выше горловины трубы

Инверсионный слой расположен выше устья трубы. Он является преградой для рассеивания выбросов. Образуется задымляющая струя, и выбросы газа направляются на землю. Концентрация загрязнений в приземном слое может в десятки раз превышать расчетную.

Картина характерна для раннего утра после ночи с устойчивой инверсией: утреннее солнце нагревает землю, развивается отрицательный температурный градиент в направлении от поверхности земли. При достижении отрицательным градиентом высоты трубы большие объемы выброса, сформированные в виде веерообразной струи, переносятся к поверхности земли вдоль направления ветра.

д – приподнятая струя, инверсия ниже горловины трубы

Инверсия заканчивается ниже устья дымовой трубы. Инверсионный слой служит естественной преградой, предотвращающей опускание загрязненной струи на землю. ЗВ рассеиваются в направлении ветра и заметных приземных концентраций не образуется.

Картина характерна для послеполуденного времени или раннего вечера

при ясном небе. В течение солнечного дня развивается отрицательный температурный градиент в нижнем слое атмосферы. Излучаемое поверхностью земли тепло в позднее послеполуденное время приводит к образованию инверсии вблизи поверхности. При развитии инверсии приподнятая струя переходит в веерообразную.

е – ограниченная струя, инверсии ниже и выше горловины трубы

При размещении инверсии как выше, так и ниже верхней точки трубы, образуются условия для ограниченной струи. Рассеяние примесей в этом случае происходит только в слое между двумя устойчивыми областями атмосферы.

Если при ослаблении ветра до штиля наблюдается инверсия, то может образоваться «потолок», препятствующий подъему выбросов. Концентрация примесей у земли резко возрастает. Поэтому для состояния атмосферы в городах большую опасность представляет приземная инверсия температуры в сочетании со слабыми ветрами, т.е. ситуация «застоя воздуха».

3.1.3. Ветер

Ветер может оказывать различное влияние на процесс рассеивания примесей в зависимости от типа источника и характеристики выбросов. Если отходящие газы перегреты относительно окружающего воздуха, то они обладают начальной высотой подъема. В связи с этим вблизи источника создается поле вертикальных скоростей, способствующих подъему факела и уносу примесей вверх. При слабых ветрах этот подъем обуславливает уменьшение концентраций примесей у земли. Концентрация примесей у земли убывает и при очень сильных ветрах, однако это происходит за счет быстрого переноса примесей в горизонтальном направлении. В результате наибольшие концентрации примесей в приземном слое формируются при некоторой скорости, которую называют «опасная».

При низких или холодных источниках выбросов повышенный уровень загрязнения воздуха наблюдается при слабых ветрах ($\omega = 0 \div 1$ м/с) вследствие скопления примесей в приземном слое. Следовательно, при исследовании загрязнения воздуха в городе следует учитывать как повторяемость малых скоростей ветра, так и повторяемость «опасной» скорости ветра.

Прямое влияние на загрязнение воздуха в городе оказывает направление ветра. Существенное увеличение концентрации примеси наблюдается тогда, когда преобладают ветры со стороны промышленных объектов.

Локальные ветровые потоки

Существуют определенные локальные эффекты, которые влияют как на траектории, так и на турбулентность поля ветра. Один из таких локальных потоков, который может оказать влияние на траекторию вещества (примеси), – долинный поток. На рисунке 3.4 представлена схема искривления долиной ветрового потока при топографических препятствиях, одним из которых является долина наравнинной территории, а другим – долина, проходящая через горный хребет. Легко видеть, что загрязнения, попадающие в зону действия этих потоков, будут переноситься различным образом, даже если они

первоначально попадают в области одинаковых ветровых потоков. Далее можно видеть, что примесь, попавшая в долину, накапливается внутри долины. В условиях слабого градиентного ветра наверху неравномерный нагрев долины может вызвать ветры, дующие по долине вниз ночью и вверх днем, а в редких случаях загрязнение внутри долины может накапливаться.

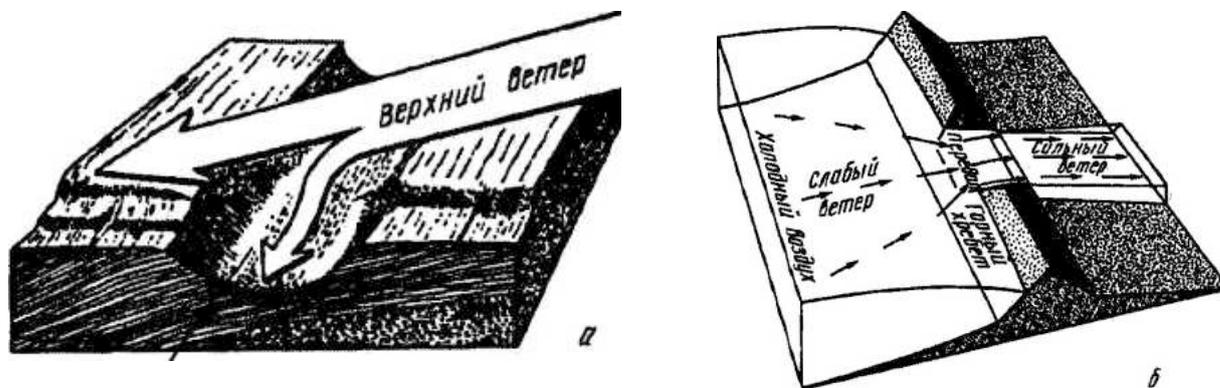


Рисунок 3.4 – Схема искривления долиной ветрового потока при топографических препятствиях

Второй тип возмущения локального ветрового потока – морской бриз, который возникает вследствие разницы температур между сушей и водной поверхностью. Примесь, перемешивающаяся внутри бризовой циркуляции, будет возвращаться и увеличивать загрязнение; кроме того, вероятно, что в действительности бризовая циркуляция не так проста. Воздушный поток, непрерывно движущийся параллельно поверхности земли, увеличивает диффузию в результате взаимодействия между воздухом, который дует над поверхностью воды, и воздухом, который подвергается воздействию поверхности суши. Это вызывает увеличение перемешивания в некоторой данной неподвижной точке и, следовательно, приводит к высоким приземным концентрациям.

Третий важный фактор, влияющий на атмосферное загрязнение, – влияние города. Кроме того, город часто действует как остров тепла, т.е. как область, имеющая более высокую поверхностную температуру, чем окружающая местность. Это справедливо и летом, и зимой: летом вследствие поглощения солнечной радиации, а зимой вследствие генерации тепла внутри зданий и в результате разного рода деятельности людей, проживающих в городе. Это способствует возникновению восходящего движения воздуха у поверхности земли; следовательно, возникают перенос загрязнений внутрь города, слабое восходящее движение воздуха в центре и нисходящее движение загрязнений на окраине города. Это движение в верхней части общего потока может способствовать появлению более высоких концентраций на уровне земли, чем можно было ожидать вблизи города в другом случае.

3.1.4. Турбулентность

Турбулентность – характеристика атмосферного движения, которая

ответственна за рассеяние примеси, попавшей в воздушный поток. Механическая турбулентность вызывается элементами шероховатости подстилающей поверхности — будь то короткая трава, которая дает очень маленький эффект, или строения, которые очень заметно влияют на турбулентность.

Основными причинами турбулизации воздушных течений в атмосфере являются возникающие по тем или иным причинам контрасты в полях температуры и скорости ветра. К атмосферным процессам, формирующим эти контрасты, относятся:

а) трение воздушного потока о поверхность земли и образование в нижней его части профиля скорости ветра с большими вертикальными градиентами;

б) неодинаковое нагревание различных участков подстилающей поверхности земли и связанное с этим развитие термической конвекции;

в) процессы облакообразования, при которых происходит выделение тепла конденсации и кристаллизации и изменение характера поля температуры и скорости ветра;

г) сближение и взаимодействие масс воздуха с различными характеристиками вблизи атмосферных фронтов и высотных фронтальных зон, где велики горизонтальные контрасты температуры и скорости ветра;

д) потеря устойчивости волнами, образующимися в инверсионных слоях, на тропопаузе и вблизи других атмосферных поверхностей раздела;

е) деформация воздушных течений горными препятствиями и возникновение волновых возмущений и роторных движений на подветренной их стороне.

Указанные процессы могут действовать одновременно, усиливая или ослабляя друг друга, а тем самым и турбулизацию воздушного потока.

Вязкость воздуха обуславливает непрерывное преобразование кинетической энергии турбулентных воздушных потоков в тепло. Очевидно, что если отсутствует внешний источник энергии, необходимый для непрерывного возбуждения турбулентного движения, то это движение рано или поздно вырождается.

Помимо перечисленных факторов на выброс в процессе подъема шлейфа, переноса и диффузии могут также оказывать воздействие такие процессы, как (рис. 3.5):

1) химическая трансформация примесей;

2) радиоактивный распад и накопление дочерних продуктов;

3) влажное осаждение:

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

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

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

4) сухое осаждение:

- седиментация аэрозолей или гравитационное осаждение (для частиц с диаметром более 10 мкм);
 - отложение аэрозолей и адсорбция паров и газов на предметах, находящихся на пути ветра;
- 5) образование и слипание аэрозолей.

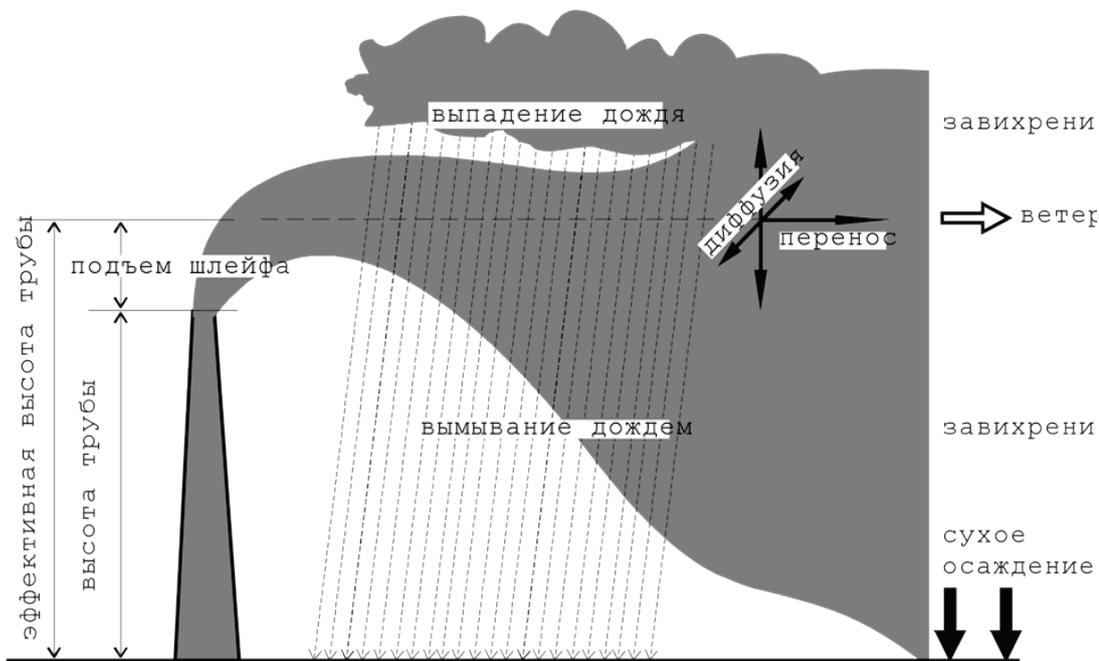


Рисунок 3.5 – Поведение загрязняющих веществ, выброшенных в атмосферу

Большую часть этих эффектов можно описать математически и при необходимости включить в математические модели.

3.2. Характеристики источников выбросов

При расчетах распространения загрязняющих веществ в атмосфере различные источники классифицируют по их пространственной конфигурации и продолжительности выброса.

По назначению:

- а) технологические, содержащие хвостовые газы после улавливания на установках продувки аппаратов, воздухозаборников и т. д.; для них характерны высокие концентрации вредных веществ и малые объемы удаляемого воздуха;
- б) вентиляционные – местные отсосы от оборудования и общеобменная вытяжка.

По месторасположению:

- а) незатененные (высокие) потоки; к ним относят высокие трубы и точечные источники, удаляющие загрязнение на высоту, превышающую высоту здания в 2,5 раза;
- б) затененные (низкие), расположенные на высоте в 2,5 раза меньше высоты здания;
- в) наземные, находящиеся вблизи земной поверхности; к ним относятся,

открыто расположенное технологическое оборудование, колодцы производственной канализации, промывные токсичные вещества, разбросанные отходы производства.

По геометрической форме:

- а) точечные – трубы, шахты, аэрационные фонари и т. д.;
- б) линейные – близко расположенные вытяжные шкафы и факелы;
- в) площадные – промплощадки, города, поля с внесенными ядохимикатами.

По режиму работы:

- а) непрерывного или периодического действия;
- б) залповые и мгновенные; в случае залповых выбросов за короткий промежуток времени в атмосферу поступают объёмы выбросов с большой концентрацией загрязняющих веществ; залповые выбросы производятся при авариях, при сжигании быстрогорящих отходов на площадках утилизации.

При мгновенных выбросах загрязняющие вещества выделяются за доли секунд и иногда на достаточно высокие расстояния. Они происходят при взрывных работах и аварийных ситуациях.

В зависимости от высоты и устья источника выброса вредного вещества над уровнем земной поверхности указанный источник относится к одному из следующих четырех классов:

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

3.3. Методы оценки дисперсии

Оценка концентраций загрязняющих веществ для рассматриваемого района для выбросов как длительных, так и коротких периодов времени включает в себя:

- выбор соответствующей модели с учетом неровности рельефа местности и высоты выброса для данной площадки и ситуации;
- определение классов устойчивости (турбулентности) для конкретных условий с помощью соответствующих измеренных или визуально полученных параметров;
- определение скорости ветра на нужном уровне (измерения на уровне выброса или путем расчета с использованием логарифмических соотношений или соотношений функции мощности, в зависимости от измерений на других уровнях);
- определение эффективной высоты выброса с помощью выражений для подъема шлейфа;
- определение коэффициентов турбулентности на заданном расстоянии из графиков или формул в соответствии с моделью;
- расчет концентраций и коэффициентов дисперсии по соответствующим формулам.

В некоторых случаях для оценки дисперсии можно использовать упрощенные методы. Может оказаться возможным использовать уравнения, основанные на предположении о гомогенности характеристик атмосферной дисперсии в данном районе.

Существует множество теоретических формул для расчета атмосферной дисперсии. Наиболее общее выражение для концентрации при наличии постоянного точечного источника мощностью Q без помех от земной поверхности при средней скорости ветра U , измеряемой на уровне шлейфа, получаем из предположения двойного распределения в уравнении Гаусса:

$$\bar{\chi}(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zU} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)\right], \quad (3.1)$$

где $\bar{\chi}$ – средняя концентрация выброса в точке (x, y, z) ,

Q – мощность источника,

U – скорость ветра, усредненная по слою перемешивания.

Для уравнения (3.1) начало координат находится в источнике. Ось x совпадает со средним направлением ветра. Ось y расположена перпендикулярно направлению ветра по горизонтали, а ось z – по вертикали. Параметры σ_y и σ_z представляют собой стандартные отклонения распределений концентраций в точке x соответственно в горизонтальном и вертикальном направлениях, перпендикулярно направлению ветра. Полная система координат приведена на рисунке 3.6, мы будем придерживаться ее и в дальнейшем.

Уравнение (3.1) предполагает шлейф с осью в виде прямой линии в направлении ветра и не учитывает пространственно-временные изменения направления ветра. Его можно также использовать и для отличной от прямой линии траектории шлейфа при условии, что ее кривизна не слишком велика.

Параметры σ_y и σ_z в уравнении (3.1) увеличиваются с расстоянием x .

Скорость их увеличения с расстоянием зависит от интенсивности турбулентности и тем самым от стабильности атмосферы. Для практического использования зависимости для σ_y и σ_z расстояния были определены на основании экспериментальных данных в различных полевых условиях.

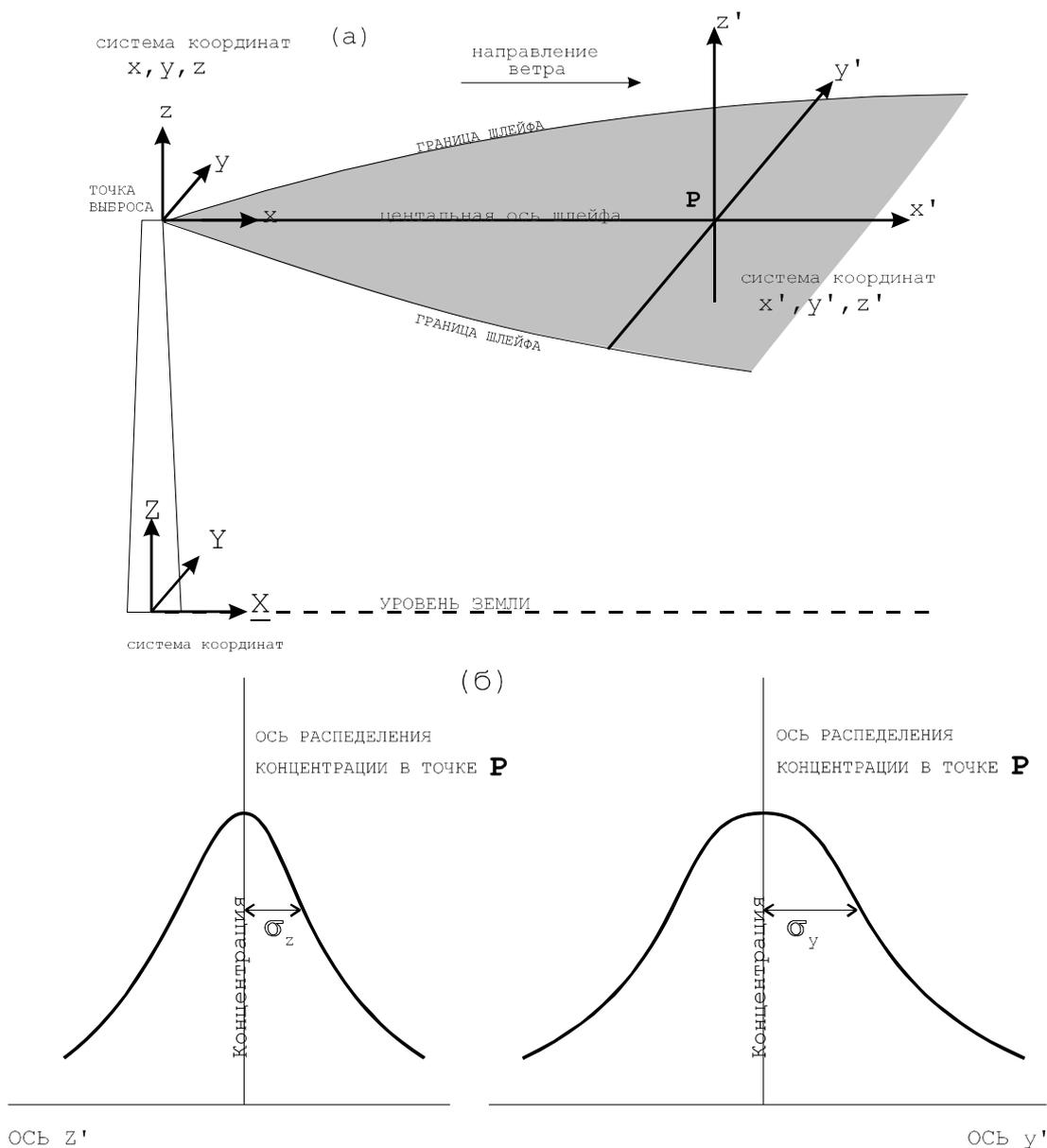


Рисунок 3.6 – Схематическое изображение:
 а – системы координат; б – параметры дисперсии шлейфа z и y

Важно иметь в виду, что выражение Гаусса – всего лишь приближение. На практике можно встретить отклонения от этого приближения, особенно в вертикальном направлении (z) при сильном порывистом ветре и на больших расстояниях. Тем не менее, оно является удобной предпосылкой для использования в основном уравнении (3.1).

3.4. Перечень основных моделей, используемых для оценки загрязнения атмосферы

Количество и характер моделей определяются, с одной стороны, кругом задач, стоящих перед экологическими службами, а с другой – требованиями к точности моделирования. Разнообразие требований к характеру оценок загрязнения и высокая специфичность распространения выбросов примесей в

различных метеоусловиях приводят к необходимости использования тех моделей, которые перечислены ниже [21, 22].

1. Штатные модели служб ГО. Стандартная методика основана на эмпирических моделях и позволяет определить максимально возможную зону поражения при выбросах ядовитых веществ. Модель не указывает реальное положение облака выбросов в тот или иной момент времени, а обозначает границы, в пределах которых концентрация ядовитых веществ может достичь опасных для здоровья человека значений при неблагоприятных метеоусловиях. Модель проста и быстро работает.

2. Стандартные модели загрязнения атмосферы стационарными источниками, основанные на модели ОНД-86. Модели могут быть использованы для анализа квазистационарных процессов, когда характерные времена выбросов токсичных веществ превышают характерные времена перемещения воздушных масс в экспертируемой области пространства (например, случаи пожаров или утечек на продуктопроводах). Модель эмпирическая и позволяет рассчитывать максимально возможное распределение концентрации выбросов на расстоянии 2 м от поверхности земли в условиях умеренно неустойчивого состояния атмосферы и усредненные по 20 минутному интервалу, но не учитывает такие факторы, как класс устойчивости атмосферы и шероховатость подстилающей поверхности.

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

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

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

6. Наиболее полные и совершенные нестационарные модели распространения загрязняющих веществ в атмосфере, в которые включены

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

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

8. Специальные модели для районирования территорий по вероятности аварий и по степени угрозы промышленным объектам и населению, которые строят на основе среднестатистических моделей с использованием информации о розе ветров данной местности. Существенным моментом при построении моделей этого класса является необходимость учета реакции объекта, подвергающегося воздействию облака выбросов. Характер реакции объекта зависит от его свойств, типа и концентрации токсичного вещества и продолжительности его воздействия. Объектом может быть и человек, и промышленное предприятие. Модели для оценки загрязнения территории или объектов строятся на основе моделей 1–8. Выбор модели определяется характером необходимой оценки. Комплекс синоптико-статистических моделей и автоматизированного прогнозирования неблагоприятных метеорологических условий (НМУ), предназначенный для оценки и прогнозирования уровней загрязнения атмосферного воздуха, а также принятия решения по атмосфероохранной деятельности как в краткосрочном, так и в долгосрочном аспектах. Для получения методик с высоким качеством прогнозирования необходимы исследования по диагностике погодных процессов синоптического масштаба, приводящих к реализации НМУ и классификация синоптических процессов, созданная на основе этих исследований. Разработка расчетных моделей базируется на многомерном статистическом аппарате. Построение прогностических зависимостей основано на теории решения некорректных задач, что позволяет получать устойчивые решения при наличии коррелированности параметров, описывающих синоптическую ситуацию. Прогностическая система включает в себя прием и обработку метеорологической информации из каналов связи, контроль и корректировку данных, архивирование и собственно прогноз.

4. МЕТОДЫ РАСЧЕТА РАССЕЙВАНИЯ ОТ ВЫБРОСОВ ОДИНОЧНОГО ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА

4.1. Расчет максимальных разовых концентраций

Положения, приведенные в данном разделе используются при расчетах рассеивания выбросов от дымовых труб, вентиляционных шахт, а также от источников организованного выброса загрязняющих атмосферный воздух веществ из установленных отверстий (далее – от точечных источников выброса) при условии, что скорость w_0 выхода газовой смеси (ГВС) из устья источника выброса не превосходит скорости звука в атмосферном воздухе, а температура T_T ГВС не превышает 3000 °С.

Максимальная приземная разовая концентрация ЗВ C_M , мг/м³, при выбросе ГВС из одиночного точечного источника с круглым устьем достигается при опасной скорости ветра u_M на расстоянии x_M от источника выброса и определяется по формуле (4.1):

$$C_M = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T}}, \quad (4.1)$$

где A – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы, определяющий условия горизонтального и вертикального рассеивания ЗВ в атмосферном воздухе;

M – масса ЗВ, выбрасываемого в атмосферный воздух в единицу времени (мощность выброса), г/с;

F – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания ЗВ (газообразных и аэрозолей, включая твердые частицы) в атмосферном воздухе;

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

η – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности;

H – высота источника выброса, м;

V_1 – расход ГВС, определяемый по формуле (4.2), м³/с;

ΔT – разность между температурой, выбрасываемой ГВС T_T и температурой атмосферного воздуха T_B , °С.

$$V_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot w_0, \quad (4.2)$$

где D – диаметр устья источника выброса, м;

w_0 – средняя скорость выхода ГВС из устья источника выброса, м/с.

Значения коэффициента A , соответствующего неблагоприятным метеорологическим условиям, при которых разовые концентрации ЗВ в атмосферном воздухе достигают максимальных значений, приведены в [22].

Мощности M выброса, высоты источников H , диаметры устьев D , температуры T_T и расходы V_1 ГВС при проектировании предприятий должны определяться расчетом в технологической части проекта (для проектируемых, вводимых в эксплуатацию построенных и реконструированных объектов), а для

действующих производств должны определяться по результатам инвентаризации стационарных источников выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух.

При расчете максимальных разовых концентраций принимаются сочетания при времени осреднения 20 – 30 мин значений M и V_1 , реально возможные в течение года при безаварийных условиях эксплуатации предприятия, при которых достигается максимальная концентрация C_m ЗВ.

Способ определения зависимости мощности выброса M от скорости ветра определяется методикой расчета выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух стационарными источниками выброса [23].

В случае, если в [22] отсутствует способ определения зависимости мощности выброса M от скорости ветра, мощность выброса задается постоянным значением.

При определении величины ΔT для предприятий, работающих по сезонному графику, допускается принимать значения расчетной температуры окружающего атмосферного воздуха T_v равными средним месячным температурам воздуха за самый холодный месяц по [24].

Значение безразмерного коэффициента при отсутствии данных о распределении на выбросе частиц аэрозолей по размерам определяется следующим образом:

– для газообразных ЗВ и мелкодисперсных аэрозолей диаметром не более 10 мкм 1;

– для аэрозолей при наличии систем очистки выбросов значение безразмерного коэффициента: при среднем эксплуатационном коэффициенте очистки выбросов свыше 90 % – 2; при среднем эксплуатационном коэффициенте очистки выбросов от 75 % до 90 % включительно – 2,5; при среднем эксплуатационном коэффициенте очистки выбросов менее 75 % или отсутствии очистки выбросов – 3.

Коэффициенты m и n определяются в зависимости от характеризующих свойства источника выброса параметров v_m , v'_m , f и f_e :

$$v_m = 0,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_1 \cdot \Delta T}{H}}; \quad (4.3)$$

$$v'_m = 1,3 \cdot \frac{w_0 \cdot D}{H}; \quad (4.4)$$

$$f = 1000 \cdot \frac{w_0^2 \cdot D}{H^2 \cdot \Delta T}; \quad (4.5)$$

$$f_e = 800 \cdot (v'_m)^3. \quad (4.6)$$

Коэффициент m определяется по формулам (4.7a) – (4.7б):

$$m = \frac{1}{0,67+0,1 \cdot \sqrt{f}+0,34 \cdot \sqrt[3]{f}} \text{ при } f < 100; \quad (4.7a)$$

$$m = \frac{1,47}{\sqrt[3]{f}} \text{ при } f \geq 100. \quad (4.7б)$$

Для $f_e < f < 100$ коэффициент m вычисляется при $f = f_e$.

Коэффициент n при $f < 100$ определяется по формулам (4.8а) – (4.8в):

$$n = 4,4 \cdot v_M \text{ при } v_M < 0,5, \quad (4.8а)$$

$$n = 0,532 \cdot v_M^2 - 2,13 \cdot v_M + 3,13 \text{ при } 0,5 \leq v_M < 2; \quad (4.8б)$$

$$n = 1 \text{ при } v_M \geq 2. \quad (4.8в)$$

При $f \geq 100$ или $0 \leq \Delta T < 0,5$ коэффициент n вычисляется по формулам (4.8 а) – (4.8в) при $v_M = v'_M$.

Для $f \geq 100$ (или $0 \leq \Delta T < 0,5$) и $v'_M \geq 0,5$ (холодные выбросы) при расчете c_M вместо формулы (4.1) используется формула (4.9):

$$c_M = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot n \cdot \eta}{H^{4/3}} \cdot K, \quad (4.9)$$

где

$$K = \frac{D}{8 \cdot V_1} = \frac{1}{7,1 \cdot \sqrt{w_0 \cdot V_1}}, \quad (4.10)$$

причем n определяется по формулам (4.8 а) – (4.8в) при $v_M = v'_M$.

Аналогично при $f < 100$ и $v_M < 0,5$ или $f \geq 100$ и $v'_M < 0,5$ (случаи предельно малых опасных скоростей ветра) расчет c_M производится по формуле (4.11):

$$c_M = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot m' \cdot \eta}{H^{7/3}}, \quad (4.11)$$

где

$$m' = 2,86 \cdot m \text{ при } v_M < 0,5; \quad (4.12а)$$

$$m' = 0,9 \text{ при } f \geq 100, v'_M < 0,5. \quad (4.12б)$$

Формула (4.12) при $m' = 0,9$ применяется также при расчете концентраций ЗВ для источников выбросов, у которых вертикальная составляющая скорости поступающей в атмосферу газовой смеси не превышает 0,01 м/с, а давление в ней, ее плотность и температура отличаются от соответствующих характеристик атмосферного воздуха не более, чем на 0,01% (далее – источник выбросов фиксированной высоты) H при $0 \leq v'_M < 0,5$ и $-0,5 \leq \Delta T \leq 0$.

Расстояние x_M от источника выброса, на котором приземная концентрация C ЗВ при неблагоприятных метеорологических условиях достигает максимального значения c_M , определяется по формуле (4.13):

$$x_M = \frac{5-F}{4} \cdot d \cdot H. \quad (4.13)$$

Безразмерный коэффициент d при $f < 100$ находится по формулам (4.14а) – (4.14в):

$$d = 2,48 \cdot (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{f_e}) \text{ при } v_M \leq 0,5; \quad (4.14а)$$

$$d = 4,95 \cdot v_M (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{f_e}) \text{ при } 0,5 < v_M \leq 2; \quad (4.14б)$$

$$d = 7 \cdot \sqrt{v_M} (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{f_e}) \text{ при } v_M > 2. \quad (4.14в)$$

При $f \geq 100$ или $0 \leq \Delta T < 0,5$ коэффициент d находится по формулам (4.14г) – (4.14е):

$$d = 5,7 \text{ при } v'_M \leq 0,5; \quad (4.14\Gamma)$$

$$d = 11,4 \cdot v'_M \text{ при } 0,5 < v'_M \leq 2; \quad (4.14\Delta)$$

$$d = 16 \cdot \sqrt{v'_M} \text{ при } v'_M > 2. \quad (4.14\epsilon)$$

Для источника выброса фиксированной высоты H при $0 \leq v'_M < 0,5$ и $-0,5 \leq \Delta T \leq 0$ значение x_M принимается равным $5,7 \cdot H$.

Опасная скорость ветра u_M на стандартном уровне флюгера (10 м от уровня земли), при которой достигается наибольшая приземная концентрация ЗВ c_M , в случае $f < 100$ определяется по формулам (4.15а – 4.15в):

$$u_M = 0,5 \text{ при } v_M \leq 0,5, \quad (4.15\text{а})$$

$$u_M = v_M \text{ при } 0,5 < v_M \leq 2, \quad (4.15\text{б})$$

$$u_M = v_M \cdot (1 + 0,12 \cdot \sqrt{f}) \text{ при } v_M > 2. \quad (4.15\text{в})$$

При $f \geq 100$ или $0 \leq \Delta T < 0,5$ значение u_M вычисляется по формулам (4.16а – 4.16в):

$$u_M = 0,5 \text{ при } v'_M \leq 0,5; \quad (4.16\text{а})$$

$$u_M = 2,2 \cdot v'_M \text{ при } 0,5 < v'_M \leq 2; \quad (4.16\text{б})$$

$$u_M = 2,2 \cdot v'_M \text{ при } v'_M > 2. \quad (4.16\text{в})$$

Для источника выброса фиксированной высоты H при $0 \leq v'_M < 0,5$ и $-0,5 \leq \Delta T \leq 0$ принимается $u_M = 0,5$ м/с.

Максимальная приземная концентрация ЗВ c_M^u при неблагоприятных метеорологических условиях и скорости ветра u , отличающейся от опасной скорости ветра u_M , определяется по формуле (4.17):

$$c_M^u = r \cdot c_M, \quad (4.17)$$

где r – безразмерная величина, определяемая по формулам (4.18а – 4.18б):

$$r = 0,67 \cdot \frac{u}{u_M} + 1,67 \cdot \left(\frac{u}{u_M}\right)^2 - 1,34 \cdot \left(\frac{u}{u_M}\right)^3 \text{ при } \frac{u}{u_M} \leq 1; \quad (4.18\text{а})$$

$$r = \frac{3 \cdot (u/u_M)}{2 \cdot (u/u_M)^2 - u/u_M + 2} \text{ при } \frac{u}{u_M} > 1. \quad (4.18\text{б})$$

При проведении расчетов следует использовать значения скорости ветра u в диапазоне от 0,5 м/с до $u_{M.P}$, где $u_{M.P}$ – максимальная расчетная скорость ветра, значение которой в данной местности в среднем многолетнем режиме превышает в 5 % случаев.

Расстояние от источника выброса x_M^u , на котором при скорости ветра и неблагоприятных метеорологических условиях достигается максимальная приземная концентрация c_M^u ЗВ, определяется по формуле (4.19):

$$x_M^u = p \cdot x_M, \quad (4.19)$$

где p – безразмерный коэффициент, определяемый по формулам (4.20а – 4.42в):

$$p = 3 \text{ при } \frac{u}{u_M} \leq 0,25; \quad (4.20\text{а})$$

$$p = 8,43 \cdot \left(1 - \frac{u}{u_m}\right)^5 + 1 \text{ при } 0,25 < \frac{u}{u_m} \leq 1; \quad (4.20б)$$

$$p = 0,32 \cdot \frac{u}{u_m} + 0,68 \text{ при } \frac{u}{u_m} > 1. \quad (4.20в)$$

При опасной скорости ветра x_m приземная концентрация ЗВ в атмосферном воздухе на оси факела от точечного источника, определяемой как геометрическое место точек в пространстве, которые на каждом заданном расстоянии от источника соответствуют максимальному значению концентрации ЗВ, а также как их проекция на подстилающую поверхность (то есть на взаимодействующую с атмосферой поверхность земли, в том числе, почву, поверхностные воды, снежный и растительный покров), на различных расстояниях x от источника выброса вычисляется по формуле (4.21):

$$c = s_1 \cdot c_m, \quad (4.21)$$

где s_1 – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от отношения x/x_m и коэффициента F по формулам (4.22а – 4.22е):

$$s_1 = 3 \cdot (x/x_m)^4 - 8 \cdot (x/x_m)^3 + 6 \cdot (x/x_m)^2 \text{ при } x/x_m \leq 1, \quad (4.22а)$$

$$s_1 = \frac{1,13}{0,13 \cdot (x/x_m)^2 + 1} \text{ при } 1 < x/x_m \leq 8; \quad (4.22б)$$

$$s_1 = \frac{x/x_m}{3,556 \cdot (x/x_m)^2 - 35,2 \cdot (x/x_m) + 120} \text{ при } 8 < x/x_m \leq 100 \text{ и } F \leq 1,5; \quad (4.22в)$$

$$s_1 = \frac{1}{0,1 \cdot (x/x_m)^2 - 2,456 \cdot (x/x_m) - 17,8} \text{ при } 8 < x/x_m \leq 100 \text{ и } F > 1,5; \quad (4.22г)$$

$$s_1 = 144,3 \cdot (x/x_m) - 7/3 \text{ при } x/x_m > 100 \text{ и } F \leq 1,5; \quad (4.22д)$$

$$s_1 = 37,76 \cdot (x/x_m) - 7/3 \text{ при } x/x_m > 100 \text{ и } F > 1,5. \quad (4.22е)$$

Для наземных и низких источников выброса (высотой H не более 10 м) при $x/x_m < 1$ величина s_1 в формуле (4.21) заменяется на величину s_1^H , определяемую по формуле (4.23):

$$s_1^H = 0,125 \cdot (10 - H) + 0,125 (H - 2) \cdot s_1 \text{ при } 2 \leq H < 10. \quad (4.23)$$

Аналогично определяется концентрация ЗВ на различных расстояниях по оси факела при неблагоприятных метеорологических условиях и других скоростях ветра $u \neq u_m$. Сначала по формулам (4.17) и (4.19) определяются величины $c_{m,u}$ и x_m^u , соответственно. Затем в зависимости от отношения x/x_m определяется значение s_1 по формулам (4.22а – 4.22е) и (4.23). Искомая концентрация c ЗВ определяется путем умножения $c_{m,u}$ на s_1 .

Приземная концентрация ЗВ в атмосферном воздухе c_y на расстоянии y по нормали к оси факела выброса определяется по формуле (4.24):

$$c_y = s_2 \cdot c, \quad (4.24)$$

где s_2 – безразмерный коэффициент, определяемый по формуле (4.25):

$$s_2 = \frac{1}{(1 + 5 \cdot t_y + 12,8 \cdot t_y^2 + 17 \cdot t_y^3 + 45,1 \cdot t_y^4)^2}; \quad (4.25)$$

где

$$t_y = \frac{u \cdot y^2}{x^2} \text{ при } u \leq 5 \text{ м/с;} \quad (4.26a)$$

$$t_y = \frac{5 \cdot y^2}{x^2} \text{ при } u > 5 \text{ м/с.} \quad (4.26б)$$

Расчеты распределения максимальных разовых концентраций c_z ЗВ на разных высотах $z > 2$ м над подстилающей поверхностью проводятся для таких расчетных точек, на которых на значения концентрации не влияют ветровые тени близлежащих зданий и сооружений. В частности, такие расчеты производятся при выборе положения устьев воздухозаборных труб и шахт и других объектов, расположенных на открытых участках местности или на участках, где максимальная высота зданий (сооружений) не менее чем в 2,5 раза ниже высоты воздухозабора при условии, что источники выбросов не располагаются в зоне затишья и/или нарушенного ветрового потока, образующейся на подветренной стороне здания (сооружения) (зона подветренной тени), с наветренной стороны (зона наветренной тени или зона подпора), на крыше (зона крышной тени) или между зданиями (зона межкорпусной тени) (далее – ветровая тень зданий и сооружений).

4.2. Расчет рассеивания выбросов ЗВ в атмосферном воздухе с учетом влияния застройки

4.2.1. Основные расчетные характеристики

Формулы, приведенные в данной главе, предназначены для проведения расчетов приземных концентраций ЗВ в слое от 0 до 2 м включительно и вертикального распределения концентраций ЗВ (включая расчет концентраций ЗВ у стен и крыш зданий) с учетом влияния застройки.

Для каждого из рассматриваемых источников выбросов перед выполнением расчетов с учетом застройки по формулам, приведенным в разделе 4.1, определяются максимальная концентрация ЗВ c_m , а также расстояние x_m и опасная скорость u_m , при которых достигается концентрация ЗВ c_m при отсутствии застройки.

Расчет рассеивания выбросов с учетом влияния застройки производится в случаях, когда здание удалено от источника выброса на расстояние менее x_m , или когда источник расположен на здании или в зонах возможного образования ветровых теней. При этом высота здания H_z должна быть не менее 0,4 высоты источника выброса ($H_z \geq 0,4 \cdot H$). Если здание удалено от источника на расстояние большее, чем $0,5 \cdot x_m$, и основание источника не размещается в зоне возможного образования ветровой тени, то учет влияния застройки производится в случаях, когда высота здания превышает 0,7 высоты источника выброса ($H_z > 0,7 \cdot H$).

Не подлежат учету здания и сооружения высотой менее 5 м, а также здания и сооружения, максимальный линейный размер которых по горизонтали не превышает 10 м.

Учет сооружения производится в случае, если коэффициент проницаемости, определяемый согласно [25] и равный отношению суммарной

площади имеющихся в нем проемов к полной площади сооружения, ниже 0,5.

Рассматриваемое здание аппроксимируется в виде параллелепипеда (рис. 4.1) с высотой H_3 , длиной $L'_д$ (размер наибольшей стороны основания) и шириной $L'_ш$.

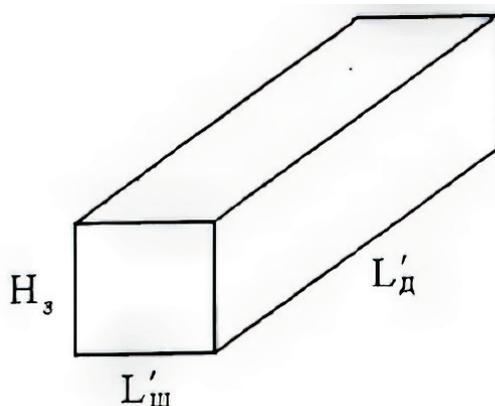


Рисунок 4.1 – Аппроксимация задания в виде параллелепипеда

Высота H_3 определяется по формуле (4.27):

$$H_3 = \frac{V_3}{S_o}, \quad (4.27)$$

где V_3 – фактический объем здания, m^3 ;

S_o – фактическая площадь основания здания, m .

Значения $L'_д$ и $L'_ш$ удовлетворяют условию $L'_д L'_ш = S_o$, а положение боковых сторон аппроксимирующего параллелепипеда выбирается так, чтобы они совпадали или были близки к стенам зданий.

Если здания имеют сложную конфигурацию (рис. 4.2), они аппроксимируются несколькими параллелепипедами. Расчет приземных концентраций ЗВ производится как для совокупности зданий.

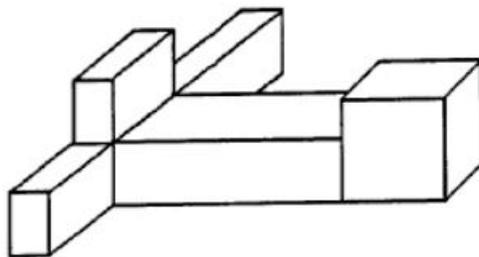


Рисунок 4.2 – Аппроксимация здания сложной конфигурации

Для зданий, имеющих в плане форму близкую к правильному многоугольнику или кругу, в качестве основания аппроксимирующего параллелепипеда берется квадрат с площадью равной площади исходного здания.

Для каждого здания при заданном направлении ветра различаются три зоны ветровых теней высотой H_v над уровнем земли (рис. 4.3):

- зона подветренной тени (зона I);
- зона крышной тени (зона II);
- зона наветренной тени или зона подпора (зона III).

На рисунке 4.3а штриховкой обозначено сечение здания, проведенное вдоль направления ветра, сплошными линиями обозначены границы зон ветровых теней I, II и III.

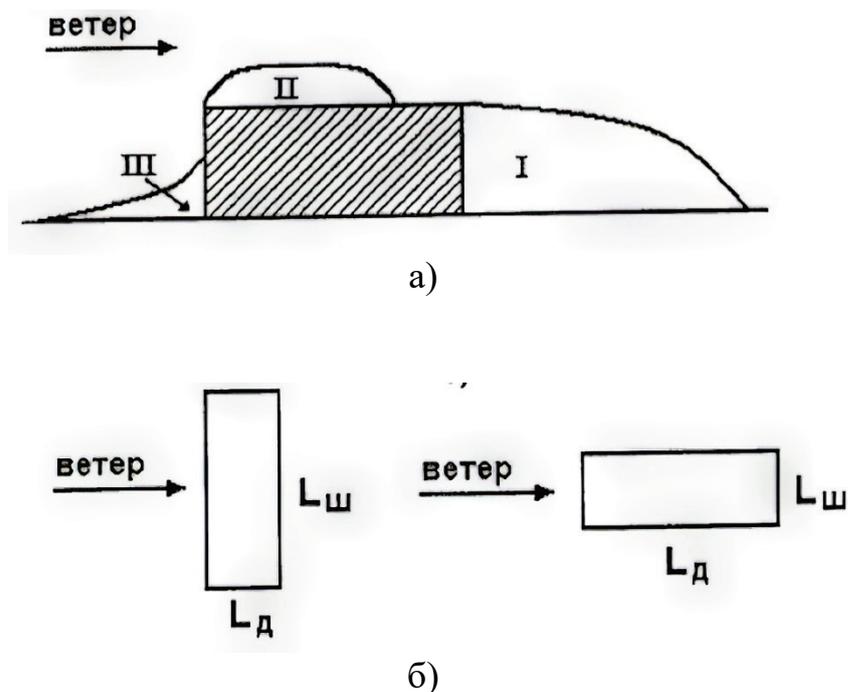


Рисунок 4.3 – Обтекание ветром здания

Максимальные значения H_{vI} , H_{vII} , H_{vIII} высот ветровых теней указанных типов и их протяженности L_I , L_{II} , L_{III} определяются формулами (4.28а – 4.28г):

$$H_{vI} = H_з, L_I = 4 \cdot L_{зв}; \quad (4.28а)$$

$$H_{vII} = H_з + 0,4 \cdot L_д, L_{II} = L_д \text{ при } L_д \leq 2 \cdot L_{зв}; \quad (4.28б)$$

$$H_{vII} = H_з + 0,4 \cdot L_д, L_{II} = 2 \cdot L_{зв} \text{ при } L_д > 2 \cdot L_{зв}; \quad (4.28в)$$

$$H_{vIII} = 0,5 \cdot L_{зв}, L_{III} = L_{зв}, \quad (4.28г)$$

где $H_з$ – высота здания;

$L_д$ – длина здания, устанавливаемая в зависимости от направления ветра;

$L_{зв}$ – масштаб длины, характеризующий размеры ветровых теней, который вычисляется по формулам (4.29а – 4.29б):

$$L_{зв} = H_з \text{ при } H_з \leq L_{ш}; \quad (4.29а)$$

$$L_{зв} = L_{ш} \text{ при } H_з > L_{ш}. \quad (4.29б)$$

Если высота ветровых теней H_v (в зонах I, II, III) окажется менее 1 м, то принимается $H_v = 1$ м.

Ширина здания $L_{ш}$ и длина здания $L_{д}$ устанавливаются в зависимости от направления ветра. В случаях, когда ветер направлен по нормали к стене здания, длина этой стены принимается за $L_{ш}$, а длина смежной стены – за $L_{д}$ (рис. 4.3б).

Границы ветровых теней по высоте устанавливаются по формулам (4.30а – 4.30в):

$$h_I(x) = H_3 \cdot \left[1 - \left(\frac{x'}{4 \cdot L_{ЗВ}} \right)^2 \right] \text{ при } 0 \leq x' \leq L_I; \quad (4.30а)$$

$$h_{II}(x) = H_3 + L_{ЗВ} \cdot 1,6 \cdot \frac{x'}{L_{II}} \cdot \left[1 - \frac{x'}{L_{II}} \right] \text{ при } 0 < x' < L_{II}; \quad (4.30б)$$

$$h_{III}(x) = L_{ЗВ} \cdot \frac{1 - x'/L_{ЗВ}}{2 + x'/L_{ЗВ}} \text{ при } 0 \leq x' \leq L_{ЗВ}, \quad (4.30в)$$

где x' – расстояние вдоль направления ветра от точки, в которой вычисляется высота ветровой тени, до стены здания.

При наличии застройки максимальная приземная концентрация ЗВ $\hat{c}_м$ определяется по формуле (4.31):

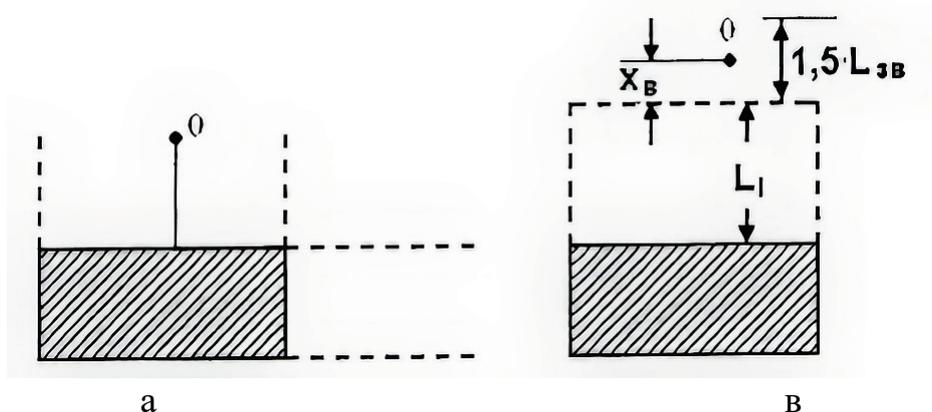
$$\hat{c}_м = c_м \cdot \hat{\eta}_м, \quad (4.31)$$

где $c_м$ – максимальная концентрация ЗВ, полученная без учета влияния застройки (согласно разделу 4.1);

$\hat{\eta}_м$ – поправка, учитывающая влияние застройки.

Концентрация $\hat{c}_м$ ЗВ достигается на расстоянии $\hat{x}_м$ от источника выброса при опасной скорости ветра $\hat{u}_м$.

Расчет максимальных концентраций ЗВ от одиночного точечного источника выброса при наличии одного здания $\hat{c}_м$ проводится в зависимости от расположения основания источника выброса (точка 0 на рисунке 4.4) относительно здания.



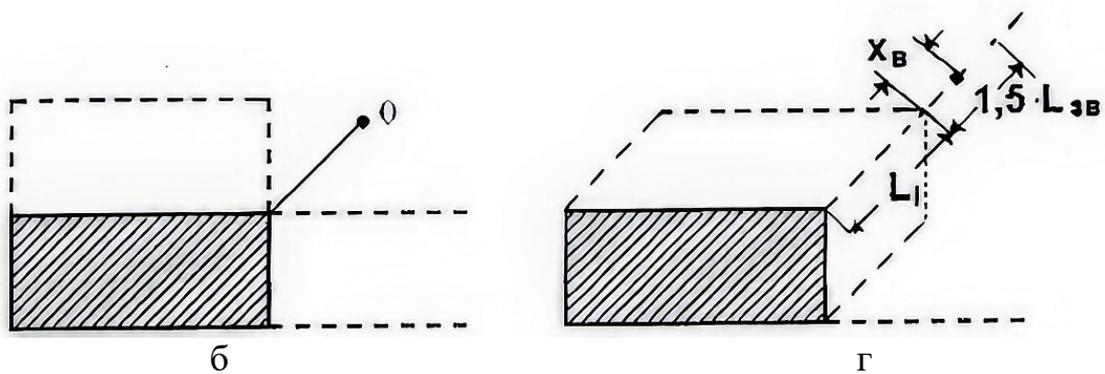


Рисунок 4.4 – Расположение источника выбросов относительно здания

При расположении основания источника выброса в зонах возможного образования подветренной тени, обозначенных пунктирными линиями, при ветре, направленном по нормали к стене здания (рис. 4.4а), \hat{c}_m определяется следующим образом:

$$\hat{\eta}_m = s_1 \cdot (1 - \zeta_m) + \zeta_m \cdot \vartheta_1, \quad (4.32)$$

где s_1 – безразмерный коэффициент;

ζ_m – безразмерный коэффициент, описывающий влияние колебаний направления ветра. Значение ζ_m определяется по формуле (4.33);

$$\zeta_m = \frac{1}{(1 + 2,9 \cdot 10^{-3} \cdot t_3 + 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot t_3^2 + 9,2 \cdot 10^{-10} \cdot t_3^4)^4} \quad (4.33)$$

в зависимости от аргумента t_3 :

$$t_3 = \varphi_k \cdot \sqrt{\hat{u}_m} \text{ при } \hat{u}_m \leq 5 \text{ м/с}; \quad (4.34a)$$

$$t_3 = 2,24 \cdot \varphi_k \text{ при } \hat{u}_m > 5 \text{ м/с}; \quad (4.34b)$$

ϑ_1 – безразмерный расчетный коэффициент, который определяется по формулам (4.35а – 4.35б):

$$\vartheta_1 = r_3 \cdot \tilde{\eta} \cdot s \text{ при } \vartheta_1 > 1; \quad (4.35a)$$

$$\vartheta_1 = 1 \text{ при } \vartheta_1 < 1. \quad (4.35b)$$

Расчетные коэффициенты r_3 , $\tilde{\eta}$ и s в формуле (4.35а) являются безразмерными. Коэффициент r_3 описывает влияние различия в опасной скорости ветра \hat{u}_m при наличии здания и опасной скорости ветра u_m при отсутствии здания. Коэффициент $\tilde{\eta}$ характеризует изменение структуры воздушного потока при наличии застройки. Коэффициент s характеризует влияние турбулентной диффузии внутри ветровой тени.

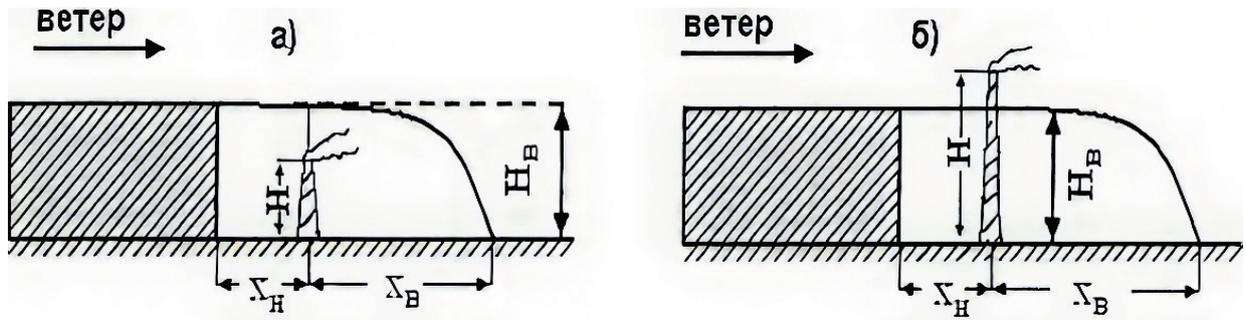


Рисунок 4.5 – Расположение источника выбросов и здания

Для определения коэффициента r_3 предварительно вычисляется опасная скорость ветра \hat{u}_M по формулам (4.15а – 4.15в). При этом если высота источника выброса H меньше высоты зоны ветровой тени H_B в точке расположения источника выброса, то есть $H < H_B$ (рисунок 4.5а), то расчет входящих в указанные формулы значений v_M и f производится при замене высоты источника выброса H на высоту зоны ветровой тени H_B .

Далее r_3 определяется в зависимости от соотношения \hat{u}_M / u_M по формулам (4.36а – 4.36б):

$$r_3 = 0,67 \cdot \frac{\hat{u}_M}{u_M} + 1,67 \cdot \left(\frac{\hat{u}_M}{u_M}\right)^2 - 1,34 \cdot \left(\frac{\hat{u}_M}{u_M}\right)^3 \text{ при } \frac{\hat{u}_M}{u_M} \leq 1; \quad (4.36a)$$

$$r_3 = \frac{3 \cdot \hat{u}_M / u_M}{2 \cdot (\hat{u}_M / u_M)^2 - \hat{u}_M / u_M + 2} \text{ при } \frac{\hat{u}_M}{u_M} > 1. \quad (4.36b)$$

Если $H > H_B$ (рис. 4.4б), то $\hat{u}_M = u_M$ и $r_3 = 1$.

Коэффициент $\tilde{\eta}$ определяется по формулам (4.37а – 4.37б):

$$\tilde{\eta} = 1 + \frac{15}{1 + 16 \cdot (H/H_B - 1)^2} \text{ при } H \geq H_B; \quad (4.37a)$$

$$\tilde{\eta} = 16 \text{ при } H < H_B. \quad (4.37b)$$

Коэффициент s в формуле (4.35а) определяется по формулам (4.38а – 4.38г):

$$s = 0,6 \cdot t_1^4 - 2 \cdot t_1^3 + 2 \cdot t_1^2 \text{ при } 0 \leq t_1 < 1; \quad (4.38a)$$

$$s = \frac{62,2}{64 + t_1^2} - \frac{0,357}{t_1} \text{ при } 1 \leq t_1 \leq 8; \quad (4.38b)$$

$$s = \frac{t_1 \cdot (t_1 - 1) + 14,7}{t_1 \cdot [1,62 \cdot t_1 \cdot (t_1 - 1) + 209]} + \frac{0,51 \cdot (t_1 - 4,92)^2}{t_1 \cdot (t_1 - 363)^2} + \frac{3,04}{t_1}; \quad (4.38b)$$

$$s = \frac{4,4504 \cdot t_1 - 14,419}{t_1^2} \text{ при } t_1 > 40 \quad (4.38g)$$

в зависимости от аргумента

$$t_1 = \frac{L_1 \cdot \sqrt{\tilde{\eta}}}{1,1 \cdot p_3 \cdot x_M} \quad (4.39)$$

при замене L_1 на x_B , где x_B – расстояние от источника выброса до подветренной

границы подветренной тени (рисунок 4.5б).

При $H \leq H_B$ коэффициент p_3 устанавливается в зависимости от отношения \hat{u}_M / u_M по формулам (4.40а – 4.40в):

$$p_3 = 3 \text{ при } \frac{\hat{u}_M}{u_M} \leq 0,25; \quad (4.40a)$$

$$p_3 = 8,49 \cdot \left(1 - \frac{\hat{u}_M}{u_M}\right)^5 + 1 \text{ при } 0,25 < \frac{\hat{u}_M}{u_M} \leq 1; \quad (4.40б)$$

$$p_3 = 0,32 \cdot \frac{\hat{u}_M}{u_M} + 0,68 \text{ при } \frac{\hat{u}_M}{u_M} > 1. \quad (4.40в)$$

При $H > H_B$ принимается $p_3 = 1$.

Для низких источников выбросов ($H < 10$ м) коэффициент s в формуле (4.35а) заменяется на S_L , где S_L определяется по формулам (4.41а – 4.41г):

$$s_L = 1 \text{ при } t_1 \leq 1 \text{ и } H \leq 2\text{м}; \quad (4.41a)$$

$$s_L = 0,125 \cdot (10 - H) + 0,125 \cdot (H - 2) \cdot s \text{ при } t_1 \leq 1 \text{ и } 2 < H < 10 \text{ м}; \quad (4.41б)$$

$$s_L = s + \frac{0,4}{t_1} \text{ при } t_1 > 1 \text{ и } H \leq 2 \text{ м}; \quad (4.41в)$$

$$s_L = s + \frac{0,05 \cdot (10 - H)}{t_1} \text{ при } t_1 > 1 \text{ и } 2 < H < 10 \text{ м}. \quad (4.41г)$$

Для определения ζ_M находится вспомогательный угол φ_k (в градусах) в зависимости от отношения t_2 по формулам (4.42а – 4.42б):

$$\varphi_k = 136,5 \cdot t_1^4 - 364 \cdot t_1^3 - 273 \cdot t_1^2 \text{ при } t_2 \leq 1; \quad (4.42a)$$

$$\varphi_k = 18 + \frac{28}{1 + 0,02 \cdot t_1^3} \text{ при } t_2 > 1; \quad (4.42б)$$

$$t_2 = \frac{L_{ш}}{L_d}. \quad (4.43)$$

Если рассчитанное значение $\hat{\eta}_M$ удовлетворяет условию

$$\hat{\eta}_M \leq 1, \quad (4.44)$$

то принимаются соотношения

$$\hat{\eta}_M = 1; \quad (4.45a)$$

$$\hat{c}_M = c_M; \quad (4.45б)$$

$$\hat{u}_M = u_M; \quad (4.45в)$$

$$\hat{x}_M = x_M. \quad (4.45г)$$

При расположении основания источника выброса в зонах, где ветровые тени образуются только при направлении ветра, отличном от направления нормалей к стенам здания (рис. 4.4б), максимальная приземная концентрация ЗВ \hat{c}_M достигается при направлении ветра, соответствующем переносу атмосферного воздуха к источнику выброса (точка 0 на рисунке 4.4б) от ближайшего к нему угла здания.

Расчет $\hat{\eta}_m$ производится при этом по формулам (4.32 – 4.45г) со следующими изменениями:

- для определения того, какая из сторон здания при указанном направлении ветра является подветренной, через центр здания (рис. 4.6) проводится прямая Q по направлению ветра. Если эта прямая находится внутри или на границах угла, который образован диагоналями, примыкающими к более длинной стороне здания (например, к стороне CD на рисунке 4.6), то данная сторона рассматривается как подветренная, и ее длина обозначается $L_{ш}$, а длина смежной стороны – $L_{д}$. В противном случае подветренной является более короткая сторона здания;
- определяется $L_{ЗВ}$ по формуле (4.29) с использованием полученного значения $L_{ш}$;
- величина ζ_m вычисляется по формулам (4.46а – 4.46б):

$$\zeta_m = 0,5 \cdot (\zeta' + \zeta'') \text{ при } \gamma \leq \varphi_k; \quad (4.46a)$$

$$\zeta_m = 0,5 \cdot (\zeta' + \zeta'') \text{ при } \gamma > \varphi_k, \quad (4.46б)$$

где γ – положительный острый угол (в градусах) между направлением ветра и нормалью подветренной стены здания (рисунок 4.6);

ζ' – коэффициент, рассчитываемый по формуле (4.33) как значение ζ_m , вычисленное по аргументу t_3 (формула (4.34) при замене φ_k на $(\varphi_k + \gamma)$);

ζ'' – коэффициент, вычисляемый аналогично ζ' , но при замене φ_k на $|\varphi_k - \gamma|$.

Для источников выброса, основание которых расположено вне зоны возможного образования подветренной тени (рисунки 4.4в, 4.4г), максимальная концентрация ЗВ достигается при переносе атмосферного воздуха от здания к источнику выброса по нормали (рисунок 4.4в) или по направлению от ближайшего угла здания (рисунок 4.4г). Если при этом расстояние от источника выброса до границы ветровой тени x_b (рисунки 4.4в, 4.4г) удовлетворяет условию $x_b \leq 1,5 L_{ЗВ}$ (где $L_{ЗВ}$ определяется в соответствии с формулой 4.29), то

$$\hat{\eta}_m = \hat{\eta}_{m0} - \frac{x_b}{1,5 \cdot L_{ЗВ}} \cdot (\hat{\eta}_m - 1), \quad (4.47)$$

где $\hat{\eta}_{m0}$ определяется в соответствии с формулами 4.32 – 4.45 как значение $\hat{\eta}_m$ для источника выброса, расположенного на границе зоны подветренной тени.

При $x_b > 1,5 \cdot L_{ЗВ}$ принимается $\hat{\eta}_{m0} = 1$.

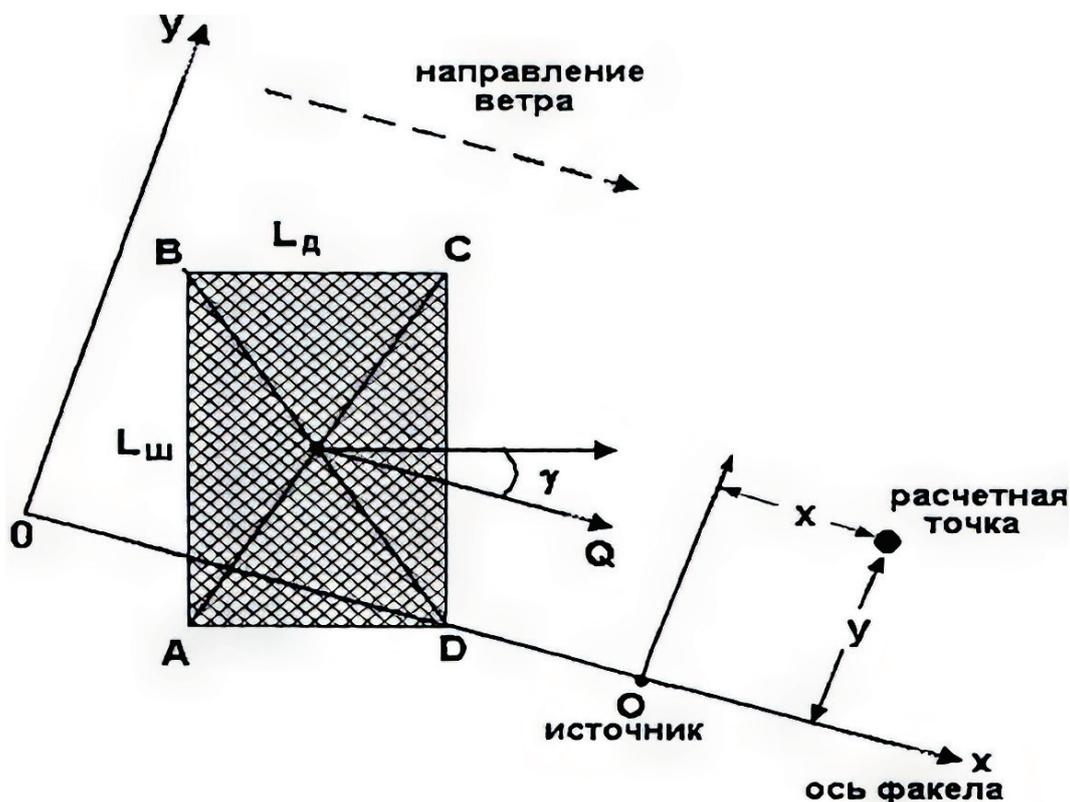


Рисунок 4.6 – Расчетная схема положения источника и здания

При расположении основания источника выброса на крыше здания различают два случая: короткое здание $L_d < 2 \cdot L_{зв}$ и длинное здание $L_d \geq 2 \cdot L_{зв}$.

При наличии короткого здания образуется объединенная крышно-подветренная тень и величина s в формуле (4.35а) определяется по аргументу t_1 , вычисленному по формуле (4.36) при замене L_1 на x_B , где x_B – расстояние от источника выброса до подветренной границы подветренной тени (рисунок 4.7а).

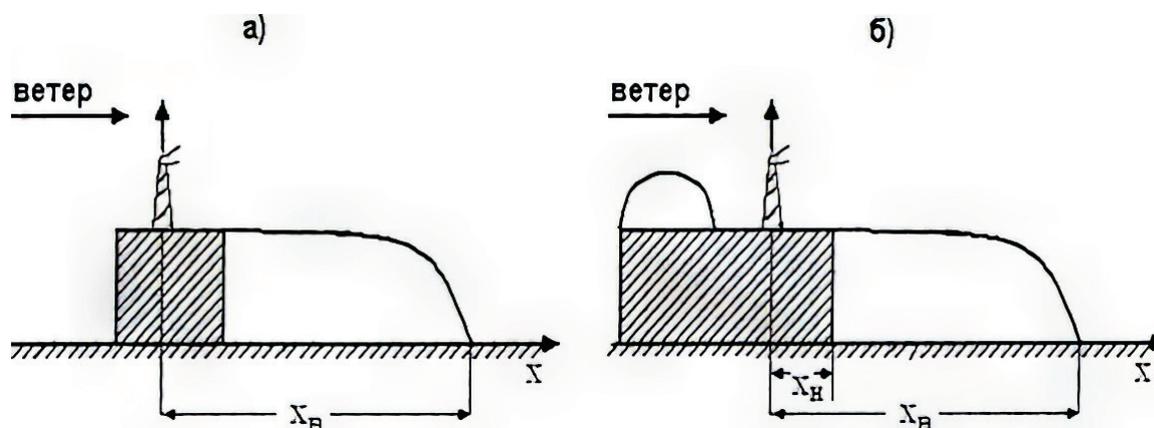


Рисунок 4.7 – Расположение источника выбросов и зданий

$$\tilde{s} = s \text{ при } L_{\text{д}} < 2 \cdot L_{\text{ЗВ}}. \quad (4.48\text{а})$$

При наличии длинного здания расчет концентрации ЗВ в подветренной тени осуществляется с заменой s в формуле (4.35а) на коэффициент \tilde{s} , определяемый по формуле (4.48б);

$$\tilde{s} = \frac{x_{\text{в}} \cdot s_{\text{в}} - x_{\text{н}} \cdot s_{\text{н}}}{x_{\text{в}} - x_{\text{н}}} \text{ при } L_{\text{д}} \geq 2 \cdot L_{\text{ЗВ}}, \quad (4.48\text{б})$$

где $x_{\text{н}}$ и $x_{\text{в}}$ – расстояния от источника выброса до наветренной и подветренной границ подветренной тени (рис. 4.7б), соответственно;

$s_{\text{н}}$ и $s_{\text{в}}$ – коэффициенты, вычисляемые по формулам (4.38а – 4.38г) как значения s при аргументе t_1 , рассчитанном по формуле (4.36) при замене L_1 на $x_{\text{н}}$ и $x_{\text{в}}$ соответственно.

Формулы (4.45а) и (4.45б) используются также для низких источников выбросов для определения коэффициента \tilde{s}_L , который подставляется в формулу (4.35а) вместо s_L , вычисленного по формулам (4.41а – 4.41г). При этом в правой части формул (4.45а – 4.45б) коэффициенты s , $s_{\text{в}}$ и $s_{\text{н}}$ заменяются на соответствующие значения s_L .

Если источник выброса расположен на крыше длинного здания вне зоны крышной тени, то:

$$H_{\text{в}} = H_{\text{з}}; \hat{u} = u_{\text{м}}, r_{\text{з}} = p_{\text{з}} = 1. \quad (4.49)$$

В остальных случаях расчет максимальных концентраций ЗВ производится без учета влияния зданий, то есть $\hat{c}_{\text{м}} = c_{\text{м}}$.

4.2.2. Расчет распределения концентрации ЗВ от одиночного точечного источника выброса при произвольно заданных направлениях и скоростях ветра

До проведения расчетов распределения концентрации ЗВ от точечного источника выброса с учетом влияния застройки при произвольно заданных скорости и направлении ветра на плане местности через источник выброса проводится прямая линия, ориентированная вдоль ветра (рисунок 4.6). Если эта линия не пересекает основание здания, то расчет распределения приземных концентраций ЗВ производится по формулам, приведенным выше в главе 4, без учета влияния здания. В случае пересечения здания линией на плане (рис. 4.6) учитывается влияние застройки. При этом длина подветренной стороны здания определяется в соответствии с формулами, приведенными выше.

Приземная концентрация ЗВ при произвольных значениях направления и скорости ветра рассчитывается по формуле (4.50):

$$\hat{c} = c_{\text{м}} \cdot r \cdot \hat{\eta}, \quad (4.50)$$

где $c_{\text{м}}$ – концентрация ЗВ, определяемая по формуле (4.1);

r – коэффициент, определяемый в зависимости от отношения $u / \hat{u}_{\text{м}}$;

$\hat{u}_{\text{м}}$ – опасная скорость ветра с учетом влияния застройки.

Последовательность расчета коэффициента $\hat{\eta}$ рассмотрена ниже и выбирается в зависимости от того, находится ли основание источника выброса

в зоне подветренной или зоне наветренной тени, расположен ли источник выброса на крыше здания, над зонами ветровой тени, с наветренной или подветренной стороны от указанных зон.

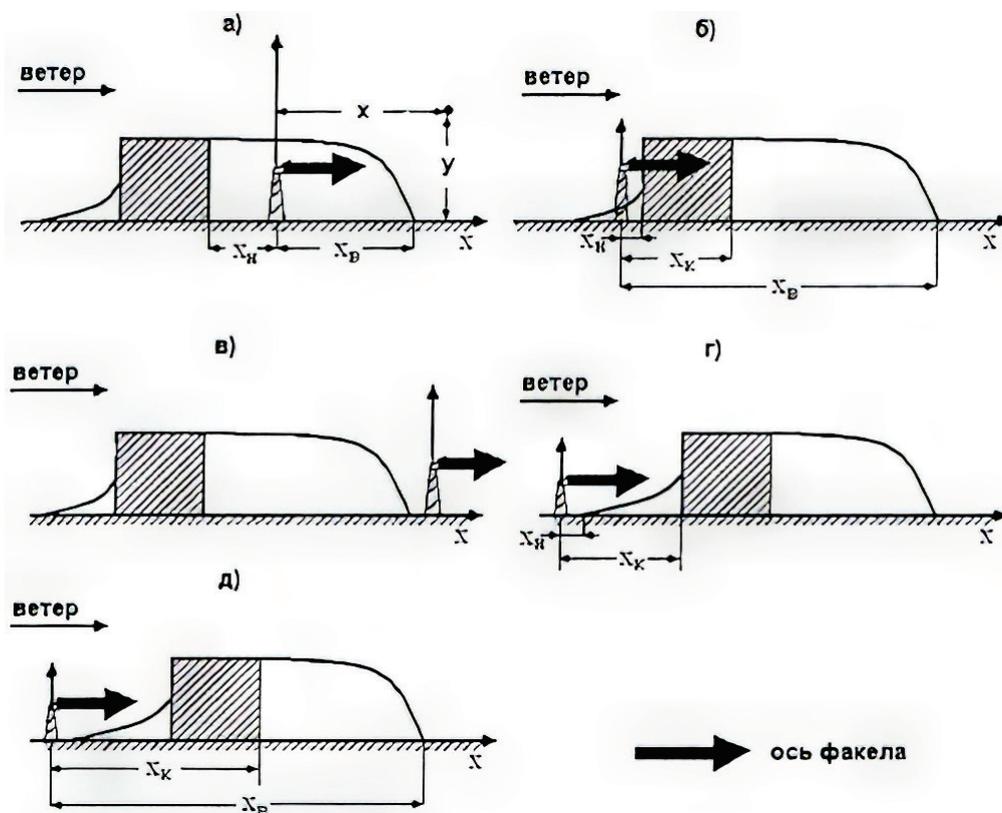


Рисунок 4.8 – Совместное расположение источника выбросов и препятствия

При расположении основания источника выброса в зоне подветренной тени (рис. 4.8а) значение $\hat{\eta}$ в точке, расположенной на расстоянии x от источника выброса вдоль оси факела и на удалении y от этой оси (рис. 4.6), определяется по формуле (4.51):

$$\hat{\eta} = (1 - \zeta) \cdot s_1 \cdot s_2 + \zeta \cdot s'. \quad (4.51)$$

Коэффициент ζ , зависящий от скорости ветра u и положительного острого угла γ между направлением ветра и нормалью подветренной стены здания (рисунок 4.6), определяется по формуле (4.46) для ζ_m , причем аргумент t_3 вычисляется по формуле (4.34) с заменой \hat{u}_m на u . При этом φ_k определяется по формулам (4.42а – 4.42б).

Коэффициент s_1 находится в зависимости от отношения $x / (p \cdot x_m)$. Безразмерный коэффициент p определяется в зависимости от отношения u_m / \hat{u}_m по формулам (4.20а – 4.20в).

Коэффициент s_2 находится по формуле (4.25) в зависимости от скорости ветра u и аргумента t_y (формула (4.26)).

Коэффициент s' находится по формулам (4.52а – 4.52в):

$$s' = \vartheta_1 \cdot \tilde{s}_2 \text{ при } x \leq x_b; \quad (4.52a)$$

$$s' = \vartheta_1 \cdot \tilde{s}_2 \cdot (1 - s'') + s_1 \cdot s_2 \cdot s'' \text{ при } x_B < x \leq L'; \quad (4.52б)$$

$$s' = s_1 \cdot s_2 \text{ при } x > L'; \quad (4.52в)$$

$$L' = p \cdot x_M \text{ при } x_B + 5 \cdot H_B \leq p \cdot x_M; \quad (4.53а)$$

$$L' = x_B + 5 \cdot H_B \text{ при } x_B + 5 \cdot H_B > p \cdot x_M; \quad (4.53б)$$

$$s'' = \frac{2 \cdot (x - x_B)}{p \cdot x_M + x - 2 \cdot x_B} \text{ при } x_B + 5 \cdot H_B \leq p \cdot x_M; \quad (4.54а)$$

$$s'' = \frac{x - x_B}{2 \cdot H_B + 0,6 \cdot (x - x_B)} \text{ при } x_B + 5 \cdot H_B > p \cdot x_M. \quad (4.54б)$$

Коэффициент ϑ_1 вычисляется по формулам (4.35а – 4.35б), причем величины t_3 , $\hat{\eta}$ и s определяются по формулам, приведенным выше. При этом значение s соответствует аргументу t_1 , определенному по формуле (4.36) при замене L_1 на x_B .

Коэффициент s_1 в формуле (4.52б) вычисляется при $x = L'$.

Коэффициент \tilde{s}_2 при $x \leq x_B$ (то есть внутри зоны подветренной тени) вычисляется по формулам (4.55а – 4.55б):

$$\tilde{s}_2 = 1 \text{ при } |y| \leq L_{ЗВ}/2; \quad (4.55а)$$

$$\tilde{s}_2 = 0 \text{ при } |y| > L_{ЗВ}/2. \quad (4.55б)$$

При $x > x_B$ коэффициент \tilde{s}_2 находится по формуле (4.25), как значение s_2 , соответствующее аргументу:

$$t_y = \frac{u \cdot y^2}{(x - x_B + 2,24 \cdot L_{ЗВ} \cdot \sqrt{u})^2} \text{ при } u \leq 5 \text{ м/с}; \quad (4.56а)$$

$$t_y = \frac{5 \cdot y^2}{(x - x_B + 5 \cdot L_{ЗВ})^2} \text{ при } u > 5 \text{ м/с}. \quad (4.56б)$$

При расположении основания источника выброса в зоне подпора (зоне наветренной тени) (рис. 4.8б) коэффициент $\hat{\eta}$ рассчитывается по формуле (4.51). При этом величины ζ , s_1 и s_2 определяются по алгоритму, приведенному выше, а коэффициент s' находится по формулам (4.57а – 4.57г):

$$s' = \vartheta_1 \cdot \tilde{s}_2, \text{ при } x \leq x_H; \quad (4.57а)$$

$$s' = \vartheta_1 \cdot \tilde{s}_2, \text{ при } x_k < x \leq x_B; \quad (4.57б)$$

$$s' = \vartheta_1 \cdot \tilde{s}_2, \text{ при } x_B < x \leq L'; \quad (4.57в)$$

$$s' = s_1 \cdot s_2 \text{ при } x > L'. \quad (4.57г)$$

В этом случае величина L' вычисляется по формулам (4.53а – 4.53б), коэффициенты s'' и \tilde{s}_2 – по формулам (4.54а – 4.54б), (4.55а – 4.55б) соответственно.

Коэффициент ϑ_1 вычисляется по формуле (4.35а) с использованием коэффициента s , определяемого по формулам (4.38а) – (4.38г) в зависимости от коэффициента t_1 , вычисленного по формуле (4.39) с заменой L_1 на x_H , где x_H – расстояние от источника выброса до здания (рис.к 4.8б).

Для низких источников выброса вместо s используется коэффициент s_L , определяемый по формулам (4.41а – 4.41г) в зависимости от коэффициента t_1 , с учетом замены в формуле (4.39) L_1 на x_H .

Коэффициент s_1 в формуле (4.54в) вычисляется при $x = L'$.

Коэффициент ϑ_1 вычисляется по формулам (4.58а – 4.58б):

$$\tilde{\vartheta}_1 = r_3 \cdot \tilde{\eta} \cdot \tilde{s} \text{ при } \tilde{\vartheta}_1 > 1; \quad (4.58а)$$

$$\tilde{\vartheta}_1 = 1 \text{ при } \tilde{\vartheta}_1 < 1, \quad (4.58б)$$

где r_3 и $\tilde{\eta}$ определяются по формулам выше, а величина \tilde{s} определяется по формуле (4.59):

$$\tilde{s} = \frac{x_B \cdot s_B - x_K \cdot s_K}{x_B - x_K}. \quad (4.59)$$

Здесь x_H и x_K – расстояния от источника выброса до начала и до конца здания соответственно, а x_B – расстояние от подветренной границы подветренной тени до источника выброса (рисунок 4.8б).

В случае $L_d < 2 \cdot L_{зв}$, при расчетах в области $x_B < x \leq L'$ в формуле (4.59) вместо x_K следует использовать величину x_H .

Коэффициенты s_B и s_K вычисляются по формулам (4.38а – 4.38г), как значения s , соответствующие аргументу t_1 , определенному по формуле (4.39) при замене L_1 на x_B и x_K соответственно.

Для низких источников выбросов вместо \tilde{s} используется коэффициент \tilde{s}_L , вычисляемый с использованием формул (4.41а – 4.41г).

При расположении источника выброса на крыше здания (рис. 4.7) величина $\hat{\eta}$ рассчитывается по формуле (4.51). При этом величины ζ , s_1 и s_2 определяются согласно формулам, приведенным выше. Коэффициент s' находится по формулам (4.60а – 4.60в):

$$s' = \tilde{\vartheta}_1 \cdot \tilde{s}_2 \text{ при } x < x_B; \quad (4.60а)$$

$$s' = \tilde{\vartheta}_1 \cdot \tilde{s}_2(1 - s'') + s_1 \cdot s_2 \cdot s'' \text{ при } x_B \leq x \leq L'; \quad (4.60б)$$

$$s' = s_1 \cdot s_2 \text{ при } x > L', \quad (4.60в)$$

где ϑ_1 вычисляется по формулам (4.58а – 4.58б). При этом коэффициенты r_3 , $\tilde{\eta}$ и \tilde{s} , \tilde{s}_2 , s'' и L' – согласно формулам, приведенным выше. Коэффициент s_1 в формуле (4.60б) вычисляется при $x = L'$.

Если основание источника выброса размещается с подветренной стороны от ветровой тени, причем $x_B \leq 1,5 \cdot L_{зв}$ (рис. 4.8в), то величина $\hat{\eta}$ рассчитывается по формуле (4.61):

$$\hat{\eta}_{МВ} = \left[\hat{\eta}_{МВ} - \frac{2 \cdot x_B}{3 \cdot L_{зв}} \cdot (\hat{\eta}_{МВ} - 1) \right] s_1 \cdot s_2, \quad (4.61)$$

где $\hat{\eta}_{МВ}$ определяется в соответствии с формулами выше с заменой ζ_M на коэффициент ζ . При $x_B > 1,5 \cdot L_{зв}$ величина $\hat{\eta}$ определяется по формуле (4.62):

$$\hat{\eta} = s_1 \cdot s_2. \quad (4.62)$$

При расположении источника выброса с наветренной стороны от

ветровой тени на расстоянии $x_n \leq 1,5 \cdot L_{зв}$ (рис. 4.8г) расчет $\hat{\eta}$ производится по формуле (4.61). При этом в зоне наветренной тени коэффициент s_1 заменяется на $\zeta \cdot \tilde{s}_a + (1 - \zeta) \cdot s_1$, а для подветренной зоны коэффициент s_1 заменяется на $\zeta \cdot \tilde{s}_b + (1 - \zeta) \cdot s_1$, где:

- величина \tilde{s}_a вычисляется по формуле (4.59) с использованием в качестве x_k и x_b расстояний от источника выброса до начала x_n и конца x_k наветренной тени (рисунок 4.8г);
- величина \tilde{s}_b вычисляется по формуле (4.59) с использованием в качестве x_k и x_b расстояний от источника выброса до начала (x_k) и конца зоны подветренной тени (x_b), соответственно (рис. 4.8д).

При $x_n > 1,5 \cdot L_{зв}$ расчет $\hat{\eta}$ выполняется по формуле (4.62), причем в наветренной и подветренной зоне тени также производится замена коэффициента s_1 на выражение $\zeta \cdot \tilde{s}_a + (1 - \zeta) \cdot s_1$ и $\zeta \cdot \tilde{s}_b + (1 - \zeta) \cdot s_1$, соответственно.

4.2.3. Расчет концентрации ЗВ от одиночного точечного источника выброса при наличии двух зданий

Расчет распределения концентрации ЗВ в атмосферном воздухе от точечного источника выброса при заданных направлении и скорости ветра при наличии двух зданий выполняется по аналогии с расчетом распределения концентрации ЗВ от одиночного точечного источника выброса при произвольно заданных направлениях и скоростях ветра.

До проведения расчетов на плане местности через точку, соответствующую расположению центра источника выброса, проводится прямая линия, ориентированная вдоль ветра. Если эта линия не пересекает основание зданий, то расчет распределения приземных концентраций ЗВ производится по формулам, приведенным выше, без учета влияния застройки. При пересечении линией одного из зданий (рис. 4.6) учитывается влияние застройки в соответствии с расчетом распределения концентрации ЗВ от одиночного точечного источника выброса при произвольно заданных направлениях и скоростях ветра. При пересечении линией на плане двух зданий определяется наличие объединенной ветровой зоны между зданиями. Если зоны подветренной тени от первого и наветренной тени от второго здания не перекрываются, и, соответственно, не образуется объединенной ветровой тени между зданиями, расчет распределения концентрации ЗВ проводится по формулам расчета распределения концентрации ЗВ от одиночного точечного источника выброса при произвольно заданных направлениях и скоростях ветра.

Если источник выброса не расположен между зданиями (например, в точке O_1 на рисунке 4.9), то максимальные приземные концентрации ЗВ достигаются при переносе атмосферного воздуха от зданий к источнику выброса (рис. 4.4в, 4.4г), а расчет осуществляется как при расположении основания источника выброса в зонах возможного образования ветровых теней при ветре, направленном по нормали к стене здания.

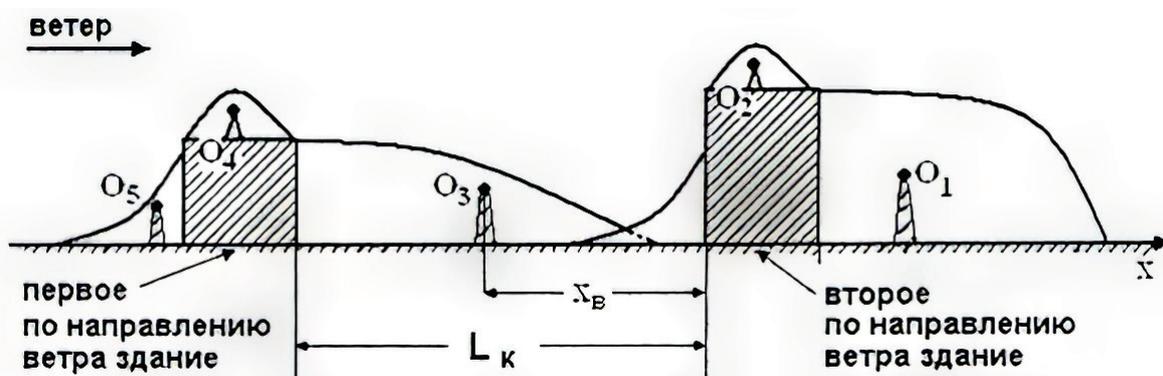


Рисунок 4.9 – Расположение источника выбросов и препятствий

В случае образования объединенной ветровой тени (рис. 4.9) между зданиями при расчетах распределения концентрации ЗВ в межкорпусном дворе вспомогательный угол φ_k определяется по формуле (4.63):

$$\varphi_k = 0,5 \cdot (\varphi_{k1} + \varphi_{k2}), \quad (4.63)$$

где величина φ_{k1} определяется для первого по направлению ветра зданию, а φ_{k2} – для второго по формулам (4.42а – 4.42б). При этом угол γ , используемый в тех случаях, когда основание источника выброса находится в зонах, где образование подветренной тени возможно только при направлении ветра, отличном от направления нормалей к стенам здания вычисляется по первому по направлению ветра зданию. При различии величин $L_{зв1}$ и $L_{зв2}$ зданий двора в качестве $L_{зв}$ для расчетов по формуле (4.55) берут максимальную из них.

Если источник выброса расположен между зданиями (например, в точке O_3 на рисунке 4.9), то расчет \hat{c}_m осуществляется как при расположении основания источника выброса в зонах возможного образования ветровых теней при ветре, направленном по нормали к стене здания. При этом в случае образования объединенной зоны ветровой тени в формуле (4.39) вместо L_1 используется величина x_b , определяемая как расстояние от источника выброса до второго здания – конца объединенной ветровой тени.

Коэффициент η для источника выброса, расположенного в межкорпусном дворе, определяется так же, как и для источника выброса, расположенного в подветренной тени.

Далее рассчитывается коэффициент ϑ_1 по формулам (4.35а – 4.35б). При $L_1 > L_k$ и $H < H_b$ полученное значение ϑ_1 умножается на отношение (4.64):

$$\vartheta'_1 = \frac{H_b \cdot L_1 + H \cdot L_k}{H \cdot L_1 + H_b \cdot L_k}, \quad (4.64)$$

где L_k – протяженность объединенной зоны между зданиями, м;

L_1 – протяженность той зоны ветровой тени, высота которой использована при определении H_b , то есть подветренной от первого здания или наветренной от второго здания, м.

В остальных случаях расчет производится по алгоритму расчета распределения концентрации ЗВ от одиночного точечного источника выброса

при произвольно заданных направлениях и скоростях ветра. При этом, если источник выброса расположен с наветренной стороны здания на расстоянии более $1,5 \cdot L_{зв}$, то для участков факела примеси, приходящихся на зоны ветровой тени (включая межкорпусную), расчет производится как при расположении источника выброса с наветренной стороны от ветровой тени на расстоянии $x_n \leq 1,5 \cdot L_{зв}$.

При равенстве высот ветровых теней отдельных зданий в точке расположения источника выброса в качестве L_1 выбирается наибольшая из протяженностей ветровых теней этих зданий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 N 74-ФЗ // Консорциум Кодекс [сайт]. – 2023. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901982862> (дата обращения: 25.07.2024). – Текст: электронный.
2. Шишкин, А. И. Управление качеством окружающей среды с применением геоинформационных систем : учебное пособие / А. И. Шишкин, Н. Е. Горбунов, А. В. Епифанов. – Спб.; Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 307 с. – ISBN 978-5-7422-3607-8. – Текст: непосредственный.
3. Ши Нгуен-Куок. Численные методы к решению задач математического моделирования низкотемпературной плазмы : учебное пособие / Ши Нгуен-Куок. – Москва : Изд-во МЭИ, 2016. – 98 с. – ISBN 978-5-7046-1684-9. – Текст: непосредственный.
4. Вельмисов, П. А. Дифференциальные уравнения : учебное пособие / П. А. Вельмисов, Ю. В. Покладова, Т. Б. Распутыко. – Ульяновск: УЛГТУ, 2017. – 131 с. – ISBN 978-5-9795-1771-1. – Текст: непосредственный.
5. Эварт, Т. Е. Численные методы решения дифференциальных и матричных уравнений : учебное пособие / Т. Е. Эварт, В. В. Поздьяев. – Нижний Новгород : НГТУ, 2014. – 101 с. – ISBN 978-5-502-00425-1. – Текст: непосредственный.
6. Амосова, О. А. Сборник заданий по численным методам. Дифференциальные модели : методическое пособие / О. А. Амосова, А. Е. Вестфальский. – Москва: МЭИ, 2015. – 32 с. – Текст: непосредственный.
7. Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы и океана / Г. И. Марчук, В. П. Дымников, В. Б. Залесный [и др.]. – Л.: Гидрометеиздат, 1984 – 320 с. – Текст: непосредственный.
8. Безруков, Ю. Ф. Океанология. Ч. I. Физические явления и процессы в океане / Ю. Ф. Безруков. – Симферополь: Таврический национальный университет им. В. И. Вернадского, 2006. – 159 с. – Текст: непосредственный.
9. Безруков, Ю. Ф. Океанология. Часть II. Динамические процессы и явления в океане / Ю. Ф. Безруков. – Симферополь: Таврический национальный университет им. В. И. Вернадского, 2006. – 123 с. – Текст: непосредственный.
10. Виноградов, Ю. Б. Современные проблемы гидрологии : учебное пособие / Ю. Б. Виноградов, Т. А. Виноградова. – М.: Изд-во «Академия», 2008. – 320 с. – ISBN 978-5-7695-3924-4. – Текст: непосредственный.
11. Доронин, Ю. П. Океанология шельфовой зоны / Ю. П. Доронин. – СПб., 2007. – 105 с. ISBN 978-5-86813-195-0. – Текст: непосредственный.
12. Дружинин, Н. И., Математическое моделирование и прогнозирование загрязнения поверхностных вод суши / Н. И. Дружинин, А. И. Шишкин. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 390 с. – Текст: непосредственный.
13. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод / А. В. Караушев, Б. Г. Скакальский, А. Я. Шварцман [и др.] ; под ред. А. В. Караушева. – Л.: Гидрометеиздат, 1987.

– 267 с. – Текст: непосредственный.

14. Фельзенбаум, А. И. Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений / А. И. Фельзенбаум. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 128 с. – Текст: непосредственный.

15. Кучмент, Л. С. Формирование речного стока: физико-математические модели / Л. С. Кучмент, В. Н. Демидов, Ю. Г. Мотовилов. – М.: Наука, 1983. – 216 с. – Текст: непосредственный.

16. Лапшев, Н. Н. Расчеты выпусков сточных вод / Н. Н. Лапшев. – М.: Стройиздат, 1977. – 87 с. – Текст: непосредственный.

17. Бесценная, М. А. Усовершенствование экспресс-метода расчета разбавления сточных вод в реках / М. А. Бесценная // Труды ГГИ. – 1972. – Вып. 191. – С. 201–208. – Текст: непосредственный.

18. Качество воды рек и внутренних водоемов : сборник статей ; под ред. проф. Х. А. Вельнера. – М.: [б. и.] 1972. – 100 с. – Текст: непосредственный.

19. Караушев, А. В. Методические основы оценки антропогенного влияния на качество поверхностных вод / А. В. Караушев. – Л.: Гидрометеоиздат. 1981. – 288 с. – Текст: непосредственный.

20. Руководство по организации контроля состояния природной среды в районе расположения АЭС ; под ред. К. П. Махонько. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 264 с. – Текст: непосредственный.

21. Techniques and decision making in the assessment of off-site consequences of an accident in a nuclear facility / Safety series, N.86, International Atomic Energy Agency. Vienne. 1987. 185 p.

22. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 06.06.2017 № 273 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе» // Консорциум Кодекс [сайт]. – 2017. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456074826> (дата обращения: 25.07.2024). – Текст: электронный.

23. Постановление Правительства РФ от 16 мая 2016 г. N 422 «Об утверждении Правил разработки и утверждения методик расчета выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух стационарными источниками» // Консорциум Кодекс [сайт]. – 2021. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/542630855> (дата обращения: 25.07.2024). – Текст: электронный.

24. СП 131.13330.2012 Свод правил. «Актуализированная редакция СНиП 23-01-99 Строительная климатология» // Консорциум Кодекс [сайт]. – 2013. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095546> (дата обращения: 25.07.2024). – Текст: электронный.

25. СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (утв. Приказом Минстроя России от 03.12.2016 N 891/пр). // Консорциум Кодекс [сайт]. – 2017. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (дата обращения: 25.07.2024). – Текст: электронный.

26. Бородулин, А. И. Статистическое описание распространения аэрозолей в атмосфере: метод и приложения / А. И. Бородулин, Г. М. Майстренко, Б. М. Чалдин. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского ун-та, 1992. – 123 с. – ISBN 5-7615-0194-5. – Текст: непосредственный.

27. Динамическая метеорология ; под ред. Д. Л. Лайхмана. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 602 с. – Текст: непосредственный.

$$\text{Интеграл вероятности } \Phi(\xi\sqrt{2}) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\xi\sqrt{2}} e^{-t^2} dt$$

$\xi\sqrt{2}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,000 00	011 28	022 56	033 84	045 11	056 37	067 62	078 86	090 08	101 28
0,1	112 46	123 62	134 76	145 87	156 95	168 00	179 01	189 99	200 94	211 84
0,2	222 70	233 52	244 30	255 02	265 70	276 33	286 90	297 42	307 88	318 28
0,3	328 63	338 91	349 13	359 28	369 36	379 38	389 33	399 41	409 01	418 74
0,4	428 39	437 97	447 47	456 89	466 22	475 48	484 66	493 74	502 75	511 67
0,5	520 50	529 24	537 90	546 46	554 94	563 32	571 62	579 82	587 92	595 94
0,6	603 86	611 86	619 41	627 05	634 59	642 03	649 38	656 63	663 78	670 84
0,7	677 80	684 67	691 43	698 10	704 86	711 16	717 54	723 82	730 01	736 10
0,8	742 10	748 00	753 81	759 52	765 14	770 67	776 10	781 44	786 69	791 84
0,9	796 91	801 88	806 77	811 56	816 27	820 89	825 42	829 87	834 23	838 51
1,0	842 81	846 81	850 84	854 78	858 65	862 44	866 14	869 77	873 33	876 80
1,1	880 20	883 53	886 79	889 97	893 08	896 12	899 10	902 00	904 84	907 61
1,2	910 31	912 96	915 53	918 05	920 50	922 90	925 24	927 51	929 73	931 90
1,3	934 01	936 06	938 06	940 02	941 91	943 76	945 56	947 31	949 02	950 67
1,4	952 28	953 85	955 38	956 86	958 30	959 70	961 05	962 37	963 65	964 90
1,5	966 10	967 28	968 41	969 52	970 59	971 62	972 63	973 60	974 55	975 45
1,6	976 35	977 21	978 04	978 84	979 62	980 38	981 10	981 81	982 49	983 15
1,7	983 79	984 41	985 00	985 58	986 14	986 67	987 19	987 69	988 17	988 64
1,8	989 09	989 52	989 94	990 35	990 74	991 11	991 47	991 82	992 16	992 48
1,9	992 79	993 09	993 38	993 66	993 92	994 18	994 43	994 66	994 89	995 11
2,0	995 32	995 52	995 72	995 91	996 09	996 26	996 42	996 58	996 73	996 88
2,1	997 02	997 16	997 28	997 41	997 52	997 64	997 75	997 85	997 95	998 05
2,2	998 14	998 22	998 31	998 39	998 46	998 54	998 61	998 67	998 74	998 80
2,3	998 86	998 91	998 97	999 02	999 06	999 11	999 16	999 20	999 24	999 28
2,4	999 31	999 35	999 38	999 41	999 44	999 47	999 50	999 52	999 55	999 57
2,5	999 59	999 61	999 63	999 65	999 67	999 69	999 71	999 72	999 74	999 75
2,6	999 76	999 78	999 79	999 80	999 81	999 82	999 83	999 84	999 85	999 86
2,7	999 87	999 87	999 88	999 89	999 89	999 90	999 91	999 91	999 92	999 92
2,8	999 92	999 93	999 93	999 94	999 94	999 94	999 95	999 95	999 95	999 96
2,9	999 96	999 96	999 96	999 97	999 97	999 97	999 97	999 97	999 98	999 98
3,0	999 98	999 98	999 98	999 98	999 98	999 98	999 98	999 99	999 99	999 99

Примечание. Значения целой части (т. е. 0) в таблице опущены.

Учебное издание

**Антонов Иван Владимирович
Епифанов Андрей Валерьевич**

Массоперенос в воздушной и водной средах

Учебное пособие

Редактор и корректор Д. А. Романова
Техн. редактор Д. А. Романова

Учебное электронное издание сетевого распространения

Системные требования:
электронное устройство с программным обеспечением
для воспроизведения файлов формата PDF

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 03.09.2024 г. Рег.№ 5222/24

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.