УДК 502:519.6

Рецензенты
Д-р техн..наук, профессор, зав. отделом Института технической механики НАН Украины В.П. Басс
Д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой Приднепровской академии строительства и архитектуры В.Ф. Иродов

Рекомендовано к печати Учёным Советом Днепропетровского национального университета Протокол № 3 от 31 октября 2011 г.

Абрамовский Е.Р., Карплюк В.И., Переметчик Н.Н.
Атмосфера больших городов. Изд 2-е, исправленное и дополненное – Дн-ск: Наука и образование, 2011. – 350 с.
ISBN

В книге представлен анализ состояния воздушной среды на территории больших городов и индустриальных центров в зависимости от экологических особенностей их территорий, метеофакторов, особого характера источников вредных выбросов и специфики городской подстилающей поверхности. Приводятся данные о современной экологической ситуации в отдельных городах и регионах Украины и сведения об основных направлениях общенациональной и региональной экологической политики. Представлены математические модели процессов переноса вредных примесей в воздушной среде и приведены примеры расчета концентрации вредных веществ, поступающих в атмосферу от различных источников.

Для научных работников, аспирантов и лиц, занимающихся практической деятельностью в области охраны окружающей среды.

Абрамовський Є.Р., Карплюк В.І., Переметчик М.М.
Атмосфера великих міст.Вид.2-е, доповнене і виправлене – Дн-ськ.: Наука і освіта, 2011. – 350 с.
ISBN

У книзі подається аналіз стану повітряного середовища на території великих міст і індустріальних центрів в залежності від екологічних особливостей їх території, метеофакторів, особливого характеру джерел шкідливих викидів та специфіки міської поверхневої структури. Приведено дані про сучасну екологічну ситуацію в окремих містах і регіонах України й відомості про основні напрямки загальнонаціональної і регіональної екологічної політики. Подано математичні моделі процесів переносу шкідливих домішок у повітряному середовищі і приведено приклади розрахунку концентрації шкідливих речовин, що поступають в атмосферу від різних джерел..

Для наукових співробітників, аспірантів, і осіб, які займаються практичною діяльністю в галузі охорони навколишнього середовища.

Книга издается в авторской редакции
ISBN
© Абрамовский Е.Р., Карплюк В.И., Переметчик Н.Н.
© Издательство «Наука и образование»

Е.Р. Абрамовский
В.И. Карплюк
Н.Н. Переметчик

АТМОСФЕРА

БОЛЬШИХ ГОРОДОВ

Наука и образование
Днепропетровск
2011

Посвящается памяти профессора В.К. Хруща

Для развития науки требуется в каждую данную эпоху не только, чтобы люди мыслили вообще, но чтобы они концентрировали свои мысли на той части обширного поля науки, которое в данное время требует разработки.

Дж. Максвелл

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ 6
ВВЕДЕНИЕ 8
1 ЗЕМНАЯ АТМОСФЕРА 14
1.1 Уникальная среда 14
1.2 Общие данные 15
1.3 Вертикальная структура 16
1.4 Солнце и атмосфера 18
1.5 Атмосфера над городом 19
2 МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ХАРАКТЕР МИГРАЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ 21
2.1 Общие замечания 21
2.2 Теплообмен в атмосфере 23
2.3 Вертикальный профиль температуры 24
2.4 Ветер 29
2.4.1 Законы атмосферной циркуляции 29
2.4.2 Силы, определяющие перемещение воздушных масс 31
2.4.3 Ветровые системы 37
2.4.4 Характеристики ветрового потока 42
3 ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ 47
3.1 Урбанизация и экология 47
3.2 Особенности городских источников загрязнения воздуха 49
3.3 Подстилающая поверхность 51
3.4 Характер воздушных потоков 52
3.5 Среднегодовые и сезонные температуры воздуха 54
3.6 Солнечная радиация 55
3.7 Уровень влажности, образование туманов и осадки 56
3.8 Городские смоги 58
3.9 Влияние городов на региональные и глобальные изменения в атмосфере 60
3.10 Моделирование подстилающей поверхности городской территории 64
3.11 Аэрология объектов городской застройки 68
4 ОСНОВНЫЕ ЗАГРЯЗНЯЮЩИЕ ВЕЩЕСТВА 79
4.1 Происхождение и классификация 79
4.2 Окись углерода (угарный газ) 85
4.3 Окиси серы 86
4.4 Окиси азота 86
4.5 Углеводороды 87
4.6 Продукты фотохимических реакций 87
4.7 Пылевые выбросы 88
4.8 Диоксины 91
4.9 Радионуклиды. Ионизирующее излучение 93
4.10 Биополютанты 96
4.11 Комбинированные загрязнения 98
5 ИСТОЧНИКИ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ 104
5.1 Классификация источников 104
5.2 Основные показатели по объёмам выбросов 105

5.3 Тепловые электростанции и теплоэлектроцентрали 107
5.4 Черная и цветная металлургия. 110
5.5 Химическая промышленность. 115
5.6 Производство строительных материалов. 118
5.7 Атомные станции и другие источники радионуклидов 120
5.8 Подвижные источники 121
6 ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ В ОТДЕЛЬНЫХ ГОРОДАХ И РЕГИОНАХ УКРАИНЫ 126
6.1 Общая характеристика..... 126
6.2 Основные показатели по атмосферным выбросам..... 128
6.3 Загрязнение атмосферы в отдельных областях 132
6.4 Пример анализа экологической ситуации в отдельном городе 140
7 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ 149
7.1 Физические основы..... 149
7.2 Основные уравнения конвективной диффузии 154
7.3 Особенности миграции атмосферных загрязнений в условиях большого города и их моделирование..... 174
7.4 Численные методы решения задачи переноса загрязнений в городской атмосфере..... 205
7.5 Аналитические и приближенные методы..... 214
7.6 Варианты упрощенных решений уравнения конвективной диффузии..... 228
7.6.1 Вводные замечания..... 228
7.6.2 Точечный наземный источник 230
h
7.6.4 Линейные источники..... 234
7.6.5 Нестационарная диффузия от точечного источника 236
7.6.6 Диффузия неконсервативной примеси 237
7.6.7 Залповый выброс загрязнений в атмосферу..... 238
7.7 Некоторые прикладные задачи по расчету загрязнения городской воздушной среды 240
7.7.1 Анализ загрязнения городской атмосферы от сложной сети автомагистралей 240
7.7.2 Метод локализации для расчета концентрации 246
7.7.3 Расчет локальных течений загрязнённого воздуха в окрестности отдельных городских объектов 250
7.8 Численный расчет обтекания типовых городских объектов……269
8 ПУТИ И МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИТЕЛЕЙ БОЛЬШИХ ГОРОДОВ 278
8.1 Технологические средства контроля вредных выбросов..... 278
8.2 Основы государственной экологической политики..... 289
8.3 Стандартизация и метрология в обеспечении качества атмосферного воздуха. 292
8.4 Нормирование вредного воздействия на природную среду. 294
8.5 Экономические рычаги в экологической политике. 302
8.6 Региональная экологическая стратегия и её реализация 305
ДУМАЯ О БУДУЩЕМ 316
ЛИТЕРАТУРА 330

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Первое издание книги вышло в 2007 г и к настоящему времени уже стало библиографической редкостью. Авторам приятно осознать, что оно было благожелательно встречено читателями.

Похвальные отзывы были получены от нескольких известных специалистов в данной отросли. В 2008 г книга была представлена на областной конкурс научных публикаций и учебных пособий для ВУЗов и заняла второе место по категории «Монографии». Авторы осознают, что в положительных отзывах на книгу речь вовсе не идет об их прямых заслугах, т.е. о таких вещах, как характер изложения материала или о других, чисто технических нюансах. Как отмечают читатели, основным достоинством книги является важность рассматриваемой проблемы. В самом деле, экологическая ситуация в больших городах и индустриальных центрах Украины (а вобщем-то и во всем мире) продолжает ухудшаться. При этом наиболее заметный экологический урон несет воздушная среда городов. Поэтому любое обращение к данной теме (как с теоретическим анализом, так и с выработкой практических рекомендаций) представляют несомненный интерес. Во второе издание были внесены необходимые изменения и оно было существенно дополнено. Дополнения коснулись, прежде всего, главы 7, в которой излагались теоретические основы расчета концентрации вредных веществ в воздушной среде. В соответствующей главе нового издания, кроме изложения аналитических методов, дополнительно излагаются и более точные, численные решения дифференциальных уравнений турбулентного переноса. Кроме того, аналитические методы, в свою очередь, были дополнены новыми материалами. Приводится методика расчета движения загрязненного воздуха в так называемом «городском лабиринте», т.е. в нижнем атмосферном слое, где расположены здания, сооружения, растительные массивы и т.п. В этой методике предлагаются решения на основе аналогии с теорией фильтрации жидкости в пористой среде. В работе размещен новый материал, касающийся аналитического моделирования городской подстилающей поверхности, а также проблем аэрологии городских зданий и сооружений. Отдельно рассматривается проблема комбинированного загрязнения воздушной среды городов как антропогенными так и природными (биологическими) полютантами. Известно, что в городской атмосфере всегда находится одновременно

целый комплекс вредных примесей, поступающих в среду от разных источников. Одним из таких источников в теплое время года могут быть «пылящие» растения (амброзия, полынь и т.п.), вредное воздействие которых нельзя не учитывать. Не требует доказательства тот факт, что именно городские жители в наибольшей степени подвергаются такому совокупному типу вредного воздействия.

В работе приведены более новые сведения, опирающиеся на данные государственной статистики о загрязнении воздушной среды в городах и регионах Украины за последние годы.

Во втором издании использована часть новых публикаций по рассматриваемой проблеме. Сюда же включены новые разработки научного коллектива, в котором работают Абрамовский Е.Р. и Карплюк В.И. Как и ранее, в качестве примера более подробного анализа состояния воздушной среды рассматривается экологическая ситуация в г. Днепропетровске, данные о которой представлены Переметчиком Н.Н.

Авторы благодарят читателей за поступившие в наш адрес критические замечания, касающиеся первого издания, и будут признательны всем, кто выскажет замечания по новой работе, которая, как мы надеемся, увидят свет в текущем году.

Е.Р. Абрамовский
В.И. Карплюк
Н.Н. Переметчик

Октябрь 2011 г.

ВВЕДЕНИЕ

Мир достаточно велик, чтобы удовлетворить нужды любого человека, но мир слишком мал, чтобы удовлетворить людскую жадность.
Махатма Ганди

Когда природе надоест
Давиться ядом и обидой,
Она заявит свой протест,
Как это было с Атлантидой
И. Губерман

Известно, что хозяйственная деятельность человека, направленная на улучшение и умножение жизненных благ, неразрывно связана с исчерпанием земных ресурсов и загрязнением окружающей среды. В свою очередь это приводит к деградации растительного и животного мира, разрушению материальных ценностей и к негативным глобальным изменениям характеристик так называемой биосферы. В конечном счете, получается замкнутый круг: погоня за новыми благами ведет неотвратимо к ухудшению условий жизнедеятельности.

В оценке результатов антропогенного воздействия на среду специалисты уже давно разделились на два лагеря: оптимистов и пессимистов. Оптимисты утверждают, что человек, “Homo sapiens”, т.е. думающее существо, вглядываясь в будущее, рано или поздно опомнится, установит границы разумного потребления и направит усилия на компенсацию вреда, наносимого им окружающей среде. Пессимисты же утверждают (на основе предшествующего горького опыта), что человечество уже превысило допустимый предел возмущения биосферы и вступило на путь неустойчивого развития. Алчная деятельность производителей материальных благ, направленная на получение максимальных прибылей, может, в конечном счете, привести к печальному финалу, т.е. к самоуничтожению человеческой цивилизации.

К большому сожалению, число пессимистов непрерывно нарастает и дискуссия переходит из плоскости «за и против технологического прогресса» в плоскость «когда наступит критический момент», т.е. та ситуация, при которой деградация человеческой цивилизации станет необратимой. Здесь можно было бы привести, в качестве примера, прогнозов на будущее, мнение ученых НАСА

(Национального агентства по аэронавтике и космонавтике США). На основе исследований, проведенных в 1973 г., они утверждают, что через 100 лет на Земле наступит «нижняя граница выживания».

В связи нарастанием техногенной нагрузки на окружающую среду следует отметить, что наибольшая опасность в этом смысле угрожает, прежде всего, жителям больших городов, крупных индустриальных центров или так называемых мегаполисов. И это понятно, потому что именно на этих территориях объемы вредных примесей, поступающих в атмосферу, в водную среду и в грунт, наиболее значительны, а плотность населения наиболее высокая.

И если поступление загрязнения в грунт в принципе можно как-то регулировать, забор чистой (питьевой) воды можно организовать за пределами мегаполиса, то очистку атмосферы над городом осуществить невозможно.

При этом следует отметить, что масса атмосферного воздуха, поступающего в человеческий организм в процессе жизнедеятельности (примерно 9 кг в сутки), превышает массу потребляемой пищи (примерно 1,5 кг) и массу воды (примерно 2,5 литра). Кроме того, известно, что человек может обойтись без пищи несколько недель, без воды – несколько дней, а без воздуха всего несколько минут. Единственный путь к улучшению ситуации – это ограничение вредных выбросов в атмосферу, особенно в периоды неблагоприятных метеорологических условий. С этой целью необходимо предпринимать целый комплекс упреждающих мер: проводить непрерывные инструментальные замеры концентраций вредных ингредиентов; выполнять расчетный анализ динамики распространения загрязнений от заданной комбинации подвижных и неподвижных источников; вести метеорологический мониторинг; принимать оперативные решения по ограничению выбросов и другие упреждающие меры.

Защита окружающей среды в целом включает в себя широкий комплекс целенаправленной деятельности человеческого общества, основными компонентами которого являются:

- ограничение вредных антропогенных выбросов в атмосферу гидросферу и литосферу;
- защита животного и растительного мира от деградации, связанной с загрязнением и нерациональным использованием природной среды;

- рекреационная деятельность по восстановлению и оздоровлению нарушенных природных ареалов;
- экологический мониторинг;
- законодательное, юридическое и организационное обеспечение природоохранной деятельности на государственном и муниципальном уровнях;
- научная, образовательная и информационная деятельность в области экологии;
- медико-биологические меры направленные на адаптацию человека к условиям жизни в неблагоприятной экологической обстановке и выработка систем жизнеобеспечения в среде его обитания;
- участие в международных экологических проектах и общественно-политическая деятельность, направленная на защиту окружающей среды и предотвращения необратимых изменений погоды и климата на Земле.

Как было отмечено, наиболее сложная экологическая ситуация в настоящее время складывается в больших городах (мегаполисах) и крупных индустриальных центрах. Украина в этом смысле не является исключением. В пределах ограниченной территории, на которой располагается город, как правило, сосредоточено огромное количество источников выбросов.

Данная работа в своей теоретической части посвящена освещению одной из главных проблем экологического мониторинга, а именно: расчетному анализу состояния и динамики изменения концентрации вредных примесей в атмосфере города, в зависимости от характера и интенсивности источников, типа подстилающей поверхности, изменяющихся метеоусловий и других факторов.

Вводные разделы работы посвящены описанию свойств земной атмосферы, метеорологических факторов, которые определяют характер распространения воздушных загрязнений, основных источников вредных выбросов, а также физико-химических и токсических свойств веществ, загрязняющих окружающую среду.

Отдельно рассмотрены экологические особенности городских территорий, а также уровень загрязнения природной среды в отдельных городах и регионах Украины. В завершающих разделах приведен анализ основных путей и методов обеспечения экологической безопасности жителей больших городов.

Предлагаемая читателям работа является научным изданием, однако авторы стремились придать ей в некоторой степени популярный характер с той целью, чтобы она оказалась полезной в экологическом образовании заинтересованных лиц. Предполагается, что она может быть использована экологами в их практической деятельности. Отдельная часть (а именно глава 7) содержит материал, который предназначен в основном для специалистов, поскольку содержит физические предпосылки и математические выкладки.

При написании работы использовано значительное число литературных источников, статистические данные правительственных органов, а также отдельные материалы, размещенные в сети Интернет. Сюда следует отнести монографические и другие материалы общего характера [27, 29, 20, 36 – 38, 51, 54, 59, 62, 63, 66, 67, 69, 86, 90, 91, 94, 96, 97, 98, 99, 102, 103, 107, 109, 115, 116, 126, 127, 130, 133, 138, 143, 146, 148, 150, 156, 157, 160, 161, 162, 164, 165, 169, 170, 172, 209], работы, посвященные проблемам анализа загрязнения воздушной среды [24, 25, 30, 34, 45, 46, 49, 50, 52, 53, 56, 57, 58, 60, 61, 64, 78, 83, 100, 101, 104, 105, 111, 114, 117, 125, 128, 129, 131, 134, 140, 147, 163, 185, 192, 200, 201, 203, 208, 210, 211], работы, освещающие особенности атмосферных явлений на территории больших городов [23, 26, 28, 31, 32, 35, 43, 44, 47, 48, 68, 70, 71, 79, 82, 85, 87, 88, 92, 93, 95, 106, 112 132, 137, 139, 141, 142, 187, 188, 189, 194, 195, 204, 205, 206, 207], публикации, которые содержат данные об экологической ситуации в отдельных регионах Украины [55, 108, 110, 136, 151, 158, 159, 166, 167,168, 171, 212]. В последнее время теория обтекания полупрозрачных тел (по англ. Easily penetrable roughness), которые первоначально использовались в разных инженерных приложениях, находит все более широкое применение и в решении экологических задач [174, 175, 176, 177, 179 – 184, 186, 190, 191, 193, 196, 197, 198, 199, 202]. В частности речь идет о применении этой теории для расчета течений загрязненного воздуха на плотно застроенных участках городской территории.

Определенная часть исследований, в которых излагаются математические модели процессов распространения загрязнений в воздушной среде, выполнена в научном коллективе Днепропетровского национального университета под руководством профессора Хруща В.К., который в названном колективе стал основателем на-

учного направления, посвящённого проблемам математического моделирования процессов распространения техногенных загрязнений в природной среде [1 – 22, 72 – 77, 80, 81, 89, 119 – 124, 135, 144, 149, 152 – 155]. Значительная часть работ в данном направлении была выполнена в тесном сотрудничестве с Днепропетровским техническим университетом железнодорожного транспорта [39, 40, 41, 42, 84, 145, 178].

Специалистам известно, что процесс распространения загрязнений в воздушной среде описывается дифференциальным уравнением турбулентного переноса. Процесс математического моделирования включает численные и аналитические решения этого уравнения. В данной работе, в отличии от первого издания, включен материал, посвященный основам численного моделирования процесса миграции атмосферных загрязнений, хотя теоретический анализ в основном опирается на аналитические методы, которые в принципе позволяют делать довольно точные оценки состояния воздушной среды на территории городов. Здесь же приводятся примеры расчётов и их анализ.

Цитируемые публикации позволяют заметить, что проблемой загрязнения природной среды, и, в частности, атмосферы, занимаются учёные во многих странах мира. В Украине научными исследованиями в области аэрогидродинамических проблем экологии занимается значительное число специалистов в научно-исследовательских и учебных заведениях. Сюда следует отнести: Институт гидромеханики НАН Украины, Институт проблем природопользования и экологии НАН Украины, Институт проблем рынка и экономикоэкологических исследований НАН Украины, Институт геохимии окружающей среды НАН Украины, Научно-исследовательский институт гидрометеорологии и другие, а также большинство университетов и инженерных вузов страны.

В последние годы по инициативе Института гидромеханики НАН Украины (акад. Гринченко В.Т., проф. Гаев Е.А.) намечались пути координации исследований по проблеме Air of Ukrainian Cities (воздух городов Украины) с привлечением к совместной деятельности научно-исследовательских коллективов (Киев, Одесса, Харьков, Днепропетровск) и с выходом на возможное сотрудничество с международными организациями такими как ESF (Europian Sistems Foundation) и т.п. К сожалению, по разным причинам, такая координация все еще не осуществляется, хотя очень необходима. В этом

русле важным является предложение ректора Одесского государственного экологического университета проф. Степаненко С.Н. С подробным изложением программы исследований, размещенной на сайте в системе «ИНТЕРНЕТ».

С целью конкретизации анализа экологического состояния среды в данной работе многие исходные для анализа параметры (источники загрязнений, местные метеоусловия, топография и т.п.) приняты близкими к тем, которые характерны для города Днепропетровска, хотя истинные данные в какой-то степени отличаются от реалий.

Авторы считают своим долгом выразить искреннюю благодарность доктору физико-математических наук проф. Гоману О.Г. за внимательное ознакомление с рукописью и сделанные ценные замечания, а также младшим научным сотрудникам Загний О.А. и Варшавской И.Г., а также заведующему научной лабораторией Гринчишину Ю.А. за участие в исследованиях и техническую помощь в подготовке работы к печати. Особой благодарности заслуживают рецензенты работы: д.т.н. Басс В.П. и д.т.н. Иродов В.Ф., которые взяли на себя труд внимательно ознакомится с рукописью и высказать полезные замечания.

Выпуская данную работу в свет, хотелось бы внушить читателям и соответствующим органам одну мысль: экологическая ситуация в крупных индустриальных центрах страны не просто тревожна, а критически опасна, потому, что мы уже приближаемся к роковой черте. Вводную часть работы хотелось бы завершить призывом: «Давайте вместе постараемся притормозить перед пропастью, чтобы оздоровить атмосферу городов, обеспечить безопасную жизнь для себя и для следующих поколений».

1 ЗЕМНАЯ АТМОСФЕРА

Предзнаменований не бывает. Природа не посылает вестников – для этого она слишком мудра, или слишком безжалосна.

Оскар Уайльд

На других планетах Солнечной системы нет жизни потому, что цивилизация там развивалась более быстрыми темпами, чем на Земле

N N

1.1 Уникальная среда

Земная атмосфера является основной средой обитания и жизнедеятельности человека. Воздух, которым мы дышим (и отравляем в процессе хозяйственной деятельности), наряду с водой и пищей, является основным продуктом нашего потребления. Исходя из этого, можно считать, что сознательное отношение к окружающей нас воздушной среде предполагает необходимость знания структуры и основных процессов, происходящих в атмосфере.

Атмосфера Земли, с точки зрения ее состава, является уникальным явлением в Солнечной системе (а может быть и во всей Вселенной). Известно, что все планеты этой системы, кроме Меркурия, а также некоторые их спутники имеют газовую оболочку, однако состав этой оболочки отличается от земного воздуха.

К примеру, атмосферы Венеры и Марса состоят в основном из углекислого газа, причем плотность венерианской атмосферы примерно во сто раз превышает земную, а плотность атмосферы Марса, наоборот, примерно во столько же раз меньше земной. Атмосферы же других планет по составу близки к первичному веществу Вселенной, т.е. содержат преимущественно водород и гелий.

Уникальность земной атмосферы обусловлена существованием на нашей планете органической жизни – растительного и животного мира. Причем этот мир очень чувствителен к малейшим изменениям состава и других параметров воздушной среды. В связи с этим, на человека, как сознательного представителя животного мира, самой природой возложена обязанность сохранить, в меру его возможностей, первозданную чистоту среды обитания. Более правильно можно было бы сказать, что человек должен способствовать сохранению давно установившегося равновесия в сложной динами-

ческой системе, составным элементом которой является земная атмосфера.

1.2 Общие данные

Атмосфера представляет собой довольно тонкую и, вообще-то хрупкую, оболочку, покрывающую земной шар. В самом деле, основная масса воздуха (99%) сосредоточена в слое толщиной всего 30 км. Если земной шар сравнить с учебным глобусом диаметром 25 см, то преобразование масштаба покажет нам, что толщина плотного воздушного слоя вокруг глобуса будет всего 0,75 мм. Атмосфера удерживается около поверхности силой гравитации. При этом часть атмосферной массы непрерывно улетучивается в космическое пространство. В то же время происходит постоянное газообразование в поверхностном слое Земли и пополнение ее массы за счет бомбардировки ее космическими частицами. Как видно, здесь, как и везде в природе, устанавливается состояние, близкое к тому равновесию, о котором говорилось ранее.

Масса атмосферного воздуха составляет примерно 5000 триллионов тонн ($5 \cdot 10^{15}$ т). Вблизи поверхности Земли незагрязненный воздух содержит (по объему) 78,09% азота, 20,95% кислорода, 0,93% аргона, 0,03% углекислого газа и много других газов, объемное содержание которых ничтожно мало. Кроме того, в атмосфере содержится переменное содержание водяных паров, концентрация которых может достигать 4%. По приближенным расчетам в атмосфере содержится не менее 10 трлн. тонн водяных паров, т.е. примерно 200 т на 1 га поверхности Земли.

Для удобства анализа вводят понятие «нормальных атмосферных условий», т.е. фиксированных значений давлений и температур в приповерхностном слое. Нормальное давление равно 10^5 Па (Паскалей) или 760 мм ртутного столба, нормальная температура равна 15^0С или 288^0К (Кельвина). Атмосфера – это вместилище и творец великой цепи событий, происходящих на земном шаре. Здесь разыгрывается величественный спектакль с участием грозных сил природы. Атмосфера защищает нас от перегрева на солнечной стороне и переохлаждения на теневой стороне. Она защищает нас от жесткого солнечного излучения и мощного метеорного потока, обеспечивает необходимую циркуляцию воздуха, а также тепло – и влагообмен между различными географическими поясами. Через

посредство атмосферных процессов формируется климат и погода. Наконец, атмосфера обеспечивает жизненный цикл для растений и животных. При этом, наряду с полезными для человека явлениями (устойчивая погода, благодатный дождь, свежий ветер), здесь реализуются и грозные силы природы – разрушительные ураганы, грозы, мощные ливни, снегопады, град, опасные штормы в мировом океане и испепеляющие засухи на материках.

1.3 Вертикальная структура

Параметры воздушной массы существенно изменяются по мере удаления от поверхности Земли. Можно показать, что в условиях статического равновесия элементарная частица атмосферного газа удерживается на определенной высоте под действием двух основных сил. Вниз (по направлению к центру Земли) на нее действует сила тяжести, а вверх – сила избыточного давления. Дело в том, что давление в нижней части атмосферного столба выше, чем в верхней. Если приближенно разрешить уравнение равновесия, то получится, что давление и плотность убывает с высотой по экспоненциальному закону. Так, если взять отношение давления на высоте к давлению на поверхности Земли (условно – на уровне моря), то получим, что оно равно 1,000 на нулевой высоте, $8{,}3475 \cdot 10^{-4}$ и $3{,}1987 \cdot 10^{-7}$ соответственно на высотах 50 км и 100 км. Значение плотности на этих высотах равно соответственно: 1,000; $8{,}7788 \cdot 10^{-4}$; $4{,}4075 \cdot 10^{-7}$. Верхняя граница разреженной атмосферы не может быть четко обозначена. Так, большая часть орбитальных комических аппаратов движется на высоте 300 – 500 км, при этом они испытывают определенное, хотя и очень малое, сопротивление внешней среды. Расчетом сил и моментов, которые на них действуют, занимаются специалисты в области аэродинамики разреженных газов. Наличие атмосферы косвенно регистрируется на высоте 1100–1200 км. Именно здесь начинается торможение космических тел (метеоров), входящих в атмосферу.

Считается, что следы атмосферного газа имеются на высотах 20 тысяч км, а далее уже следует межпланетная плазма. Толщина атмосферы у экватора несколько больше, чем у полюсов в результате действия центробежных сил, возникающих при вращении Земли вокруг оси.

Таким образом, давление и плотность изменяются с высотой по довольно простому закону. Этого нельзя сказать о температуре. Здесь закономерность значительно сложнее и, в зависимости от характера изменения температуры, атмосферу подразделяют на несколько слоев. Первый, самый нижний (0 – 11 км), называют тропосферой, далее следуют: стратосфера – до высот 50 – 55 км, мезосфера – до высот 80 – 85 км, термосфера – до высот 1000 км и экзосфера – свыше 1000 км.

Тропосфера, где содержится 80% массы воздуха, характеризуется постоянным снижением температуры по мере поднятия вверх. В пределах тропосферы воздух нагревается за счет инфракрасного излучения от нагретой Солнцем Земли и активного перемешивания. На каждые 100 м поднятия температура падает примерно на $0{,}6^0$С. На границе тропосферы она равна примерно 30^0С ниже нуля. В стратосфере (где содержится 10% массы), температура вначале продолжает падать до 50 – 60^0С ниже нуля, а затем несколько повышается за счет поглощения ультрафиолетового излучения в слое озона, который в небольших количествах образуется на этих высотах. Мезосфера характеризуется дальнейшим понижением температуры за счет инфракрасного излучения частиц. И, наконец, в термосфере и экзосфере температура непрерывно повышается за счет активного поглощения энергии Солнца. Собственно на этих высотах температура не может быть замерена экспериментальным путем, а определяется в расчетах как мера кинетической энергии молекул.

Химический состав атмосферы мало изменяется по высоте, однако, начиная с высоты 200 км, происходит диссоциация молекул (распад молекул на атомы) и ионизация среды, что приводит к уменьшению среднего молекулярного веса и образованию заряженных частиц.

Для удобства в расчетах движения летательных аппаратов и других целей вводится понятие стандартной атмосферы, которая фиксируется определенным государственным стандартом. Она представляет собой совокупность заданных таблично зависимостей давления, плотности, температуры и других параметров от высоты для условно усредненной атмосферы.

1.4 Солнце и атмосфера

Все глобальные физические явления на Земле обусловлены потоком энергии, поступающей от Солнца. Раскаленная звезда с массой в $1{,}99 \cdot 10^{30}$ кг излучает в космос громадную энергию. Небольшая часть этой энергии поступает на Землю, поглощается атмосферой, материками и океанами и частично отражается назад в космическое пространство. На Землю поступает энергетический поток в 200 триллионов кВт. За сутки земная поверхность получает такое количество тепла, которое можно было бы получить, если сжигать нынешние суточные расходы топлива в течение 1000 лет.

В процессе генерации всех видов излучения (гамма-лучи, видимый свет, рентгеновские, ультрафиолетовые, инфракрасные лучи и радиоволны) Солнце ежесекундно теряет 4 млн. тонн своей массы. Максимум интенсивности радиации приходится на длины волн в диапазоне от 0,4 мкм до 0,8 мкм (видимая часть спектра электромагнитных волн). Количество солнечного тепла измеряют поступлением энергии на 1 $см^2$ перпендикулярный к лучу поверхности за 1 мин. В среднем получается 7,86 дж/мин$\cdot$$см^2$.

Среднее значение обозначено по той причине, что Земля движется вокруг Солнца не по круговой, а по эллиптической траектории, максимально удаляясь от него в начале июля и максимально приближаясь – в начале февраля. Средняя скорость движения Земли по орбите равна примерно 30 км/с.

Движение Земли вокруг Солнца и вращение вокруг собственной оси приводит к тому, что земная поверхность нагревается неравномерно, что вызывает мощные динамические явления в атмосфере и в океане. Определенное влияние на эти процессы оказывает и вращение Солнца вокруг оси с периодом 27 земных суток.

Исследователи уже давно установили, что количество энергии, поступающей на Землю со стороны Солнца, периодически меняется. Поводом для тщательного изучения этого явления послужили многие факторы, одним из которых была повторяемость засух в определенных районах Земли. Проанализировав возникновение засух, начиная с 1600 года, ученые установили, что они повторяются с периодом, примерно 22 года. Это натолкнуло на мысль связать данное явление с периодом изменения активности Солнца. Известно, что максимум солнечной активности наблюдается каждые 11 лет. Такие максимумы были отмечены, к примеру, в 1947 – 48 гг.,

1957 – 58 гг.,1968 – 69 гг., 1980 – 81 гг., 1991 – 92 гг. В период максимума Солнце очень неспокойно, на нем возникают громадные вихревые зоны (пятна) и взрывы в поверхностном слое, называемые протуберанцами. При этом образуются сильные магнитные поля, в которых направление силовых линий меняется на противоположное каждые 11 лет, т.е. с периодом 22 года. Этот факт еще раз подтвердил, что земные явления (геомагнитная активность, ветер, температура, влажность и т.п.) связаны с уровнем активности Солнца. Если ранее для предсказания погоды ограничивались наблюдением ситуации в тропосфере (т.е. до высоты 10 – 15 км), то впоследствии пришлось расширить наблюдения на более дальние расстояния, т.е. до 150 млн. км (расстояние до Солнца).

Известно, что распространение загрязнений в атмосфере, и особенно прогнозирования этих явлений, зависит от метеорологических условий. Если говорить о воздействии внешних факторов на здоровье человека, то речь идет не только о влиянии окружающей среды, но и о таких явлениях, как, например, возмущение магнитного поля (магнитные бури) и особенно об их неблагоприятных сочетаниях. Поэтому нельзя рассматривать изолированно только механику движения вредных примесей в атмосфере, но следует брать во внимание и сопутствующие им явления более крупного масштаба.

1.5 Атмосфера над городом

Локальные значения атмосферных параметров существенно зависят от типа подстилающей земной поверхности. Понятно, что параметры атмосферы над океаном и над материком будут отличаться. Характерные отличия имеет и приземный атмосферный слой (обычно от высот $h_0 = 2 \div 3$км) над большим городом. Прежде всего особенности этого слоя обусловлены локальными приземными значениями температуры и характером её изложения по высоте. Температура на территории города, как правило, выше, чем над сельской местностью. Над городом чаще образуется слой температурной инверсии, а пределах которого температура повышается с высотой (т.е. изменяется в противоположном направлении). Над городской территорией реализуются отличные от других территорий значения влажности. Воздушные потоки над городом обусловлены такими факторами, как характер застройки, степень нагрева

поверхности, вызывающими вертикальный подъём воздушных масс и способствующие притоку воздуха из периферии. Физико-химический состав атмосферы характеризуется наличием более высокой концентрации твердых (пылевых) частиц, аэрозолей и газообразных антропогенных полютантов. В воздушном бассейне над городами происходят своеобразные химические реакции. Более подробные сведения о воздушной среде над городом содержатся в главе 3.

Возушные потоки в приземном слое атмосферы над городом отличаются определенным своеобразием. Иногда такие потоки определяют как заторможенное движение в т.н. «городском лабиринте», или в полупроницаемом пространстве. Более подробное описание и математическое моделирование приведено в последующих главах.

2 МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ХАРАКТЕР МИГРАЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Мы изменили своё окружение настолько, что теперь должны изменить себя, чтобы жить в этом окружении.

Норберт Винер

Ветер есть дыхание природы.

Козьма Прутков

2.1 Общие замечания

Метеорологические факторы являются определяющими в анализе распространения вредных примесей в атмосфере. Следует отметить, что метеоусловия необходимо учитывать не только в процессе прямого анализа и расчета трассы движения загрязнений. Прогноз так называемых аномальных метеоситуаций важен еще в большей мере, поскольку позволяет предусмотреть появление критических периодов на рассматриваемой территории с точки зрения возможного превышения порогового уровня концентрации вредных веществ.

Рассмотрим некоторые из наиболее важных метеофакторов.

Температура – мера кинетической энергии беспорядочного(теплового) движения частиц вещества. В метеорологии оперируют такими данными: температура приповерхностного слоя и характер её изменения, вертикальный профиль температуры (вертикальный градиент), среднегодовые (среднесезонные) значения температуры, температура отдельных участков территории и другие характеристики. Температура обычно измеряется в градусах Цельсия (t^oC) или Кельвина (T^oK), причём

$$T^oK = t^oC + 273^o.$$

Ветер – горизонтальное перемещение воздушных масс. Здесь представляют интерес такие факторы: скорость и её изменение, направление движения, вертикальный профиль скоростей, тип ветрового потока (циклон, антициклон и т.п.), состояние ветрового пограничного слоя, роза ветров, частота повторяемости скоростей и

ряд других параметров. Скорость ветра обычно измеряется в м/с или км/ч.

Влажность – плотность водяного пара, т.е. его масса в единице объема воздуха. Может быть абсолютной и относительной. Единицей измерения влажности обычно является относительная влажность, т.е. выраженное в процентах отношение замеренной упругости пара к упругости насыщенного пара при данной температуре. Равновесием насыщения называется такое состояние, когда количество молекул пара, покидающих поверхность жидкости, равно количеству возвращающихся обратно.

Давление – это приложенная в направлении нормали к единице поверхности сила, вызванная соударением молекул с данной поверхностью. Атмосферное давление в заданной географической точке физически представляется как давление всего атмосферного столба над рассматриваемой точкой. Кроме абсолютного значения давления *p*, важным параметром является его градиент, т.е. изменение давления, отнесенное к единице длины в каком-либо направлении. В отличие от давления, которое считается скаляром, градиент давления является вектором. Он направлен в сторону уменьшения давления. Существует значительное число единиц измерения давления: атмосферы, миллиметры ртутного столба, бары, Паскали и другие. К примеру, давление в 760 мм рт.ст. равно 10^5 Паскалей.

Плотность – масса газа, заключенная в единице объёма. Плотность связана с давлением и температурой среды. Эта связь описывается так называемым уравнением состояния

Облачный покров. Облака состоят из конденсированных водяных паров или кристалликов льда (на больших высотах). Характер облачного покрова во многом определяет метеорологическую ситуацию у поверхности Земли и влияет на процессы распространения вредных атмосферных примесей.

Осадки в виде дождя, дождя с градом и снега существенно влияют на состав загрязненного атмосферного воздуха. Жидкие осадки измеряются в миллиметрах (столба жидкости).

Туман – взвешенные в воздухе капельки влаги (в основном воды), химический состав которых в общем случае зависит также от типа и концентрации вредных примесей. Туман располагается в пределах слоя, прилегающего к поверхности.

Интенсивность солнечной радиации (**инсоляция**) измеряется количеством лучистой энергии (в Джоулях, калориях и т. п.),

приходящейся на единицу поверхности (см^2, м^2) в единицу времени (секунду, минуту).

Устойчивость атмосферы. Под устойчивостью понимают способность воздушной среды препятствовать вертикальным движениям и сдерживать турбулентность перемешивания. В неустойчивой атмосфере происходят мощные вертикальные перемещения воздуха.

Параметры рассеивания загрязнителей в атмосфере, или т.н. коэффициенты дисперсии σ_x, σ_y, σ_z зависят от показателей устойчивости. Приближенные соотношения для их расчета приведены далее.

Состав атмосферы. Изменение состава атмосферы относят в основном к глобальным метеорологическим факторам. Имеются ввиду, к примеру, естественные и техногенные явления, приводящие к изменению концентрации углекислого газа, разрушению озонового слоя в атмосфере и другие. Локальные параметры атмосферы, и в том числе ее состав, может зависеть также от природного или же антропогенного загрязнения среды.

Запылённость атмосферы – характеризуется уровнем концентрации взвешенных в среде твёрдых частиц и их размерами.

2.2 Теплообмен в атмосфере.

Температура приземного слоя атмосферы определяется сложным тепловым балансом, т.е. притоком и оттоком тепловой энергии. Как уже было отмечено, первичным источником этой энергии является солнечная радиация. Если принять годовое поступление энергии к верхней границе атмосферы за 100%, то баланс тепловых потоков будет выглядеть следующим образом: 14% этой энергии поглощается атмосферой, 44% – земной поверхностью, а 42% энергии отражается в космическое пространство. В свою очередь, часть поглощенной поверхностью энергии уходит в пространство в виде инфракрасного (теплового) излучения (20%), другая часть расходуется на нагревание воздуха (5,6%), а третья (28,4%) – на испарение влаги (здесь приведены упрощённые и усреднённые показатели).

Естественно, что реальный тепловой баланс в различных географических пунктах будет выглядеть по-разному. К примеру, если поступающую непосредственно к земной поверхности энергию снова же взять за 100%, то получим разные уровни отражения в за-

висимости от вида этой поверхности. Снежный покров отражает 80 – 85%, (а поглощает, соответственно 20 – 15%), зеленая растительность отражает 26%, песчаная поверхность – 30%, а водная поверхность – всего 5%. В свою очередь, состояние облачного покрова и уровень запылённости атмосферы определяют величину лучистой тепловой энергии, поступающей к поверхности. Солнечная радиация, её поглощение и отражение является первичной стадией в формировании теплового баланса.

Очень важными вторичными тепловыми процессами являются такие, как перенос тепла ветровыми потоками, процессы конденсации водяного пара и образования мелких капелек или ледяных частиц в атмосфере. Известно, что конденсация и замерзание сопровождаются выделением тепла. В целом, конденсация водяных паров (сопровождающаяся образованием облаков и тумана) обеспечивает более значительный приток энергии в атмосферу, чем нагрев от поверхности Земли.

Сжатие и расширение воздушной частицы сопровождается соответственно повышением и понижением температуры. И, наконец, передача тепла от более нагретой среды к более холодной может происходить за счет молекулярной и турбулентной теплопроводности.

2.3 Вертикальный профиль температуры

В сухой атмосфере при отсутствии активного массопереноса температура убывает с высотой по закону адиабаты, т.е. изменение температуры и давления связано соотношением $p/\rho^{\gamma} = const$ (γ – показатель адиабаты). Это соответствует нейтральному (с точки зрения устойчивости) состоянию атмосферы. Однако в реальных условиях характер изменения температуры с высотой может быть более сложным. Наиболее типовые варианты поведения температуры в приземном слое показаны на рис 2.1 (а, б, в).

Сухоадиабатический градиент равен примерно 9,8˚С/км. Приближенно можно считать падение температуры с высотой в 1˚С на каждые 100 м над поверхностью. Если воздух насыщен влагой, тогда вступает в силу действие закона конденсации. По мере движения вверх и снижения температуры водяные пары конденсируются и при этом выделяется теплота. Поэтому падение температуры с высотой будет менее интенсивным составляет 5÷7˚С на каждый

километр. Иногда возникает вертикальный градиент температуры, превышающий сухоадиабатический. Это бывает в случае сильного нагревания земной поверхности за счет солнечной радиации. Такое явление приводит к нарушению устойчивости атмосферы, обусловленному интенсивной конвекцией (вертикальным перемещением). На рис 2.1 (б, в) представлены также случаи инверсии (на рисунке – обозначено «инв.»), т.е. такие явления, когда в определенном приземном слое температура повышается с высотой

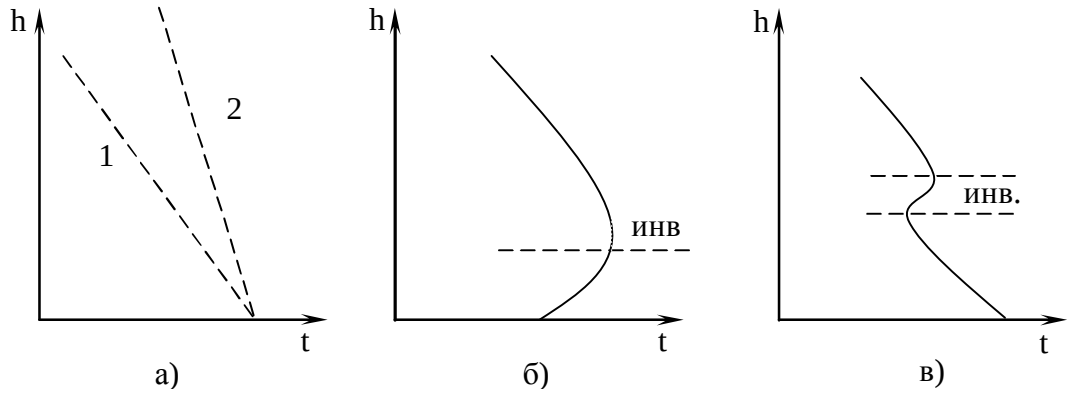


Рис. 2.1 Зависимость температуры воздуха от высоты: а) изменяется по закону адиабаты (сухая адиабата-1, влажная адиабата-2); б) приземный слой инверсии; в) приподнятый слой инверсии

(рис 2.1 (б)). Метеорологи различают два основных типа инверсии. Первый из них называют радиационным, он возникает в результате охлаждения поверхности при безоблачном небе в ночное время (случай б). Нередко в этот период образуется туман, покрывающий поверхность в виде слоя ограниченной толщины. Второй случай инверсии возникает тогда, когда на данную территорию поступает теплая воздушная масса. Так как теплый воздух легче холодного, он располагается над холодным слоем (случай в). Можно назвать и другие причины образования инверсий: например, опускание воздушных масс над холодным слоем, при котором в опускающейся массе происходит адиабатический нагрев. Наличие инверсионного слоя резко меняет характер распространения вредных примесей в атмосфере. В этом случае загрязненный воздух как бы запирается сверху непроницаемым «покрывалом», что приводит к нарастанию концентрации вредных ингредиентов в приземном слое.

Как отмечено ранее важной характеристикой приземной циркуляции является показатель устойчивости атмосферы. В метеоро-

логии принято обозначать уровень устойчивости атмосферы буквами латинского алфавита: *A, B, C, D, E, F*. При этом устойчивость атмосферы повышается от *A* до *F*. Для неустойчивой атмосферы характерны мощные конвективные потоки снизу вверх, а также интенсивное турбулентное перемешивание воздуха в приземном слое. Температурный градиент при этом очень высокий – выше 1°С на 100 м. Такая картина возникает при интенсивном нагревании земной поверхности. В этих случаях в теплое время года нередко появляются кучевые или кучево – дождевые облака, происходят ливни, грозы, град, шквал и т.п. Нестойкая атмосфера часто бывает летом после полудня, когда нагревается приземный слой воздуха и возникают сильные восходящие и нисходящие потоки (такие явления пассажирами самолетов воспринимаются как воздушные ямы). Кстати, грозы и шквалы, как правило, происходят после полудня. Устойчивая атмосфера реализуется при малых вертикальных градиентах температуры, и особенно, в случаях инверсии. В таком случае над нижним холодным находится более легкий, теплый слой, и это явление не способствует вертикальному движению воздуха. В других случаях, когда теплая часть выплывает вверх, то при этом она тратит внутреннюю энергию на свое расширение (по адиабатическому закону) и ее температура становится ниже, чем в окружающей среде. Поднятая частица будет иметь большую плотность и начнет медленно опускаться назад на предыдущую высоту. Такие явления также характерны для устойчивой атмосферы.

Показатели устойчивости атмосферы существенно влияют на величину боковой и вертикальной дисперсии, рассеивания струи загрязняющей газовой смеси, которая поступает от источника выбросов (например, из дымовой трубы). На Рис. 2.2 схематично показано след струи загрязненного газа на земной поверхности при разных значениях боковой дисперсии σ_y (вид сверху).

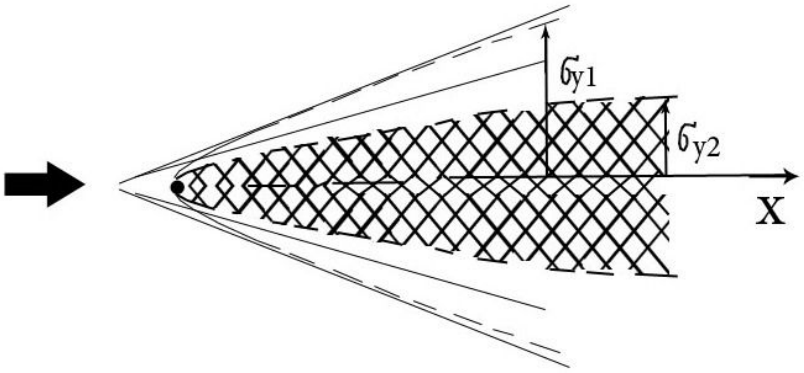


Рис. 2.2 Боковая дисперсия при неустойчивой атмосфере (σ_{y1}) и при большей устойчивости (σ_{y2}), стрелкой указано направление ветра

Известно, что дисперсия при наличии ветра обусловлена в основном турбулентным переносом загрязняющего вещества (и в незначительной мере – молекулярной диффузией). В случае полного штиля, когда скорость ветра равна нулю, дисперсия осуществляется за счет молекулярной диффузии. Параметры рассеивания (дисперсии) σ_y, σ_z выражаются через коэффициент диффузии $Д_y$ и $Д_z$ в виде

$$\sigma_y^2 = 2Д_y \cdot x; \qquad \sigma_z^2 = 2Д_z \cdot x; \tag{2.1}$$

Значения σ_y, σ_z, и соответственно, $Д_y$ и $Д_z$, находят с помощью экспериментальных измерений. Существуют также приближенные эмпирические выражения и обобщенные графические зависимости. Расчетные формулы имеют вид

$$\sigma_y = \alpha_y \frac{x}{S_1(x)}; \quad \sigma_z = \alpha_z \frac{x}{S_2(x)};$$
$$S_1 = \sqrt{1+\beta_1 x}; \quad S_2 = \sqrt{1+\beta_2 x}; \quad \beta_1 = 10^{-4}. \tag{2.2}$$

Значения параметров задаются таблицей 1:

Таблица 2.1. Значения параметров рассеивания α_y, α_z, β_2

Класс устойчивости	α_y	α_z	β_2
A	0,22	0,2	0
B	0,16	0,12	0
C	0,11	0,08	$1{,}5\cdot10^{-4}$
D	0,008	0,06	$2\cdot10^{-4}$
E	0,06	0,03	$3\cdot10^{-4}$
F	0,04	0,02	$3\cdot10^{-4}$

Значения σ_y, σ_z можно определить, воспользовавшись графиком (Рис. 2.3, 2.4)

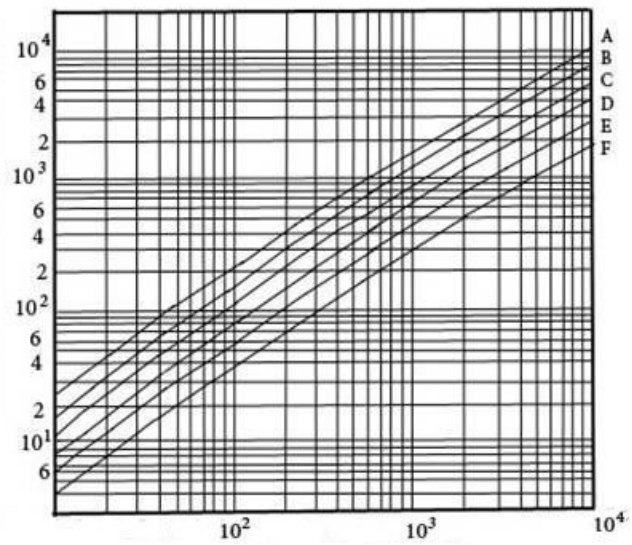


Рис. 2.3 Зависимость $\sigma_y(x), м$ от устойчивости атмосферы

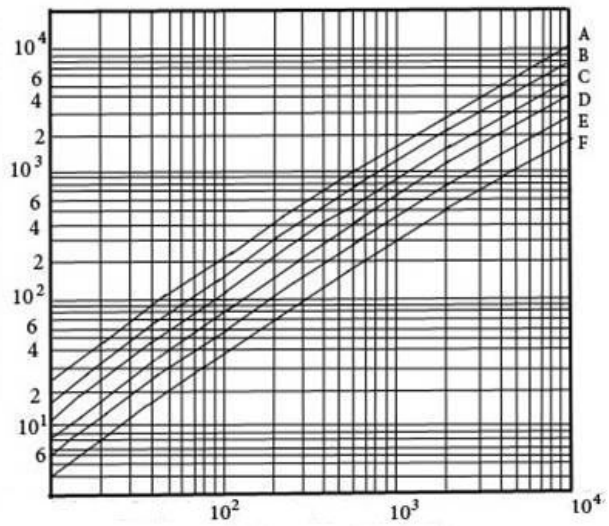


Рис. 2.4 Зависимость $\sigma_z(x)$ для разных показателей устойчивости атмосферы

2.4 Ветер

2.4.1 Законы атмосферной циркуляции

Первичной причиной существования воздушных течений является энергия, поступающая от Солнца. Но, как было отмечено ранее, атмосфера является практически прозрачной для солнечной радиации. Тепловая энергия поступает в нижние слои атмосферы от нагретой Солнцем поверхности Земли. Причину возникновения атмосферной циркуляции можно проиллюстрировать схемой, предложенной на рис 2.5. Земная поверхность нагревается неравномерно. Рассмотрим холодный (справа) и теплый (слева) участки поверхности, расположенные на некотором расстоянии друг от друга. Один из них может быть поверхностью суши, а другой – водной поверхностью (хотя это и не обязательно).

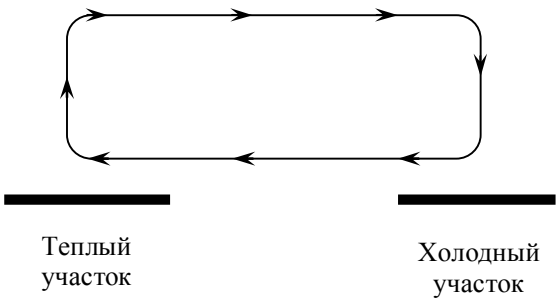


Рис. 2.5 Простейшая ячейка циркуляции воздуха

Над теплым участком нагретый (и более легкий) воздух поднимается вверх, и здесь возникает зона пониженного давления. Холодный, более тяжелый, воздух над вторым участком опускается вниз, что приводит к росту давления у поверхности. Таким образом, возникает горизонтальный градиент давления, имеющий направление справа налево. Это приводит к появлению воздушного потока – ветра. В соответствии с законом сохранения массы отток воздуха в приземном слое (нижняя часть ячейки) должен быть компенсирован притоком слева направо (на какой-то высоте от поверхности). Таким образом, формируется замкнутая ячейка циркуляции. Расстояние между участками может быть достаточно большим, что при существенной разности температур порождает крупную ветровую систему.

Итак, приведенная схема позволяет сделать некоторые выводы:

- основным источником циркуляции является неравномерный нагрев поверхности;
- циркуляция начинается с вертикального перемещения воздуха;
- над каждой точкой поверхности реализуется два противоположных потока – один на малой высоте (приземный ветер), а другой – на большой высоте;
- циркуляционная ячейка всегда будет замкнутой, хотя конфигурация её может быть значительно более сложной, чем на рисунке.

Если использовать данную схему в глобальном масштабе, тогда циркуляционная ячейка выглядит так: над экватором воздух поднимается вверх, а над полюсом опускается вниз. Образуется приземный ветер, который в северном полушарии направлен с севера на юг (Рис. 2.6).

Учитывая, однако, что поверхность Земли нагревается неравномерно, а сама Земля вращается вокруг своей оси, реальная картина выглядит намного сложнее. Глобальная ячейка распадается на несколько меньших, а направление ветра при этом тоже меняется. Более близкой к реальности является т.н. трехячеистая циркуляция (Рис. 2.7).

Неравномерный нагрев поверхности и вызванная им циркуляция называются термическим фактором. Однако формирование ветровых систем может происходить и по другим причинам. Наличие преград типа горных массивов или же взаимодействие отдельных ветровых систем, например, холодного и теплого фронтов, также порождает особые типы циркуляции. Совокупность этих явлений называют динамическим фактором. Наконец, направление скорости ветра существенно зависит от вращения Земли вокруг своей

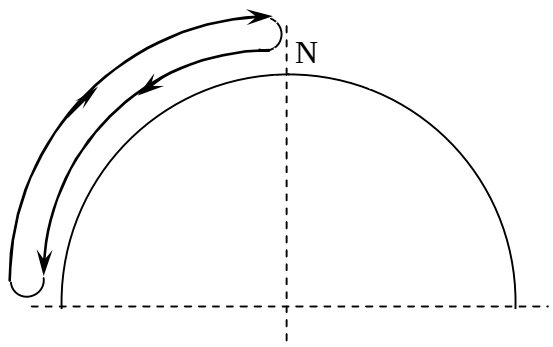


Рис. 2.6 Глобальная циркуляционная ячейка

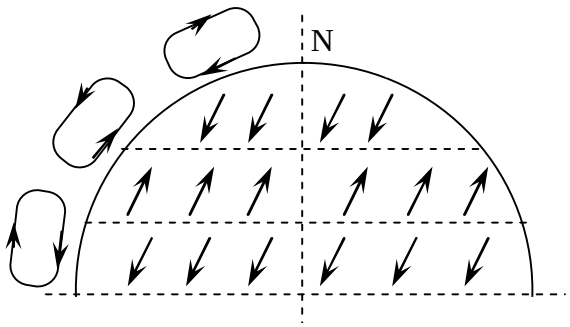


Рис. 2.7 Трехячеистая циркуляционная система

оси. Эффект вращения приводит к отклонению вектора скорости движущейся частицы воздуха вправо (в северном полушарии) и влево (в южном полушарии) – см. рис. 2.7.

2.4.2 Силы, определяющие перемещение воздушных масс

На частицу газа в атмосфере действует несколько сил: сила барического градиента, сила тяжести, центробежная сила, сила трения, сила Кориолиса.

При действии нескольких сил происходит их векторное сложение и они могут быть сведены к одной равнодействующей. Если равнодействующая равна нулю, тогда частица находится в покое (относительно данной системы координат) или же движется с постоянной скоростью по прямолинейной траектории. Нарушение равновесия сил приводит к изменению скорости по величине, по направлению или по обоим признакам. В анализе распространения загрязнения часто постулируется постоянство скорости воздуха в течение какого-либо расчетного периода. В противном случае течение становится нестационарным, что намного усложняет задачу.

Рассмотрим каждую из названных выше сил в отдельности. **Сила барического градиента** F_p пропорциональна изменению давления на единицу длины в каком-либо направлении x, т.е. $\partial p/\partial x$ (частная производная от p по x). В уравнении движения газовой частицы, записанном в векторной форме, вместо названной производной записывают вектор-градиент $grad\, p$ со знаком минус, т.к.

направление этого вектора противоположно ускорению частицы $\frac{d\vec{V}}{dt}$ (частица движется в сторону уменьшения давления).

Сила тяжести F_g пропорциональна ускорению земного тяготения $\vec{g}$. При оценке горизонтального перемещения частиц, воздух считается невесомым, т.е. силой тяжести обычно пренебрегают.

Центробежная сила F_c возникает при движении частиц по криволинейной траектории. Она прямо пропорциональна квадрату скорости движения этой частицы V^2 и обратно пропорциональна радиусу кривизны r (расстоянию до центра вращения). Эту силу необходимо учитывать в циклонических и антициклонических ветровых системах.

Сила трения $F_{тр}$ возникает только в движущемся газе и зависит от величины касательного напряжения τ, которое пропорционально изменению скорости по нормали к линии тока, т.е. $d\vec{V}/dn$. Другими словами, при движении газа вдоль земной поверхности происходит замедление скорости, обусловленное как раз величиной трения.

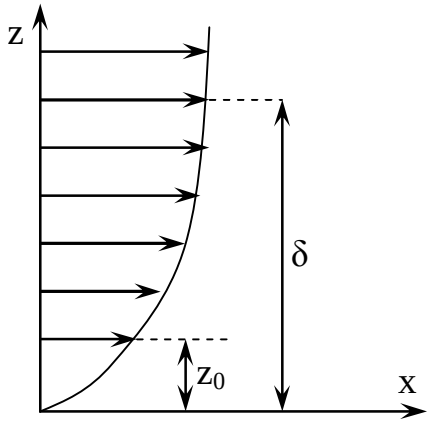


Рис. 2.8 Диаграмма скоростей в приземном слое

На рис. 2.8 показано изменение скорости потока в зависимости от высоты над поверхностью земли z (это как раз и есть направление нормали). Заметим, что при z=0 имеем V=0. Для упрощения анализа предполагают, что силы трения действуют только в пределах тонкого пограничного слоя, примыкающего к поверхности. Его толщина δ установлена экспериментальным путем и лежит в пределах 0,5÷1,5км. Течение в этом слое практически всегда

имеет турбулентный характер, а его анализ составляет основу для расчетов распространения загрязнений в атмосфере. Поскольку поверхность Земли не является гладкой (неровность рельефа, растительный покров, городские застройки и т.п.), иногда полагают, что скорость равна нулю не при $z=0$, а при некотором значении z_0 (Рис. 2.8). Зависимость $V(z)$ в этом случае показана пунктиром. Величина z_0 выбирается в зависимости от «шероховатости» местности и лежит в пределах нескольких десятков сантиметров.

Сила Кориолиса F_k является некой инерционной силой, которая изменяет направление движения частицы воздуха, если наблюдать за ней с поверхности вращающейся Земли. Чтобы понять происхождение этой силы рассмотрим в качестве примера движение частицы с северного полюса (точка N) по направлению к экватору (точка P), т. е. вдоль меридиана.

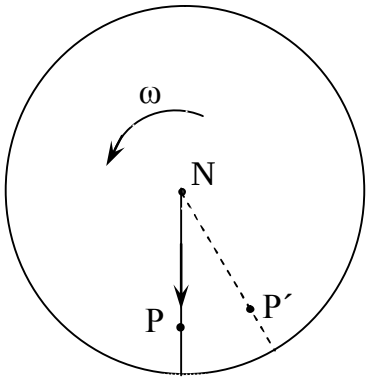


Рис. 2.9 Видимое движение частицы вследствие вращения Земли с угловой скоростью ω

По мере движения частицы направление меридиана изменяется в результате вращения Земли и в конечном счете наблюдатель, находившийся в точке P, перемещается в точку P'. Ему кажется, что движущаяся частица отклоняется от меридиана вправо, если смотреть в сторону движения. Можно показать, что в северном полушарии скорость будет всегда отклоняться вправо независимо от направления движения (даже в случае, если оно направлено перпендикулярно меридиану). В южном полушарии, наоборот, скорость будет отклоняться влево. Эти отклонения скорости связывают с действием особой силы, названной силой Кориолиса. С точки зрения наблюдателя северный ветер становится северо-восточным, а

южный ветер – юго-западным (Рис. 2.9). Можно показать, что сила Кориолиса определяется выражением:

$$F_k = mVf,$$

где $f = 2\omega \sin\varphi$, ω – угловая скорость вращения Земли (ω=7,292·10^{-5}с$^{-1}$), φ – географическая широта рассматриваемой точки , m– масса частицы, V – скорость её движения. Поскольку на экваторе φ=0°, а на полюсе φ=90°, сила Кориолиса на экваторе равна нулю, а на полюсе будет максимальной.

Таким образом, уравнение движения атмосферной частицы с единичной массой в общем случае можно записать в виде:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F}_p + \vec{F}_g + \vec{F}_c + \vec{F}_{mp} + \vec{F}_k, \qquad (2.3)$$

Как было установлено ранее, полагаем $\vec{F}_g \equiv 0$. Если частица движется с постоянной скоростью, тогда $d\vec{V}/dt$=0 и наблюдается равновесие сил, находящихся в правой части уравнения (2.3). Рассмотрим некоторые частные случаи равновесных состояний. Одно из них приводит к возникновению т.н. геострофического ветра, когда $F_c = F_{mp} = 0$. В этом случае имеем:

$$\vec{F}_p + \vec{F}_k = 0, \qquad (2.4)$$

Такой ветер можно наблюдать на некоторой высоте (за пределами пограничного слоя) в случае, если линии тока не искривлены, а наблюдатель находится на экваторе. Равновесие сил (2.4) представим в виде:

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} = 2V_g\omega\sin\varphi, \qquad (2.5)$$

Ветер направлен вдоль оси x.

Отсюда геострофическая скорость ветра равна:

$$V_g = \frac{1}{2\rho\omega\sin\varphi}\frac{\partial p}{\partial x}. \qquad (2.6)$$

Пусть градиент давления будет равен 1 мб на 100 км. Действующая на частицу сила будет равна 1 Н, т.е. 1 кг·м/с^2, ρ=1,2 кг/м^3, ω=7,29·10^{-5} с$^{-1}$, φ=30°. Тогда V_g≈11,4 м/с.

При движении воздуха по криволинейной траектории возникает равновесие трёх сил:

$$\vec{F}_p + \vec{F}_c + \vec{F}_k = 0 \quad (2.7)$$

Для единичной массы имеем:

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} = 2V_g r\omega \sin\varphi + \frac{V_g^2}{r} \quad (2.8)$$

Движение воздуха под действием таких сил называют градиентным ветром, а скорость ветра называют градиентной скоростью. Градиентный ветер реализуется в циклоне и антициклоне (за пределами пограничного слоя). Наконец, приземный ветер представляет собой поток, в котором, кроме названных выше сил, действует и сила трения.

Рассмотрим графическую диаграмму ветровых потоков, о которых идет речь. На рис. 2.10 изображена эволюция образования геострофического ветра.

Предполагается, что изобары представляют собой прямые линии. Градиент давления направлен снизу вверх. Предположим, что частица воздуха начала движение из точки А вверх под действием силы F_p. Как только началось движение, возникает сила Кориолиса (при нулевой скорости частицы она тоже была равна нулю). Под действием двух сил скорость потока меняет направление (траектория частицы показана пунктиром). В точке В устанавливается равновесие сил F_p и F_k, геострофическая скорость будет направлена вдоль изобар.

Напомним, что такую идеализированную картину можно наблюдать выше пограничного слоя. Если учесть силу трения в пограничном слое, т.е. ближе к поверхности Земли, то будем иметь диаграмму сил, показанную на рис. 2.11.

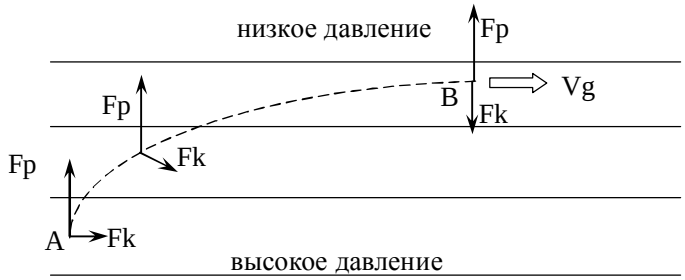


Рис. 2.10 Установление геострофического ветра в северном полушарии

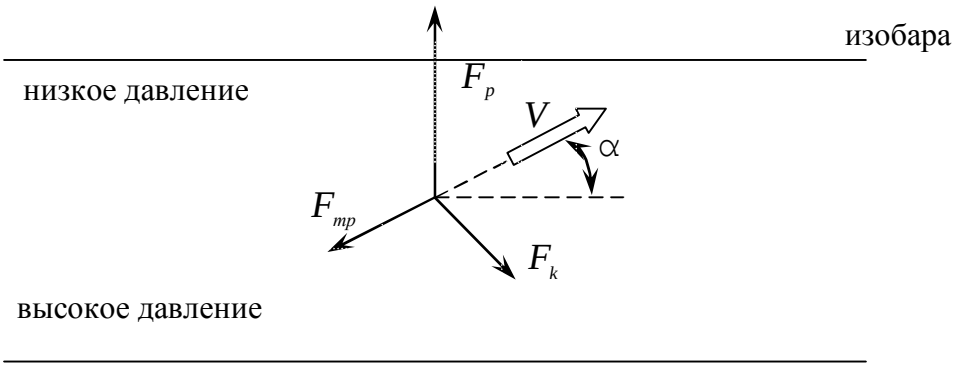


Рис. 2.11 Диаграмма сил в приземном ветре

Из диаграммы видно, что скорость ветра под действием трех сил F_p, F_k, $F_{тр}$ – направлена под углом α к изобарам. Поскольку за пределами пограничного слоя этот угол равен нулю, получается, что по мере опускания вниз, величина α увеличивается. На высоте 10 м, на которой обычно замеряется приземный ветер, этот угол может достигать 40° и более.

Диаграммы градиентного ветра в циклоне и антициклоне показаны на рис. 2.12.

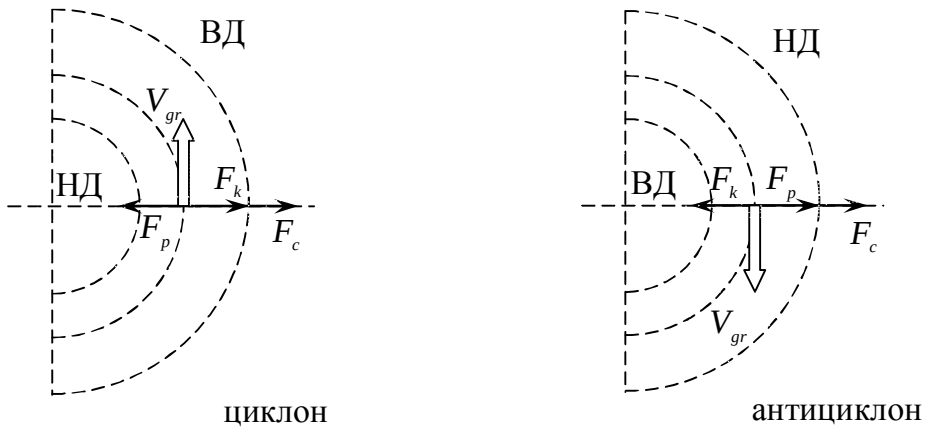


Рис. 2.12 Установление градиентного ветра в циклоне и антициклоне (северное полушарие).
НД и ВД обозначает низкое и высокое давление соответственно

Из диаграмм видно, что в циклоне

$$\vec{F}_p = \vec{F}_k + \vec{F}_c, \tag{2.9}$$

а в антициклоне

$$\vec{F}_p = \vec{F}_k - \vec{F}_c. \tag{2.10}$$

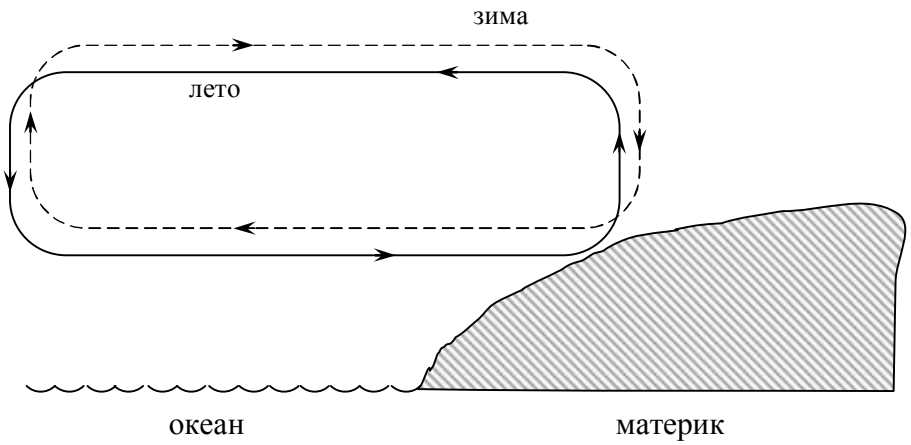
Если учесть силу трения, то в циклоне вектор скорости ветра будет пересекать изобары по направлению к центру. Давление в центре циклона будет возрастать и энергия циклона уменьшается. В этом случае говорят, что происходит заполнение депрессии. В антициклоне вектор скорости пересекает изобары по направлению от центра, что приводит к рассеиванию центра антициклона. С помощью уравнения равновесия сил можно показать, что в антициклоне скорости движения воздуха будут больше, чем в циклоне.

2.4.3 Ветровые системы.

Мощные ветровые системы образуются, прежде всего, на границе суши и океанов. Как было отмечено ранее, океанские воды и материки обладают разной теплоемкостью. Вода нагревается и остывает медленнее, чем твердое вещество суши. Это приводит к суточной и сезонной разнице температур водной и материковой поверхности, а, следовательно, и к возникновению ветра соответствующего направления. Летом материк теплее океана и поэтому

возникает циркуляционная ячейка с приземным ветром, который направлен с моря в сторону суши (2.3).

Зимой океан сохраняет тепло дольше и будет теплее материка. Поэтому циркуляционный поток направлен в обратном направлении – с суши на море. В принципе летняя циркуляционная ячейка обладает большей энергией, чем зимняя. Дело в том, что в поднимающемся над океаном воздухе происходит конденсация влаги с выделением громадной тепловой энергии. Наиболее заметно реализуется эта система в прибрежных районах Индийского океана, вдоль западного берега Африки (от 5° до 15° с.ш.) и других местах. В начале лета наступает период дующих с океана муссонов, несущих тепло, влагу и осадки. Зимой над Азиатским континентом устанавливается высокое давление, и реализуются ветры преимущественно северо-восточного направления, которые несут сухую прохладную погоду. Этот ветер иногда называют зимним муссоном. На рис. 2.7, где изображена схема трёхячеистой циркуляции, показаны устойчивые зоны северо-восточных ветров средних широт. На самом деле в средних широтах северного полушария картина существенно сложнее, особенно в удаленных от морей и океанов областях.



2.13 Циркуляция воздуха на границе суши и моря в летний период (сплошная линия) и зимой (пунктирная линия)

В частности, на Европейской территории происходит сложное взаимодействие области Атлантики (течения Гольфстрим, полярной области, континентальной области северо-восточной Азии, средиземноморского региона и прилежащей к нему северной Африки).

Существенное влияние на силу и направление ветра оказывает рельеф местности и, в первую очередь, горные хребты, наличие

горной гряды, которая соседствуя с долиной, или равнинной местностью порождает ветровые потоки различной интенсивности. Одно из таких течений показано на рис. 2.14.

Воздушный поток, двигаясь слева направо, переваливает через горную гряду и образует ветры различного характера. Один из них – это сухой, теплый ветер, называемый фёном. Образуется он следующим образом. Теплый воздух слева поднимается вверх, постоянно охлаждаясь. При этом наступает температура конденсации и выпадают осадки. Перевалив через гору, сухой воздух опускается вниз и сжимается адиабатически. Температура воздуха справа на одном и том же уровне будет больше, чем слева. В таких условиях могут возникать и потоки другого типа. Если в верхнем положении воздух не потерял всей влаги, то справа тоже могут выпадать осадки и фён может быть вестником дождевой погоды. Если за горной грядой будет поверхность моря, то в зимний период над более теплой водной поверхностью образуется разрежение. При наличии перевала в горном хребте через него устремляется сильный поток холодного воздуха с суши. Такой ветер, называемый бора, возникает в некоторых прибрежных территориях. Здесь в качестве примера можно привести северо-восточный ветер, который устремляется с Кубанской низменности через Мархотский перевал к Новороссийску. Нередко эти ветры приобретают ураганную силу, вызывают шторм на море, засыпают город снегом или покрывают поверхность Земли толстой ледяной коркой.

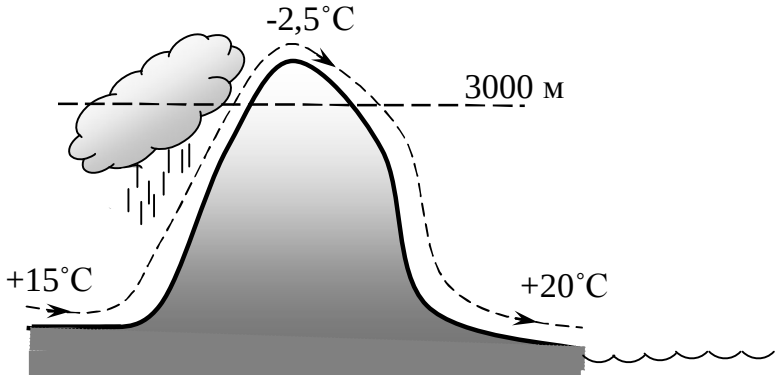


Рис. 2.14 Образование течения типа фёна

Итак, мы рассмотрели ветровые системы, образующиеся над территориями, где соседствуют море и суша, или же горный хребет и равнина. Однако над земной поверхностью значительную часть времени господствуют течения более сложного, вихревого характера, т.е. циклоны и антициклоны. Кроме того, над поверхностью океана время от времени образуются мощные тропические ураганы. Эти вихревые потоки обладают большой энергией и свойством непрерывного перемещения по довольно сложной траектории, взаимодействуют с другими ветровыми системами, что ставит перед синоптиками довольно сложные задачи, связанные с предсказанием погодных условий. Естественно, что это усложняет и прогнозы возможного распространения загрязнений в воздушной среде. Течения вихревого типа могут возникать по причинам термического характера (разность температур) или же динамического характера (взаимодействие теплых и холодных фронтов). Рассмотрим сначала первую группу причин. На рис. 2.15 изображены течения, возникающие в окрестности теплого (слева) и холодного (справа) пятен на поверхности Земли.

Напомним, что над теплым участком воздух поднимается вверх, что вызывает горизонтальный поток, направленный к центру. В северном полушарии скорость потока отклоняется вправо (дополнительная стрелка), что вызвано действием силы Кориолиса. Появляется вихревое движение против часовой стрелки. В крупномасштабном случае этот поток становится циклоном. В поднимающемся над центром циклона воздухе происходит конденсация влаги, образуются облака и осадки. Перемещение циклона, обычно совершающееся по спирали, приносит на территорию, где он проходит, теплые и влажные массы с осадками. Такого типа вихревые течения на территории Европы могут возникать, к примеру, над Средиземным морем около берегов северной Африки или над северными районами Атлантики (над Гольфстримом). В вихревом движении антициклонного характера воздух над холодной поверхностью опускается вниз, а затем расходится по лучам от центра. Воздействие силы Кориолиса поворачивает вектор скорости вправо и, в конечном счете, поток движется по часовой стрелке. Антициклон обычно несет холодную, сухую, иногда безоблачную погоду. Такого типа антициклон может зарождаться, к примеру, в северо-восточной Азии (район Верхоянска), над Центральной Азией (Мон-

гольское плато) в результате охлаждения материка в зимний период.

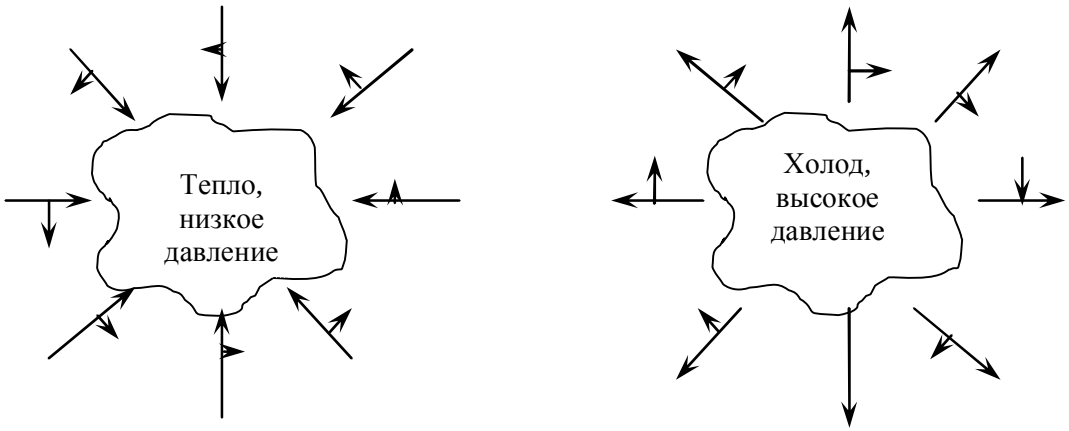


Рис. 2.15 Образование вихревых течений циклонического (слева) и антициклонического (справа) характера

Считается, что основная масса циклонов и антициклонов зарождается как результат динамических факторов. Главным динамическим фактором является взаимодействие теплого и холодного фронтов. Схемы проникновения теплого воздуха в холодную атмосферу и наоборот представлены на рис. 2.16 (а, б).

Теплый фронт имеет наклон разделяющей поверхности менее 1/100. При приближении этого фронта происходит постепенное поднятие теплого воздуха. При этом в нижней части клина образуются кучево-дождевые облака (КДО), дающие осадки. По мере удаления от вершины клина вверх на высоте 8-10 км образуются перистые и перисто-слоистые облака (ПСО), которые являются предвестниками приближения теплого фронта. Разделяющая поверхность холодного фронта имеет наклон примерно 1/50. Впереди холодного фронта формируются кучевые и слоисто-дождевые облака (КО и СДО) с активным образованием осадков. Зарождение и развитие циклона представлено на рис. 2.17.

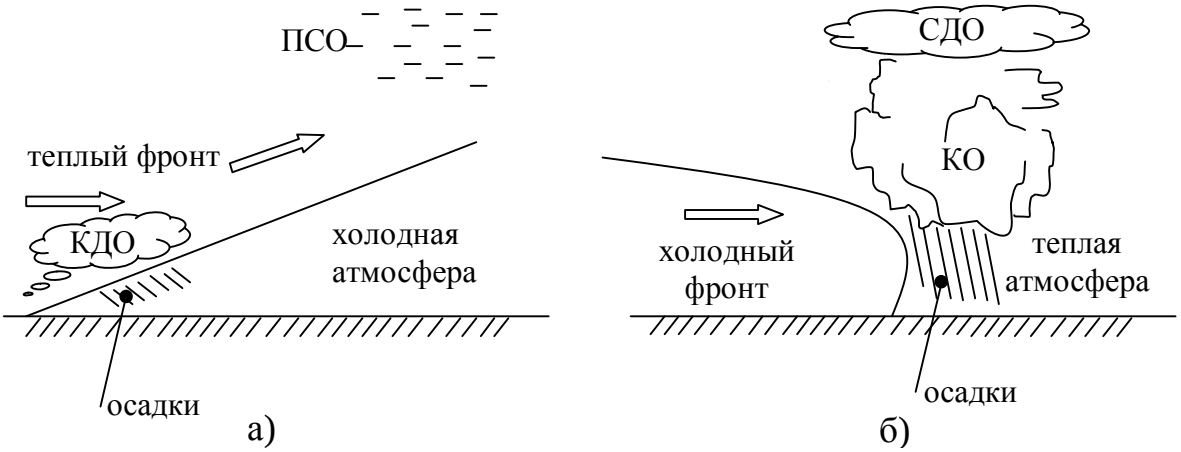


Рис. 2.16 Вторжение теплого течения в холодную атмосферу (а) и холодного течения в теплую среду (б).

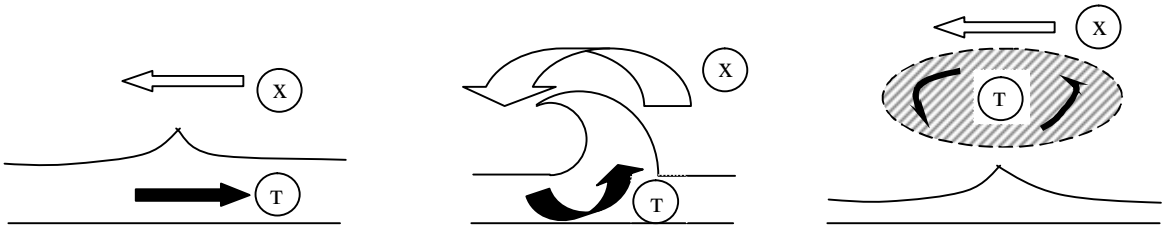


Рис. 2.17 Схема формирования циклона в северном полушарии (х – холодный воздух, т – теплый).

2.4.4 Характеристики ветрового потока

Характеристики ветрового потока определяются такими понятиями, как среднегодовая скорость V_{cp}, частота повторения скоростей ветра $f(V)$, роза ветров и другими. V_{cp} определяется соотношением

$$V_{cp} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} V_i \qquad (2.11)$$

Здесь n – число замеров, V_i – значение скорости при i-том замере. Количество замеров в году обычно разбивают на несколько стадий: сначала замеряют среднечасовую, затем среднесуточную и, наконец, среднегодовую скорости. Замеры обычно проводятся на

метеостанциях. Стандартная высота для замера – 10 м (высота флюгера). При расчетах распространения загрязнений обычно принимают значение скорости ветра, реализующееся в процессе движения загрязнителя от соответствующего источника. В большинстве случаев данный процесс считается квазистационарным. Это допускается в случаях, когда время перемещения загрязнителя от источника к рецептору будет существенно меньше времени изменения скорости ветра. При замерах скорости обычно пренебрегают высокочастотными флуктуациями её в данной точке. Частота повторения скоростей $f(V)$ в заданном пункте территории характеризует относительное время пребывания скорости в диапазоне V и $V+\Delta V$ за фиксированный промежуток времени, например за год. Другими словами, $f(V)$ есть плотность вероятности, или вероятность пребывания скорости ветра в указанном промежутке в течение года. Общий вид зависимости $f(V)$ представлен на рис 2.18.

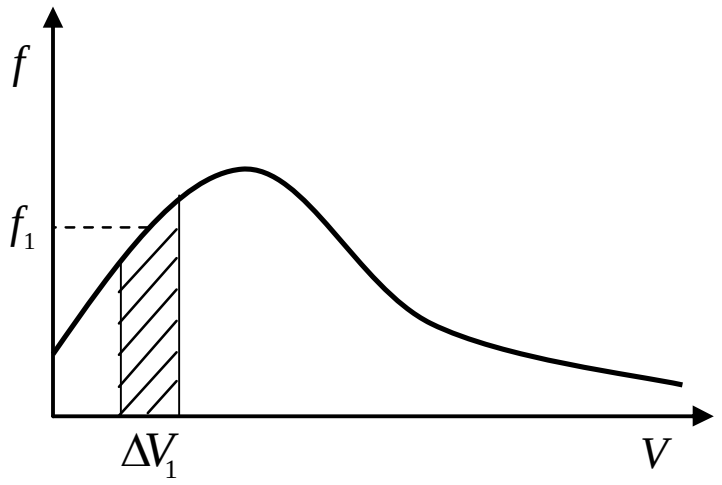


Рис. 2.18 Общий вид функции повторения скоростей ветра

Площадь под кривой $f(V)$ равна единице и отражает тот факт, что вероятность пребывания скорости ветра во всем диапазоне равна единице. Функция $f(V)$ имеет размерность [с/м].

Изменение скорости ветра V в зависимости от высоты z описывается степенной или логарифмической зависимостью.

$$\frac{V}{V_1} = \left(\frac{z}{z_1}\right)^m, \tag{2.12}$$

$$\frac{V}{V_1} = \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_1/z_0)}, \tag{2.13}$$

z_0 – параметр шероховатости поверхности;

V_1 – скорость ветра на высоте z_1;

m – показатель степени, который зависит в основном от состояния устойчивости атмосферы и некоторых других ее параметров. Его среднее значение равно 0,2. Летом принимают $m \approx 0{,}24$, а зимой $m \approx 0{,}17$. Этот показатель растет при увеличении высоты (в 1,5 раза больше на высоте 100 м в сравнении с высотой флюгера 10 м). Он зависит от степени устойчивости атмосферы.

Параметр шероховатости z_0 приблизительно определяет высоту над поверхностью, где скорость ветра можно принять равной нулю (рис. 2.19)

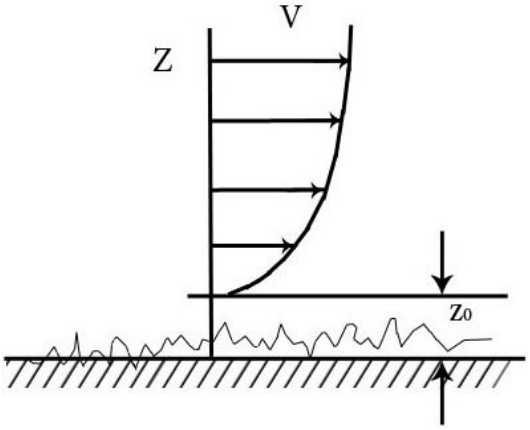


Рис. 2.19 Профиль скорости V в зависимости от высоты от высоты z

Значения z_0 существенно зависят от типа подстилающей поверхности. В Таблице 2.2 приведены значения z_0 для разных типов поверхности

Таблица 2.2. Значения параметра шероховатости z_0 в зависимости от типа подстилающей поверхности.

Тип поверхности	z_0 (см)
Песок	0.01 – 0.1
Снеговой покров	0.1 – 0.6
Скошена трава (~0,01 м)	0.1 – 1
Низкая трава	1 – 4
Вспаханное поле	2 – 3
Высокая трава	4 – 10
Карликовые растения	10 – 30
Мелколесье (высота дерева ~ 15 м)	90 – 100
Пригород со средней застройкой	20 – 40
Города со сплошной застройкой	80 – 120
Центры больших городов	200 – 300

Роза ветров – это графическое изображение определенных характеристик ветра в зависимости от направления (рис. 2.20)

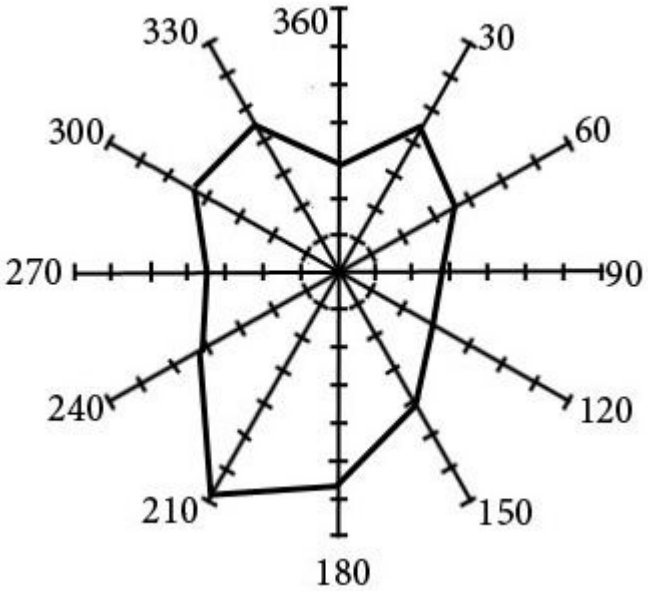


Рис. 2.20 Роза ветров

Длина отрезка в заданном направлении пропорциональна значению определенной характеристики ветра (средняя скорость, относительная продолжительность ветрового потока в данном направлении).

В зависимости от практических целей в анализах ветрового потока используют и другие характеристики, например: вероятность появления штилей, вероятность появления скоростей выше заданного значения, спектры пульсаций в турбулентном ветровом потоке и т.п. Метеорологи, к примеру, изучают подобные характеристики для предсказания погоды, строители – для оценки воздействия ветра на здания и сооружения, а энергетики изучают характеристики ветра при создании ветродвигателей. Естественно существуют и другие приложения данных о характеристиках ветрового потока в той или иной месности.

3 ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ

Дорога к цивилизации вымощена
консервными банками.
Альберто Моравиа

Только в большом городе человек может почувствовать себя по-настоящему одиноким и беззащитным.
По мотивам К. Лихтенберга

3.1 Урбанизация и экология

Современные тенденции в изменении соотношения между количеством городских и сельских жителей говорят о том, что в будущем жителей Земли ожидает массовая урбанизация. По данным, приведенным в ежегодном докладе природоохранной исследовательской организации Worldwatch Institute, уже начиная с 2008 года больше половины населения Земли живут в городах. Самыми стремительными темпами растет городское население Азии и Африки. Предполагается, что к 2030 году около 90% прироста городского населения придется именно на эти два континента. Население Азии и Африки за это время удвоится и достигнет 3,2 млрд. человек. К 2015 году в мире будет 22 мегаполиса с населением свыше 10 млн. человек (в настоящее время их уже 10). Большими темпами идет отток сельского населения в города также в странах Южной и Центральной Америки. Что касается отдельных стран Европы и Северной Америки, то здесь, как известно, общая численность населения растет медленно или даже сокращается. В то же время, доля городского населения здесь также непрерывно нарастает. Так, например, за период с 1950 по 1990 год процент городского населения в США изменился с 51 до 77 и продолжает увеличиваться.

В Украине в настоящее время имеется пять городов с населением более 1млн человек – это Киев и Харьков с населением 3,3 и 1.6 млн соответственно, а также Днепропетровск, Донецк и Одесса. Доля городского населения распределена по отдельным регионам очень неравномерно. Так, например, в Донецком регионе (Донецкая и Луганская области) доля городского населения очень высока (около 90%). В Приднепровском регионе (Днепропетровская и Запорожская области) эта доля составляет примерно 83%. В Северо -

Восточном регионе (Харьковская, Полтавская, Сумская области) около 70% населения проживает в городах. В то же время в Подольском регионе (Винницкая, Хмельницкая, Тернопольская области) доля городского населения самая низкая, т. е. менее 50%. В других регионах этот показатель лежит в пределах 50÷65%.

Урбанизация общества происходит по многим причинам, основная часть из которых вызвана желанием людей получить большее количество жизненных благ. К таким благам (по крайней мере, в начальный период урбанизации) относились: уровень предоставляемых услуг (больницы, театры, торговые центры и т.д.); более эффективные средства коммуникации (транспорт, связь); наличие более современных бытовых условий (жилье, водопровод, канализация, отопление) и, наконец, наличие условий для более разнообразной трудовой деятельности и обучения.

К настоящему времени многие названные блага потеряли свое преимущество и появились новые серьезные проблемы. Стремительное нарастание городского населения (особенно в странах третьего мира) порождает трудности с обеспечением людей жильем, работой, доступом к чистой воде, к источникам энергии. Высокая плотность населения порождает транспортные проблемы, причем пользование транспортом становится не только трудным, но и опасным. Установлено, что в мире в автомобильных авариях ежегодно погибает 1,2 млн. человек, еще 50 млн. получают травмы. Продукты питания для городского жителя обходятся на 30% дороже, чем для сельского. В последнее время в результате нарушения природного равновесия участились стихийные бедствия (наводнения, ураганы и т.д.), от которых страдают, прежде всего, городские жители. За последние 20 лет количество жертв стихийных бедствий увеличилось и ожидается их дальнейшее нарастание. Здоровье людей, проживающих в городах значительно хуже, чем у жителей сельской местности. Особенно опасными становятся инфекционные и вирусные заболевания: туберкулез, гепатит, эпидемии различных видов, а также чумы нашего века – ВИЧ-инфекции и СПИД.

В больших городах люди испытывают дополнительные стрессы, вызванные безработицей, конфликтами на бытовой и служебной почве. Нарастает также уровень преступности, наркомании и других пороков, порождаемых материальными и другими причинами.

Наиболее массовой опасностью для городских жителей становится загрязнение окружающей среды: воздуха, воды и грунта. Так, установлено, что загрязнение воздуха в городах ежегодно убивает свыше 800 тыс. человек. Употребление загрязненной воды и пищи удваивает и эту огромную цифру.

Загрязненная среда порождает новый перечень заболеваний дополнительно к тем, которые названы ранее: патологию органов дыхания, пищеварения, сердечно-сосудистой системы и т.п.

В связи с этим, изучение экологических проблем и выработка мер по устранению их опасности становится одной из наиболее важных задач человеческого общества.

Понятие “большой город” не является строго определенным. Конечно речь идет, прежде всего, о населенном пункте с большим количеством обитателей, исчисляемым сотнями тысяч или превышающем миллионный рубеж. Вместе с тем, с экологической точки зрения, вводя это понятие нужно было бы учесть степень индустриализации, интенсивность транспортных потоков и другие показатели. Таким образом, в эту категорию, можно было бы включить и отдельные промышленные центры с несколько меньшим количеством жителей. Общим свойством всех таких населенных пунктов являются сложная система источников и большие объемы промышленных и бытовых вредных выбросов, поступающих в окружающую среду.

Рассмотрим некоторые основные параметры, отличающие городскую среду от сельской местности.

Из литературных данных следует, что анализом экологических особенностей городских территорий занимается большое число ученых и, вместе с тем, они изучены еще в недостаточной степени, особенно если речь идет о сравнении численных показателей. Некоторые из этих показателей приведены в работах [13, 19, 24, 85] и других.

3.2 Особенности городских источников загрязнения воздуха

Главной особенностью городских территорий является высокая плотность размещения источников выбросов на местности и их разнообразие. Здесь, как правило, размещены различные точечные источники в виде дымовых труб промышленных, энергетических и

коммунальных предприятий. Сюда же можно отнести и дымящие терриконы в городах Донбасса и другие источники.

На территории городов расположена сложная сеть автомобильных и других магистралей. Каждая такая магистраль может рассматриваться как линейный источник выбросов.

К городским территориям нередко примыкают так называемые площадные источники в виде дымящих свалок бытового мусора или участки пылевых выбросов на месте размещения твердых промышленных отходов и т.п.

Плотность вредных выбросов может быть выражена в показателях, отражающих массу выбросов на единицу площади. Для иллюстрации вышесказанного можно привести некоторые числовые данные. Прежде всего, следует отметить, что для городов характерна высокая доля выбросов автомобильного транспорта по сравнению с другими типами выбросов. В настоящее время для городов этот показатель составляет 50-80% от общего объема и притом наблюдается тенденция его нарастания. Для сравнения можно отметить, что в целом по стране такой показатель невысок. Так, например, в Украине в 2006г выбросы в атмосферу от транспортных средств составили всего лишь около 4,5%. Плотность выбросов на территории Украины в 2006г составила около 8,0 т/кв.км. Наиболее высокие показатели зарегистрированы в Донецкой(~61,5 т/кв.км), Днепропетровской (~34,5 т/кв.км), Луганской и Ивано-Франковской областях (~ по 19,5 т/кв.км). Если же взять городские показатели, то здесь цифры значительно выше средних по стране. Так в городе Днепропетровске ежегодно выбрасывается в атмосферу примерно 100тыс.т вредных веществ. Если учесть, что площадь города равна примерно 400 кв.км, то показатель плотности окажется равным 250 т/кв.км, что более, чем в 30 раз превышает среднее значение по стране. В г. Киеве этот показатель равен ~31,5 т/кв.км.

Количество крупных предприятий, совершающих выбросы в атмосферу по Украине составляет около 11 тысяч, причем преобладающая часть их находится на территории больших городов. Так, в г. Днепропетровске находится более 170 предприятий и организаций, которые имеют несколько тысяч источников выбросов. На территории этого же города расположено более 1500 улиц, по которым ежедневно движется более 200 тыс. автомобилей. Учитывая, что каждый автомобиль выбрасывает в атмосферу примерно 30 $м^3$ вредных веществ на 1 км пути, можно определить общий объем

выбросов автомобильного транспорта и оценить нарастающую экологическую опасность автомобилизации больших городов.

3.3 Подстилающая поверхность.

Известно, что форма подстилающей поверхности является одним из основных факторов, определяющих характер распространения загрязнений в воздушной среде городов. Пограничный слой атмосферы, в котором содержится основная часть загрязняющих веществ, формируется за счет взаимодействия ветрового потока с элементами подстилающей поверхности. К таким элементам относятся, прежде всего, топографические особенности территории, или её орография. При этом имеются в виду плоские участки, а также горы, высокие холмы и другие типы возвышенностей с одной стороны, а также низкие участки, углубления, глубокие овраги с другой. Карпатская горная гряда определяет орографию Львовской, Ивано-Франковской, Черновицкой и Закарпатской областей. Что же касается Крымской горной гряды, то она как известно, не примыкает к территории больших городов и индустриальных центров с интенсивным загрязнением воздушной среды. Основная часть городов Украины расположена вдали от горных массивов, хотя для многих из них характерно чередование возвышенных и низинных участков территории, наличие холмов и глубоких оврагов (наиболее характерны в этом смысле города Киев и Днепропетровск). Так, например, рельеф города Днепропетровска [166] определяется наличием возвышенной правобережной части (абсолютные отметки 120 – 185м) и низкой левобережной частью (абсолютные отметки 48 – 54 м). На правом берегу в долину Днепра открываются шесть глубоких оврагов, ширина днища которых составляет 60 – 350 м, а крутизна их склонов достигает 20 – 25°. Названные особенности городских территорий, т. е. горные склоны, долины, холмы, низменные участки, овраги и т. п., во многом определяют характер воздушных потоков и концентрацию загрязнений в различных пунктах городской территории.

Другой особенностью подстилающей поверхности является характер застройки, т. е. размещение жилых зданий, а также промышленных, общественных и других сооружений. Низкоэтажная застройка может быть приближенно смоделирована с помощью коэффициента (или параметра) шероховатости поверхности z_0, выра-

жаемого в сантиметрах. Так для сельской равнинной местности он лежит в пределах 0,1 – 10 см, для городской застройки – в пределах 20 – 100 см. Для жилых массивов с многоэтажными зданиями и, в особенности для рядов зданий, образующих глубокий уличный каньон, или зданий, образующих так называемые «дворовые колодцы», приходится рассматривать локальные течения с наличием зон повышенных скоростей, застойных зон и т. п.

Растительные массивы с высокими деревьями, парки, рекреационные территории влияют на характер ветрового потока и распространение загрязнений, образуя т.н. полупроницаемую среду. Здесь может происходить частичное поглощение вредных ингредиентов. Коэффициенты поглощения, как правило, определяются эмпирическим путем.

Наконец, к городской территории могут примыкать водные пространства: реки, озера, водохранилища, морские заливы и другие водные объекты. Наличие водных объектов влияет на температурный режим, уровень влажности, частоту образования туманов и другие атмосферные процессы. На водной поверхности также происходит частичное поглощение загрязняющих веществ, что необходимо учитывать в расчетах.

Подстилающая поверхность может иметь неравномерное сложное покрытие, неравномерный нагрев земной поверхности или отдельных объектов, например, стен зданий на солнечной стороне и другие особенности. Описание подстилающей поверхности ведется обычно в локальной (включающей территорию города) системе координат. Очень важными для этой цели могут быть снимки городской территории с орбиты спутника в оцифрованном варианте.

3.4 Характер воздушных потоков.

Известно, что изменение скорости ветра по высоте при отсутствии сильно выраженных неровностей поверхности можно приближенно описать логарифмической или степенной зависимостями типа

$$u = u_1 \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_1/z_0)}, \quad \text{при} \quad z < h, \tag{3.1}$$

$$u = u_1, \quad \text{при } z \geq h, \tag{3.2}$$

$$\text{или} \quad u = u_1 (z / z_1)^p . \qquad (3.3)$$

В этих выражениях u (м/с) – скорость однонаправленного движения воздуха (ветра), z – высота над поверхностью земли, z_0 – уровень шероховатости, h – высота приземного слоя (линейные размеры выражены в метрах), $p = 0{,}15 – 0{,}5$. Значение p определяет характер устойчивости атмосферы, $z_1 \approx 1$ м.

Поскольку значительная часть подстилающей поверхности в крупных городах характеризуется наличием крупных препятствий для ветрового потока, вертикальный профиль ветра в приземном слое отличается от записанных выше законов. В городе выделяют обычно несколько слоев со свойственными им скоростями ветра. Первый слой – от поверхности земли до уровня крыш (здесь поле ветра определяется условиями застройки). Второй слой – от уровня крыш до высоты, на которой еще сказывается уровень городской макрошероховатости. И, наконец, третий слой, где это влияние не проявляется.

Первый слой определяется наиболее сложным характером воздушных течений: скорость ветра изменяется и по величине и по направлению. Так, при обтекании отдельных зданий и сооружений, образуется заторможенный поток в окрестности лобовой части препятствия, ускоренный поток на боковых поверхностях и над крышей, и отрывные течения на тыльной стороне объекта. При поперечном обтекании уличного каньона также образуется застойная зона, примыкающая к поверхности. При обтекании такого каньона под острым углом, образуется поток вдоль улицы, скорость которого зависит от этого угла. На площадях, крупных перекрестках и дворовых «колодцах» могут возникать локальные завихрения.

Понятно, что в тонком приземном слое скорости ветра ниже, чем в верхних слоях, что способствует скоплению дымов и газов, в достаточно больших концентрациях. На скорость приземного ветра кроме характера застройки оказывают влияние наличие растительных массивов, водной поверхности и местного рельефа.

Особый характер имеют вертикальные перемещения воздуха над городской территорией. Над теплым пятном в результате конвекции такие перемещения происходят снизу вверх. Из-за возникающего при этом приземного разрежения, воздух начинает поступать в горизонтальном направлении, двигаясь от периферии к центру, что влияет на величину и направление ветра в нижнем слое.

Такие течения, возникающие преимущественно в ночные и маловетреные часы, иногда называют «городскими бризами».

Вертикальные потоки могут затормаживаться на определенной высоте при наличии слоя температурной инверсии. Эти явления, как известно, способствуют росту концентрации воздушных загрязнений, поскольку происходит своеобразное запирание потоков в узком приземном слое.

3.5 Среднегодовые и сезонные температуры воздуха

В специальной литературе городской участок территории обычно называют “островом тепла”. Дело в том, что производственная деятельность, функционирование системы отопления зданий и сооружений, приготовления пищи связаны с тепловыделением в атмосферу. В связи с этим, городские территории характеризуются показателями, отличными от показателей сельской местности. Так, среднегодовая температура в городе на 0,5÷1°С, а средняя зимняя температура – на 1÷3°С оказывается выше. Протяженность же времени с отрицательными температурами воздуха на 25 – 35% меньше.

Анализу причин и оценке числовых показателей нагрева городской атмосферы посвящено значительное число работ метеорологов, климатологов и других ученых и специалистов. Обобщенным определяющим параметром является средняя мощность тепловыделения, приходящаяся на единицу площади. В работах исследователей отмечается, что кроме антропогенных причин, собственное излучение в городе несколько повышается вследствие более сильного нагрева улиц, зданий и мостовых, а также застоя теплого воздуха в дворовых колодцах. Возрастает также собственное излучение атмосферы под влиянием более частых туманов и смогов. Исчезновение снегового покрова в результате очистки улиц, также способствует более сильному нагреву поверхности. Асфальт и кирпично-каменный материал городских строений обладает меньшей теплоемкостью, чем открытый грунт, поэтому более быстро нагревается от солнечных лучей. Ночью стены зданий и дорожный асфальт более активно отдают тепло в атмосферу. Японские исследователи путем подробных замеров зафиксировали, что в отдельных случаях разность температур в системе “город – окрестности” может достигать 7 –15°С.

3.6 Солнечная радиация

Уровень солнечной радиации городской территории отличается от уровня сельской местности. Ранее было отмечено, что интенсивность солнечного излучения R_d измеряется в ланглях/час или в Дж/мин·см^2.

Известно, что космические лучи попадающие на Землю со стороны Солнца, представляют собой сложный и мощный энергетический поток, включающий заряженные частицы, тепловые и световые волны различной амплитуды и частоты. Отдельный интерес представляют ультрафиолетовые излучения, которые подразделяют обычно на 3 диапазона:

- **ультрафиолет А**, который обладает умеренной энергией, сравнительно легко преодолевает атмосферную толщу, химически воздействует на кожу человека, участвуя в образовании витамина Д, способствует загару. Вреден только в избыточных количествах;
- **ультрафиолет В** – обладает энергией фотонов выше на 20 – 40% по сравнению с предыдущим. Взаимодействуя с кожей человека он приводит к нарушению связей в биомолекулах, провоцирует мутации вплоть до заболевания раком кожи. Поглощается в основном в слое озона (на высоте 20 – 30 км).
- **ультрафиолет С** – обладает наиболее высокой энергией и очень опасен для живых существ. Следует отметить, правда, что его доля в общем потоке невелика и главным защитником живых существ на Земле от этого вида излучения является озоновый слой.

По данным работы [92] интенсивность всех видов солнечного облучения над городом уменьшается на 20 – 30% по сравнению с сельской местностью. При этом интенсивность ультрафиолета А летом уменьшается на 10 – 30%, а зимой – на 70 – 100%. Основной причиной уменьшения радиации является запыленность атмосферы, более плотный облачный покров и образование вызванных аэрозолями туманов. В работе [23] приводятся данные по отдельным городам России. В частности в г. Кемерово солнечная радиация в 1,5 раза меньше в промышленном участке города, чем на его окраине. В городе Воркута, известном своей запыленностью, уменьшение радиации еще более значительное.

Влияние отдельных факторов на характеристики городской среды далеко неоднозначно. В частности, тепловой баланс поверхности определяется не только приходящей радиацией, но и радиа-

ционной тепловой отдачей от этой поверхности. В принципе, радиацию можно разделить на прямую и рассеянную (т.е. отраженную от стен, окон, снежного покрова и т.п.). Эти факторы необходимо учитывать в тепловом балансе, тем более что суммарный нагрев городской поверхности оказывается выше, чем сельской.

3.7 Уровень влажности, образование туманов и осадки

В городской среде наблюдается сложное взаимное влияние многочисленных локальных факторов, что, в конечном счете, приводит к различным по характеру явлениям. Если о городе, как «острове тепла», можно говорить уверенно и определенно, то о других метеоявлениях следует говорить с определенной степенью вероятности. Это касается, в первую очередь, таких явлений как уровень влажности воздуха, частота образования туманов и интенсивность осадков.

Установлено, что воздух города, в целом суше, чем воздух его окрестности. Это наблюдается в особенности в летние вечера (при отсутствии интенсивного полива). Считается, что уровень влажности в городе на 5% ниже, чем в окрестностях, причем в летние вечера это различие может достигать 30 – 40%. Это связано с тем, что в городе уменьшена площадь испаряющих поверхностей, отсутствует инфильтрация в грунт и последующее испарение жидкости при наличии искусственных покрытий, и наконец, уход жидкости через канализационные стоки.

Запыленность городской атмосферы и высокая концентрация антропогенных аэрозолей способствуют образованию ядер конденсации. Это приводит к возникновению туманов и слабых осадков (более сильные осадки приходят, как правило, со стороны). Такие явления отмечены исследователями в различных регионах. К примеру, в Украине они характерны для Харькова [71] и других больших городов. Американские исследователи [23], на основе анализа осадков в семи городах США установили заметное увеличение (на 9 – 17%) летних осадков в самом городе и его наветренной части. Было обнаружено, что картина распределения полей осадков, их вид и интенсивность зависят от степени индустриализации городов. Влияние крупных городов сказывается не только на их собственной территории, но и на расстоянии 25 – 30 км на наветренной стороне от центра города. При этом называются и некоторые причины воз-

никновения осадков, а именно: нестационарность и различное размещение источников тепла в городе; изменения в облаках проходящих над территорией (в ледяных ядрах конденсации); усиление турбулентности в пограничном слое над городом и другие.

То же самое можно сказать и об образовании туманов. В городах основной причиной более частых туманов считают наличие аэрозольных ядер конденсации. Известно, например, что в Лондоне, в атмосфере которого наблюдается высокая концентрация загрязнений, повторяемость туманов в два раза выше, чем в его окрестностях. О числе ядер конденсации в городском воздухе можно судить по данным приведенным в таблице 3.1, которая построена на основе материалов наблюдений в Западной Европе [23].

Из таблицы видно, что среднее максимальное запыление (т. е. среднее количество ядер) в атмосфере крупного города – отличается от сельскохозяйственного района примерно в 20 раз, абсолютный максимум – в 10 раз, а средний минимум в – 50 раз.

Таблица 3.1 Данные о количестве ядер аэрозольной конденсации

Районы	Число ядер конденсации в 1см^3 воздуха			
	Среднее	Среднее максимальное	Среднее минимальное.	Абсолютное максимальное
Крупные города	$1{,}47\cdot10^5$	$3{,}79\cdot10^5$	$4{,}9\cdot10^4$	$4\cdot10^6$
Мелкие города	$3{,}43\cdot10^4$	$1{,}14\cdot10^5$	$4{,}9\cdot10^3$	$4\cdot10^5$
С/х районы	$9{,}5\cdot10^3$	$6{,}65\cdot10^4$	$1{,}05\cdot10^3$	$3{,}36\cdot10^5$
Над открытым океаном	$9{,}4\cdot10^2$	$4{,}68\cdot10^3$	$8{,}4\cdot10^2$	$3{,}98\cdot10^4$

3.8 Городские смоги

Термин «смог» (smog) происходит от комбинации двух английских слов «смок» (smoke) –дым и (fog) – туман. Этим термином обозначают вредную воздушную примесь, образующуюся в результате физико-химических превращений загрязняющих атмосферу веществ. Сложные реакции между отдельными газоаэрозолями , приводящие к образованию смога, происходят при определенных метеорологических условиях. Смоги – это чисто городское явление нехарактерное для сельской местности. С точки зрения состава этой вредной смеси различают два вида смога. Один из них называют «лондонским» по имени столицы Англии, где такие явления наблюдались регулярно, начиная со второй половины XIX века. Другой вид более характерен для города Лос-Анжелес (Калифорния, США). В Лондоне в течение предшествующих столетий сжигалось большое количество угля – для отопления и получения других видов тепловой энергии. При этом в атмосферу выбрасывались значительные объемы двуокиси серы, окислов азота, угольной сажи и некоторых других ингредиентов. В период образования густых туманов капельки жидкости взаимодействовали с этими примесями, образуя кислоты и другие вредные вещества. В такие периоды значительно ухудшалось здоровье горожан и наблюдалось увеличение смертности. Так, в декабре 1952 года в Лондоне всего за 5 дней умерло 4 тысячи человек и еще несколько тысяч погибло в последующие три месяца. Опасные смоги отмечались в Лондоне регулярно начиная с 1873г. по 1959г. В настоящее время в результате уменьшения объемов сжигаемого угля и перехода на другие виды топлива (нефть, газ) частота и плотность образования смогов названного вида в Лондоне существенно уменьшилась, хотя появилась другая опасность – образование смогов в результате роста автомобильных выбросов. Именно автомобильные выхлопы являются причиной образования, так называемых, фотохимических смогов, характерных для Лос-Анжелеса. Уже в середине 80-х годов прошлого века в этом городе было более 4 млн. автомобилей, выбрасывающих в атмосферу окись углерода, окись азота, несгоревшие углеводороды и другие вредные вещества. Именно окись азота является веществом, инициирующим цепочку реакций, которые при-

водят к образованию вредного смога. Один автомобиль выбрасывает 10г окиси азота на каждом километре пути, а ежедневные совокупные выбросы этого вещества в городе составляют около тысячи тонн. Началу этих реакций способствуют особые метеорологические условия. Город Лос-Анжелес, как известно, расположен на берегу Тихого океана в своеобразной долине, огражденной горной грядой. Эта гряда защищает город от восточных и северных ветров из-за чего здесь часто повторяется сухая, безветренная погода. В городе часто наблюдается (до 200 дней в году) температурная инверсия, т. е. появление слоя повышенной температуры на высоте 300-900м, которая препятствует вертикальному перемещению загрязненного воздуха. Под действием солнечного излучения в воздушной среде образуются фотохимические туманы. Было установлено, что реакция идет в определённой последовательности. Солнечная радиация способствует расщеплению двуокиси азота и образованию окиси азота и атомарного кислорода, который взаимодействуя с молекулярным кислородом образует озон (трехатомный кислород). Далее окись азота взаимодействует с олефинами выхлопных газов, которые при этом расщепляются по линии двойной связи и образуют осколки молекул. В такой смеси газов образуется избыток озона, который сам по себе является мощным окислителем и сильно ядовитым веществом. Часть озона также взаимодействует с олефинами и при этом образуются различные перекиси, которые в сумме образуют характерные для смога оксиданты. Возникновение оксидантов сопровождается образованием так называемых свободных радикалов, отличающихся высокой реакционной способностью. Обычно фотохимические туманы появляются при концентрации оксидантов более 0,21 мг/л. На человеческий организм эти вещества действуют крайне агрессивно. Фотохимические туманы образуются во многих крупных городах США: Нью-Йорке, Чикаго, Бостоне, Дейтройте, а также в Японии (Токио, Иокагама, Осака), в Италии (Милан), в Германии (Гамбург) и некоторых других городах мира. В Советском Союзе вплоть до конца 80-х годов , а также в Украине до настоящего времени развитые смоги пока не наблюдались. К сожалению, всё нарастающие автомобильные выбросы в комбинации с выбросами крупных металлургических, химических и других предприятий создают опасную для здоровья воздушную среду во многих городах нашей страны. Такая ситуация по своему

характеру уже приближается к тому состоянию, при котором фотохимические смоги становятся высоко вероятными.

3.9 Влияние городов на региональные и глобальные изменения в атмосфере

Воздушные загрязнения, продуцируемые на территории больших городов уносятся ветровыми потоками на большие расстояния, исчисляемые сотнями и тысячами километров. Более того, газообразные продукты антропогенного происхождения, поступая в атмосферу, нарушают установившийся на протяжении миллионов лет природный баланс и ведут к глобальным изменениям климата и другим серьёзным последствиям.

Если говорить о влиянии городов на качество окружающей среды в масштабах отдельной страны или же группы близлежащих стран, то следует, прежде всего, иметь в виду образование кислотных осадков (в частном случае кислотных дождей). Выпадение кислотных дождей связано с антропогенным загрязнением атмосферы выбросами диоксида серы и оксидов азота. Оксиды образуются, в первую очередь, при сжигании органического топлива – угля, мазута, керосина, бензина, и в меньшей мере при сжигании природного газа. Оксиды азота и серы, взаимодействуя с парами воды, находящейся в атмосфере, образуют серную, сернистую и азотную кислоты. В этом случае осадки становятся закисленными, т. е. значение pH в них опускается ниже 5 – 6 (иногда оно падает до значений 3÷3,5). Ежегодно в атмосферу поступает более 250 млн. тонн кислотообразующих оксидов. Большая часть их образуется в Северной Америке, Европе и Австралии. В последние годы резко возрастают выбросы оксидов также в таких странах как Китай, Индия, Саудовская Аравия и других.

Негативные последствия от выпадения кислотных дождей очень значительны. Прежде всего от этого страдает растительный покров планеты. В различных регионах мира уже сейчас погибли леса на сумарной территории более 30 млн га. На территории Германии кислотными дождями повреждены около 35% площади лесных массивов, в Канаде практически погибли старейшие (возраст до 300 лет) леса из бальзамической ели, на территории США (в Северных Аппалачах) погибают горные леса из красной ели. Подобные примеры можно приводить и по другим регионам планеты. Ки-

слотные дожди уменьшают плодородие почвы, снижают урожайность сельско-хозяйственных культур. Так при уменьшении pH ниже 5,0 начинается прогрессивное уменьшение урожайности, а при pH=3,0 почвы становятся практически бесплодными.От кислотных дождей страдают озерные водоёмы, в которых уменьшаются рыбные запасы, происходит деградация популяции видов рыб или вообще исчезают признаки жизни. От кислотных дождей особенно пострадали озера в США, Канаде, в странах северной Европы. В Канаде закислены более 14000 озёр, В Швеции – 15000 озёр (в 1800 утрачены признаки жизни), в Норвегии из 5000 обследованных озер в 1750 исчезла рыба.

В целом потери от кислотных осадков исчисляются огромными суммами и во многих случаях остаются невосполнимыми.

Еще более серьёзное негативное влияние городов и индустриальных центров на состояние земной атмосферы наблюдается на глобальном уровне.

Главным и наиболее опасным фактором является изменение климата при воздействии так называемого «парникового эффекта» Отдельные газы, и в первую очередь двуоксид углерода (углекислый газ – CO_2) обладают свойством задерживать инфракрасное (тепловое) излучение Земли в космическое пространство и тем самым способствовать повышению температуры атмосферы выше равновесных значений. Само равновесное значение процентного содержания CO_2 складывалось за счет процессов его образования (вулканическая деятельность, горение лесов, антропогенные источники и т.п.) и процессов поглощения с образованием кислорода при реакциях фотосинтеза в растительном мире на поверхности Земли и в фитопланктоне мирового океана.

Как уже было отмечено, основной причиной поступления оксидов в атмосферу (включая сюда и CO_2) является сжигание органических топлив. Во всем мире к началу 90-х годов выбрасывалось ежегодно в атмосферу примерно 8 млрд. т. диоксида углерода, что составило примерно одну тонну на каждого жителя планеты. Эти выбросы неравномерно распределяются между отдельными странами. Наиболее значительные выбросы (более 5 т на душу населения) происходят на территории США. В Канаде этот показатель равен 4,24 , а в Австралии – 4,00 , в бывшем СССР – 3,68 , в Польше, в Великобритании – 2,73. В то же время в большинстве стран выбросы на душу населения значительно меньше (изменяются от 0,03

в Заире до 0,96 в Мексике). В Украине выбросы углекислого газа в последние годы уменьшились и стали ниже процентной квоты, установленной так называемым Киотским протоколом. С начала 20-го столетия увеличение выбросов CO_2 в атмосферу во всем мире составляло 4÷5% ежегодно.

Кроме углекислого газа парниковый эффект создают и другие вещества, такие, как метан, фреоны и оксид азота. Концентрация метана в атмосфере в последнее время возрастает примерно на 1% в год. Метан образуется при разработке угольных месторождений. при гниении биомассы, за счет выделений крупного рогатого скота и других животных. Увеличение содержания в атмосфере оксида азота (0,3% ежегодно) объясняется в основном ростом производства и применения азотных удобрений. Фреоны (или хлорфторуглеводы) широко применяются в холодильной технике и других видах производства (при ежегодном росте 4%). Влияние метана, фреонов и оксида азота на парниковый эффект происходит в разных масштабах. Так эффект поступления в атмосферу молекул метана в 25 раз интенсивнее, чем эффект поступления CO_2. Фреоны являются еще более активными (примерно в 10000 раз по сравнению с CO_2).

Влияние парниковых газов уже привело к повышению среднегодовой температуры на 1,2 градуса по сравнению с доиндустриальным периодом (конец девятнадцатого столетия). К 2025 г ожидается повышение на 2,2÷2,5 градуса. Парниковый эффект может привести к значительным отрицательным последствиям для всей земной цивилизации. Следует назвать, прежде всего, такие явления, как таяние полярных льдов, и повышение уровня мирового океана (от 0,5 до 2 м), затопление значительных прибрежных территорий, засухи на территориях с умеренным климатом, таяние вечной мерзлоты, деградация мангровой растительности и т.п. По предположениям специалистов, все процессы изменения климата будут происходить на фоне резкого возрастания природных катаклизмов: образование мощных ураганов, ливневых дождей с грозами и градом, катастрофических наводнений, длительных засух и т.п. Более того, парниковый эффект может перейти в неконтролируемое со стороны человека состояние. Дело в том, что в мировом океане растворены миллиарды тонн углекислого газа. Нагревание океана может привести к его выделению и еще более быстрому нарастанию парникового эффекта.

Следует сказать, что глобальное потепление может создать временные улучшения экологических условий в отдельных частях земного шара в виде продвижения земледелия на более северные территории, повышение влажности атмосферы в отдельных регионах, расширении растительного покрова. К сожалению, отрицательные последствия потепления климата ожидаются более значительными, чем положительные изменения.

В связи с этим, мировая общественность в последние 20-25 лет активно обсуждает данную проблему, принимаются определенные международные соглашения. Часть государств уже сейчас принимает меры направленные на предотвращение общей беды. Другие государства (в том числе и США) еще не присоединились к этому процессу.

Кроме ожидаемого глобального потепления, появляются и другие экологические проблемы мирового масштаба. Речь идет о губительном воздействии антропогенных выбросов на озоносферу, т.е. на озоновый слой, который располагается в атмосфере на высотах от 10 до 50 км (максимальная концентрация на высотах 18 – 26 км). Озон играет очень важную роль в процессах радиационного переноса солнечной энергии. Он практически полностью поглощает жесткую ультрафиолетовую часть солнечного радиационного потока, идущего в направлении земной поверхности. Это предотвращает губительное воздействие ультрафиолета на живые организмы. Поглощение озоном солнечной энергии определяет нагрев атмосферы на высотах 30 – 60 км, что в свою очередь, через сложнейшие механизмы взаимодействия формирует динамические и тепловые процессы в атмосфере, и, в конечном счете, определяет специфику климата на нашей планете.

Всего в нашей стратосфере содержится 3,3 трлн. т озона в очень разреженном состоянии. В принципе, это количество (по земным масштабам) невелико, поскольку при нормальных условиях, т.е. при давлении 760 мм рт. ст. и температуре 20°С толщина слоя озона составила бы всего 2,5÷3мм. Взаимодействие озона с антропогенными полютантами приводит к его разложению. В связи с этим, над отдельными территориями образуются так называемые «озоновые дыры», т.е. участки с низкой концентрацией озона. Это явление считается опасным для нормальной жизнедеятельности на Земле. В разрушении озона играет роль целый комплекс веществ, поступающих в атмосферу, и, в первую очередь, таких как окислы

азота и тяжелых металлов, фреоны, хлор, фтор, бром и их соединения.

Таким образом, перед человечеством встает целый ряд проблем, в решении которых требуются усилия уже не одной страны, а всего мирового сообщества.

3.10 Моделирование подстилающей поверхности городской территории

Характер подстилающей поверхности является одним из основных факторов, которые определяют законы миграции полютанов в воздушной среде города. Форма земной поверхности непосредственно на городском участке территории, или орография, является ее основным элементом. Следующими элементами являются объекты, которые расположены на поверхности земли. В первую очередь – это застройка жилищной и пригородной зоны. На территории городов могут быть размещены, или примыкать к ней, разнообразные растительные массивы (парки, рекреационные участки). Городская подстилающая поверхность существенно отличается от сельской совокупностью значительного количества источников загрязнения, таких, как дымовые трубы промышленных, энергетических и коммунальных предприятий, а также линейные источники, то-есть разветвленная сеть автомобильных дорог, где в больших городах движутся и загрязняют атмосферу тысячи транспортных средств. Есть и другие, менее весомые элементы, например, участки сильно нагретой территории (заасфальтированные площади), участки повышенной влажности и т. п. В принципе, характер подстилающей поверхности и размещенных на ней объектов определяет общее состояние атмосферы, включая не только степень ее загрязнения но также и значение локальных метеопараметров, таких как температура, влажность, характер воздушных потоков и другие физические величины. Для описания подстилающей поверхности какого-либо города обычно применяют ряд упрощенных моделей. Здесь предлагается модель, в которой территория города преподносится в декартовой системе координат x, y, z (x, y – примыкают к поверхности, z – направлена вертикально вверх). При этом сама территория находится в пределах координатного прямоугольника, ориентация которого выбирается в зависимости от того, как расположен город на местности. Далее проводится идентификация со-

средоточенных, площадных и линейных объектов в заданной системе координат (то-есть фиксация положения этих объектов на местности и описание их внешней формы). Кроме координатного описания объектов в систему их идентификации включается также некоторые дополнительные данные. Например, для источников выбросов – это интенсивность и состав вредных веществ, для жилищных массивов – средняя высота строений и сооружений и плотность их застройки, а для растительных массивов – средняя высота деревьев и плотность их размещения.

Вдоль каждой линии, которые формируют координатную сетку $x_i = const$ и $y_j = const$, задается форма земной поверхности в виде $z = z_i(x)$ и $z = z_j(y)$, совершается построение сетчатого каркаса так называемого нулевого слоя. Далее создается следующий слой, который описывает отдельные наземные объекты, упомянутые ранее.

Таким образом, земная поверхность, которую следует смоделировать, представляет собой так называемый «первый слой». «Второй слой» – это разнообразные наземные объекты, при размещении которых учтено рельеф земной поверхности. И на конец, «третий слой» – это слой, который позволяет детализировать уже отдельные объекты. Для этого выбирают участки территории ограниченных размеров (например, 100 м×100 м). В этом случае проводится построение моделей отдельных сооружений, строений, уличных каньонов, растительных участков.

Математическое описание участков земной поверхности и расположенных на ней объектов в данной работе предлагается с применением так называемых комбинированных функций [5]. Комбинированная функция – это заданная при помощи единого аналитического выражения совокупность функций разного типа $F_i(x)$, каждая из которых описывает характер изменения аргумента только на отдельном участке $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$ заданного конечного отрезка числовой оси. Этот отрезок разбит на n отдельных участков Δx узловыми точками с координатами x_i $(i = 0..n)$. При этом

$$\overline{F}(x) = A_1F_1 + A_2F_2 + ... + A_nF_n. \qquad (3.4)$$

Черта над F указывает на тот факт, что функция является комбинированной. Коэффициенты A_i в правой части отличные от нуля только для значения координаты x, которая ограничена $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$. В выражении (18). Имеем:

$$A_1 = \lambda_0(1-\lambda_1)(1-\lambda_2)...(1-\lambda_n),$$

$$A_2 = \lambda_0\lambda_1(1-\lambda_2)...(1-\lambda_n), \qquad (3.5)$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$A_n = \lambda_0\lambda_1...\lambda_{n-1}(1-\lambda_n).$$

Множителям λ_i присущи свойства известной функции Хэвисайда: $H(x) = 0;0;1$ при $x<0; x=0$ и $x>0$ соответственно. В компьютерном представлении λ_i можно записать в виде

$$\lambda_i = 0.5[1 + Sgn(x - x_i)]Sgn(x - x_i). \qquad (3.6)$$

Комбинированные функции могут быть многомерными. В этих случаях в качестве независимой переменной можно выбрать время t или другие величины. В качестве базовых функций для описания формы земной поверхности $z_k(x)$ вдоль координатной линии $y_j = const$ на отрезке Δx_i можно применять выражение типа

$$F_i(x) = \frac{z - z_{i-1}}{z_i - z_{i-1}} = m\left(\frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}\right)^{m-1} - (m-1)\left(\frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}\right)^{m}. \qquad (3.7)$$

Здесь $m > 2$ – параметр, который определяет степень крутизны подъема поверхности, или в трансформированном виде – степень крутизны спуска. Для описания формы возвышенность или оврагов можно использовать формулы типа функции Гаусса и другие выражения. Аналогично аппроксимируется поверхность вдоль $x_i = const$.

Форму отдельных строений при детализированном описании объектов будем задаваться в виде

$$\Phi_i(x,y) = \overline{H}_i(y)\sqrt{\left|\frac{(x_i - x_{i-1})^2 - \left|(x_i + x_{i-1} - 2x)^2\right|}{(x_i - x_{i-1})^2 - M\left|(x_i + x_{i-1} - 2x)^2\right|}\right|}. \qquad (3.8)$$

Здесь H_i – высота прямоугольного строения, которое имеет длину $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$. При этом $\overline{H}(y)$ является комбинированной функцией по координате y и на промежутке $\Delta y_j = y_j - y_{j-1}$ $H_j = const$. В выражении (3.8) коэффициент M – по-

стоянная (обычно $M \approx 0{,}9$), задает форму поперечного сечения строения. Участок растительности моделируется функцией:

$$R(x) = \frac{\overline{Hd}_i(y)}{2} \sin \frac{\pi(x - x_i)}{Sh_i} \left[1 + Sgn\left(\sin \frac{\pi(x - x_i)}{Sh_i} \right) \right] Sgn\left(\sin \frac{\pi(x - x_i)}{Sh_i} \right), \qquad (3.9)$$

где Hd_i – средняя высота, а Sh_i – ширина дерева или куста на заданном участке. $\overline{Hd}_i(y)$ – комбинированная функция по координате y. В принципе, возможно использование других базовых функций.

Как пример, было рассмотрено изображение подстилающая поверхность м. Днепропетровска по одному из направлений $x_i = const$. Упрощенная схема ограниченного участка по оси x представлена на рис. 3.1.

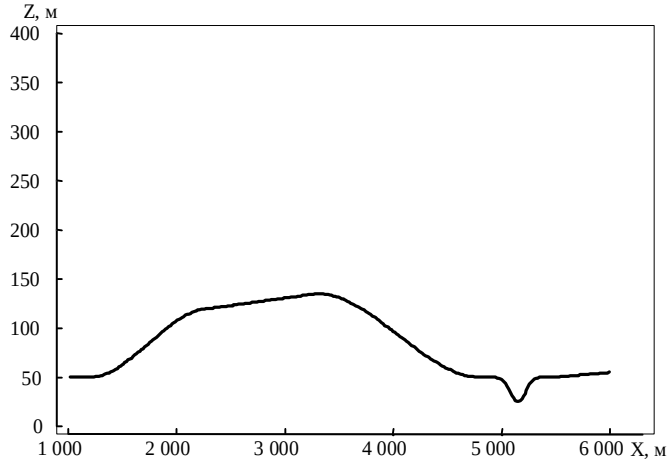


Рис. 3.1 Моделирование рельефа земной поверхности

На рис. 3.2 проиллюстрирована аналитическая модель отдельных зданий и растительного покрова. Моделирование объектов подстилающей поверхности позволяет определить характер воздушных течений в приземном слое и рассчитать распространение загрязняющих веществ на различных участках городской территории.

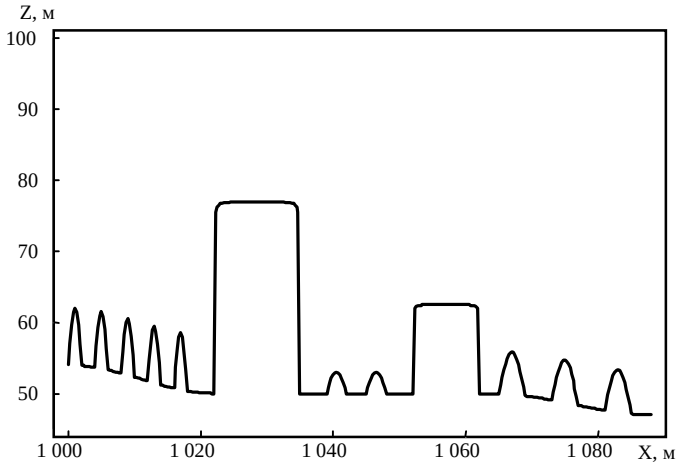


Рис. 3.2 Моделирование прямоугольных зданий и растительного массива

Таким образом, проблема математической модели подстилающей поверхности может быть эффективно реализована в виде аналитической зависимости высоты от двух переменных путем суперпозиции некоторых комбинированных функций стандартного вида. Указанная зависимость в принципе с какой-либо степенью детализации может быть построена для любого участка территории города и даже для всего города в целом на основании топографических карт и изображений, полученных, к примеру, с помощью спутника.

3.11 Аэрология объектов городской застройки

Характер распространения загрязнений в пределах застроенной территории существенным образом зависит от высоты над поверхностью земли, на которой рассматривается ветровое течение. Как было отмечено ранее, ветровой поток над городской территорией можно условно поделить по высоте на три слоя. Первый, приземный слой, имеет толщину, обусловленную средней высотой зданий и других объектов. Второй слой, расположен над приземным слоем, и имеет такую толщину (высоту), на которой проявляется влияние подстилающей поверхности. Наконец, третий слой начинается на той высоте, где влияние этой поверхности отсутствует. Благодаря турбулентному характеру ветрового потока и вертикальному перемешиванию, загрязнение поступает во все три слоя, но распространяется с разной скоростью. Самым важным с точки зрения оценки вредного действия на жителей города является нижний слой, и особенно, так называемые пешеходные зоны, высотой

приблизительно до 2 метров над поверхностью земли. С целью анализа ветровых потоков в приземном слое необходимо исследовать аэрологию городских объектов, таких как отдельные здания, сооружения, уличные каньоны и т. п. Речь идет об определении давления на поверхности зданий и сооружений, их лобового сопротивления, а также о характере потоков непосредственно вокруг этих объектов. Следует с самого начала отметить, что задачи с определением этих параметров для отдельных зданий, и особенно, для их взаимного влияния в зависимости от характера застройки, очень сложные. Приближенны решения получены только для самых простых случаев. Самыми надежным методом исследований остаются продувки моделей в аэродинамических трубах, гидравлических лотках, а также замеры параметров полномасштабного потока вокруг реальных объектов. Для теоретических расчетов необходимо воспользоваться основными уравнениями механики жидкости и газа, которые в общем виде записываются в частных производных.

Изначально необходимо исследовать физическую картину течений, которые возникают вблизи объекта. Упрощенным вариантом, который стоит рассмотреть с начала, является так называемый двумерный поток. Имеется ввиду поток вокруг здания, который характеризуется большим (бесконечным) размером в длину l по отношению к высоте h и ширине b (рис. 3.3)

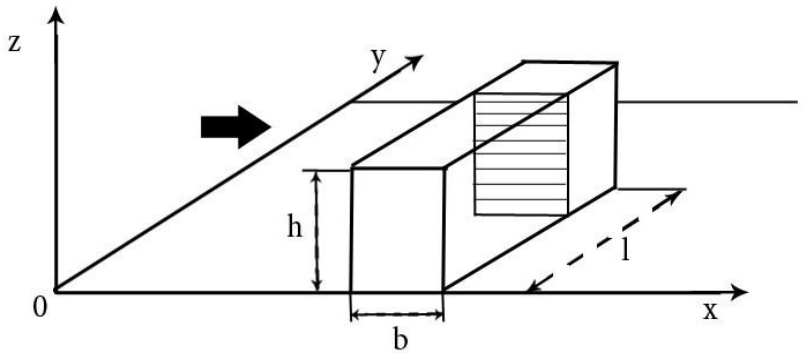


Рис. 3.3 Двумерный поток возле здания большой длинны
(в плоскости заштрихованного разреза)

Предполагается, что ветровой поток направлен перпендикулярно к передней стенке здания, и рассматривается в плоскости xOz. Здание имеет форму параллелепипеда.

Если длина здания l значительно больше, чем ее высота h и ширина b, то в центральном разрезе, показанном на рис. 3.3, реализуется течение, которое можно считать двумерным. В данном случае параметры течения являются функциями только координат x и z. Направления векторов скорости в поле ветрового потока условно изображено на рис. 3.4.

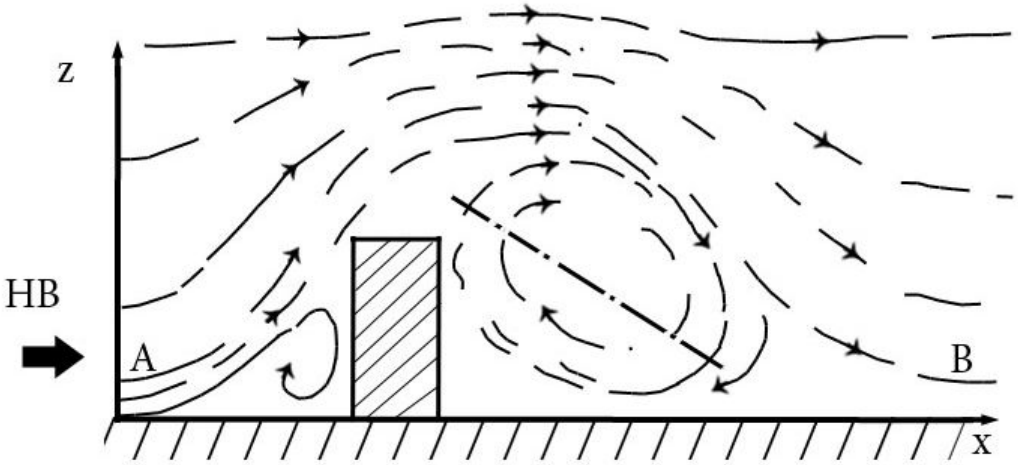


Рис. 3.4 Общая картина ветрового течения вокруг здания в двумерном приближении (НВ – направление ветра)

Когда поток воздуха встречает на своем пути здание, которое по форме напоминает параллелепипед, то, не достигнув передней стенки на расстоянии приблизительно $2h$, он начинает подниматься вверх, достигает высоты приблизительно $2h$ на расстоянии $1{,}5h$ от заданной стенки, опускается вниз и достигает поверхности земли уже на расстоянии $5 \div 6h$. При этом возникают две вихревые зоны: одна, более мощная – сзади здания, и вторая, значительно меньше по масштабу – перед ним. Вихревая зона сзади здания ограничена сверху так называемой «нулевой линией тока». Ее начало и конец обозначено буквами А и В. Отметим, что теневая вихревая зона имеет циркуляционную форму, а линии тока образуют своеобразный эллипс. Большая ось эллипса показана штрихпунктирном и наклонена под некоторым углом к оси x, приблизительно 6° – 7°. Описанная картина течения соответствует результатам экспериментов, которые проводились в аэродинамических трубах, в гидролотках, и при натурных измерениях ветрового потока вокруг здания [126].

Если высота здания h значительно превышает ширину b (при достаточно значительной длине l), то приземный поток можно рассмотреть как двумерный уже в новой плоскости xy рис. 3.5:

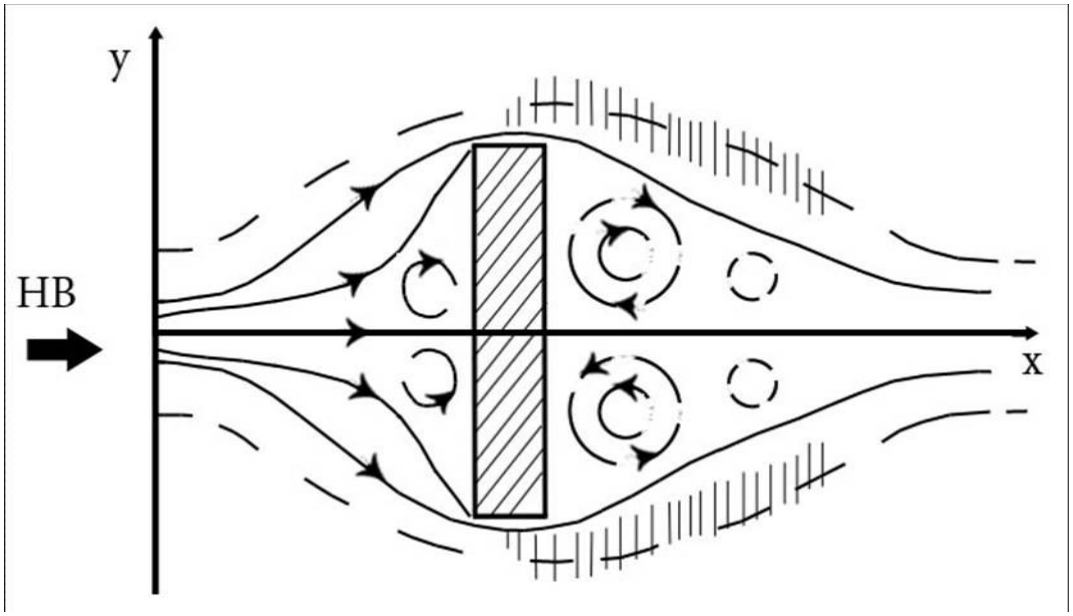


Рис. 3.5 Картина течения вокруг высокого и длинного здания (НВ – направление ветра).
Вертикальной штриховкой обозначено зоны высоких скоростей

На рисунке видно, что в этом случае циркуляционные линии возникают в горизонтальной плоскости как непосредственно перед зданием, так за ним. Такую картину течения можно зафиксировать на незначительной высоте (приблизительно 2 м над поверхностью земли). Следует отметить, что рассмотренные модели течения значительно упрощены. Вихревые зоны, показаны на рис. 3.4 и рис. 3.5 возникают поблизости зданий одновременно и взаимодействуют между собой, то-есть течение является по сущности пространственным, трехмерным. Каждое из зданий по отношению к направлению ветра может быть сориентировано произвольным образом. Картина течения в общем случае зависит также от расположения зеленых насаждений, топографических особенностей местности и других факторов. Сюда следует добавить то, что скорость ветра в пограничном слое изменяется по высоте. Более того, течение вокруг здания нестационарное, поскольку вихри срываются с острых кромок здания с определенным интервалом. Таким образом, с целью уточнения анализа, кроме числа Рейнольдса следует использовать и параметр Струхаля, который определяет периодические явления в потоке.

$$Sh = \frac{N \cdot l}{V} \quad . \tag{3.10}$$

Здесь $N = 1/T$, T – период колебаний, l – характерный размер, V – скорость.

Для расчета течения воздуха с использованием приблизительных моделей используются разные модели. Метод конформных отображений позволяет построить линии потока, подобные тем, которые возникают при обтекании профиля Жуковского (рис. 3.6).

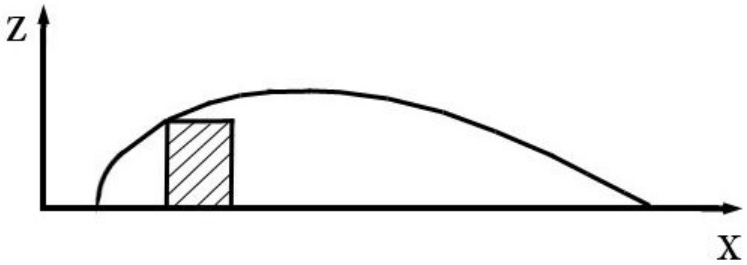


Рис. 3.6 Конформное отображение, которое имитирует нулевую линию тока при обтекании здания

Детальное описание его построения можно, например, найти в работе [126]. Там приводятся все основные расчетные соотношения. В этой же работе приводится метод элементарных источников и стоков, которые достаточно расположить определенным образом в фиксированных точках геометрической фигуры, чтоб смоделировать поле течения. Если задаться интенсивностью сосредоточенных источников и стоков, можно построить линии тока вокруг здания, определить скорость течения, и построить форму вихревой зоны. Для расчетов течения вокруг зданий широко используется метод элементарных вихрей, с которым можно ознакомится в работах [149, 119, 120] и других.

Пространственные течения вокруг зданий достаточно сложные. До нынешнего времени не разработаны надежные математические модели для расчета необходимых параметров таких течений. Задача усложняется тем, что городские сооружения, как правило, расположены на местности в определенном порядке на небольшом расстоянии одна от другой, и создают так называемый «городской лабиринт». Течение воздуха в таком лабиринте на высоте примерно 2 м над поверхностью земли (высота размещения пешеходов) вызывает самый большой интерес, поскольку как раз

на этом уровне возникает необходимость определить концентрацию воздушных загрязнений.

Наиболее надежными инструментами исследования пространственных течений вокруг сооружений являются лабораторные эксперименты в аэродинамических трубах, и натурные измерения параметров ветрового потока. Экспериментальные данные такого типа собраны в работах [67, 126, 209] и др. Рассмотрим некоторые результаты исследований поля течения вокруг зданий и данные о силовом воздействии потока на их поверхность. Пространственная картина течения возле подветреной стенки здания имеет вид, представленный на рис. 3.7.

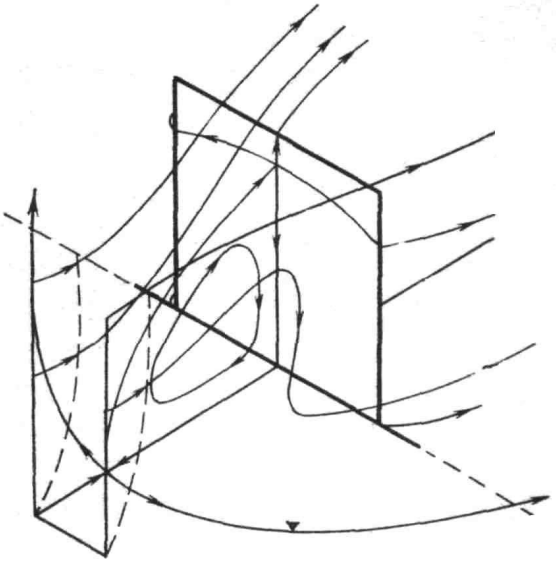


Рис. 3.7 Поле скоростей при набегании на переднюю стенку сооружения (с учетом пограничного слоя)

Распределение коэффициента давления по поверхности здания, которое имеет форму куба, и высотного сооружения в виде параллелепипеда, при набегании ветра по нормали к передней стенке, показано на рис. 3.8.

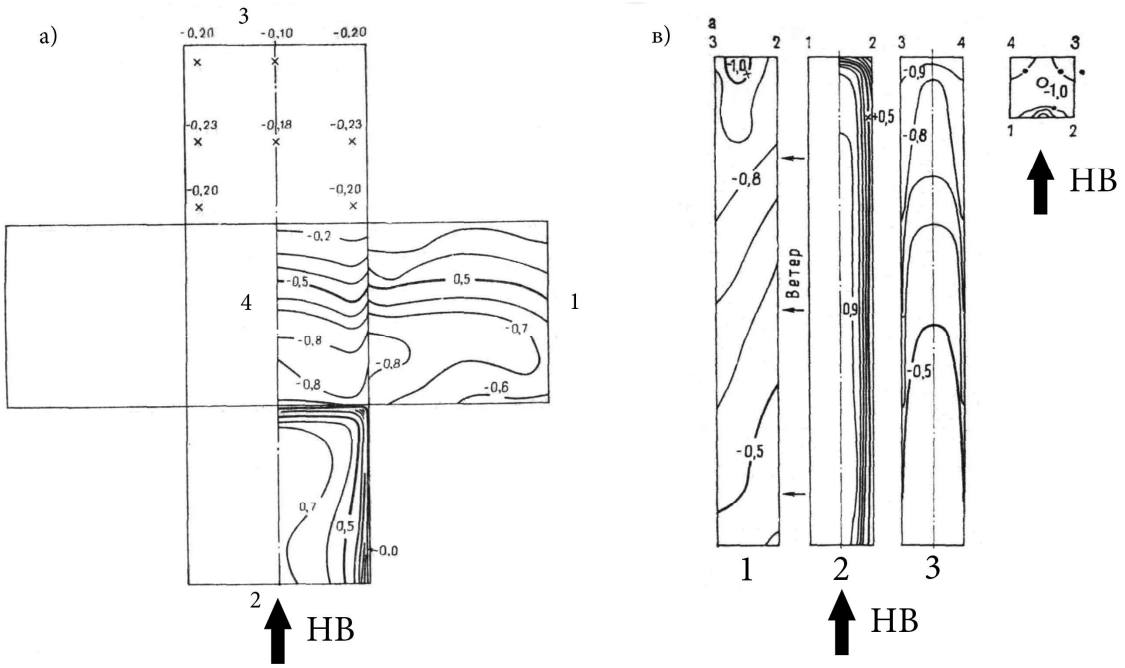


Рис. 3.8 Распределение коэффициента давления на строении в форме куба (а) и высотном строении типа параллелепипеда (в) 1 – боковая сторона, 2 – наветренная сторона, 3 – подветренная сторона, 4 – крыша

Коэффициент давления получен из выражения

$$\overline{p} = \frac{2\left(p - p_\infty\right)}{\rho V_\infty^2} \quad . \tag{3.11}$$

В этом выражении индекс «∞» обозначает параметр невозмущенного набегающего потока.

Экспериментальные исследования проводились также для сравнения силового действия на модель (см. рис. 3.9) и на натурный объект. При натурном эксперименте учитывалась шероховатость поверхности z_0 на территории, где находится строении. При этом было задано $H/z_0 = 170$.

Рассмотрев поле скорости и силовое действие ветра на отдельные сооружения.

Можно отметить, что приближенные соотношения типа формулы Гаусса для определения концентрации вредного вещества в воздухе можно использовать, если известна форма линий тока вокруг сооружений.

При плотной застройке территории ветровые потоки в городском лабиринте можно определить, если будет известно сопротивление отдельных элементов застройки. В связи с этим, были проведены дополнительные исследования и получены соотношения, которые позволяют определить коэффициент сопротивления типичных городских сооружений. Экспериментальные данные взяты из работ [67, 126, 209].

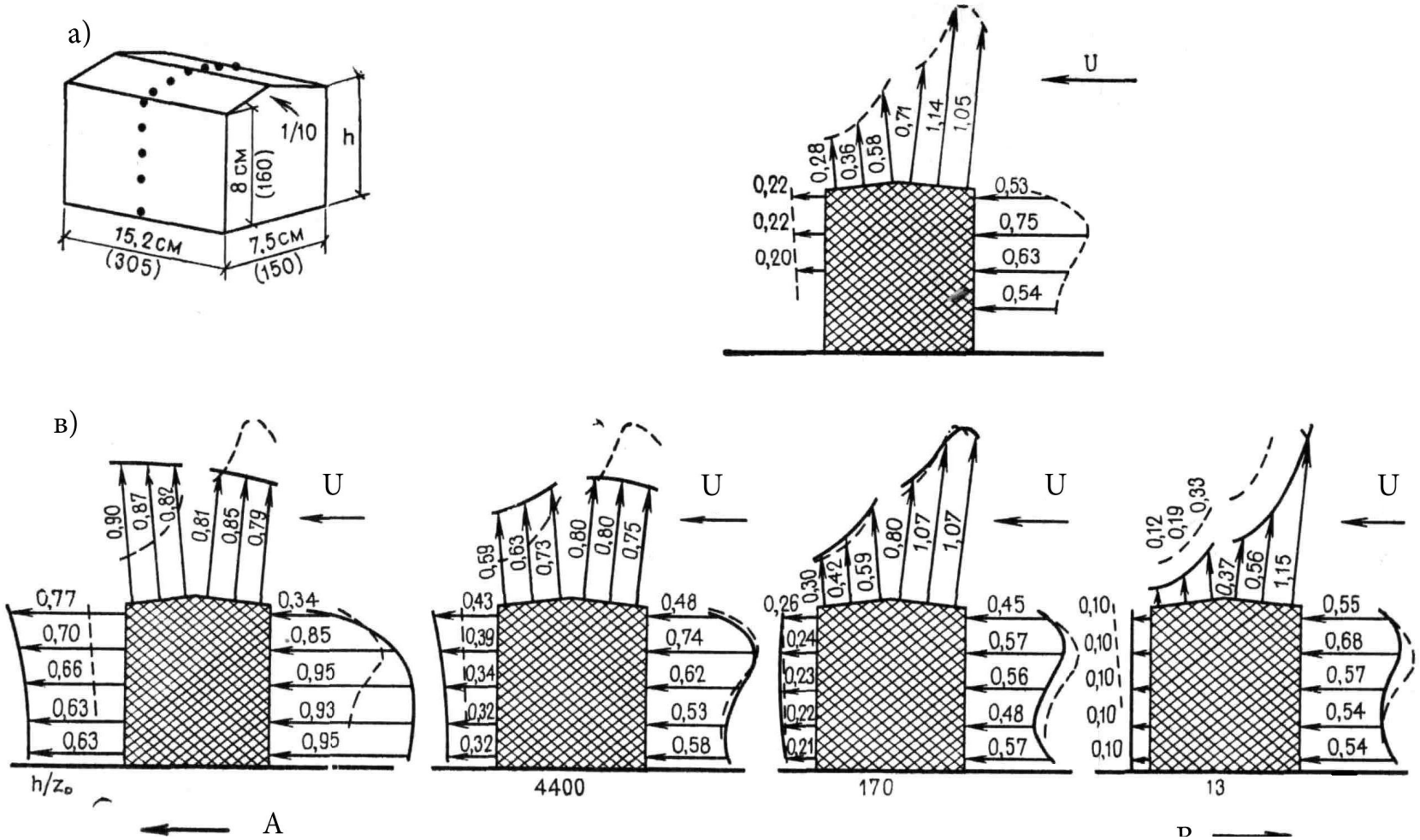


Рис. 3.9 Распределение коэффициенте давления на поверхности натурального объекта (а) и на поверхности его модели (в) (масштаб 1/20). Пунктиром обозначено распределение $\bar{p}$ при повышенной шероховатости

Рассмотрим сооружение, которое изображено на рис. 3.10.

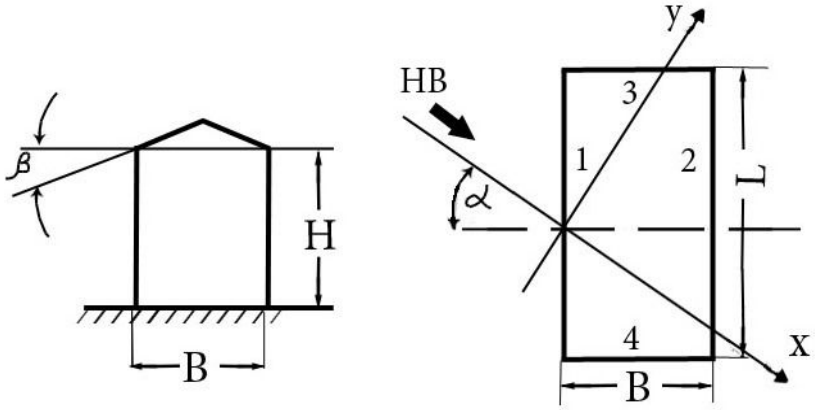


Рис. 3.10 Типичное городское сооружение, которое обтекается ветровым потоком (вид сбоку и вид в плане)

Лобовое сопротивление (без учета сопротивления крыши, которое считается незначительным) можно записать в виде

$$X = q_\infty S_M \left[\bar{S}_1(\bar{p}_1 - \bar{p}_2)\cos\alpha + \bar{S}_3(\bar{p}_3 - \bar{p}_4)\sin\alpha\right] . \tag{3.12}$$

В этом выражении q_∞ динамическое давление

$$q_\infty = \frac{\rho_\infty V_\infty^2}{2} , \tag{3.13}$$

S_M – характерная площадь

$$S_M = L \cdot H , \tag{3.14}$$

$$S_1 = S_2 = L \cdot B; \quad S_3 = S_4 = H \cdot B; \tag{3.15}$$

$$\bar{S}_1 = S_1 / S_M ; \quad \bar{S}_3 = S_3 / S_M ;$$

$\bar{p}_i$ – коэффициент давления на соответствующую поверхность, обозначенную цифрами. При этом 1 – лобовая поверхность, 2 – теневая поверхность, 3, 4 – боковые поверхности.

В таблице 3.2 представлены коэффициенты лобового сопротивления четырех типичных городских сооружений с разнообразной ориентацией по отношению к направлению ветра. Коэффициенты отнесены к динамическому напору ветра и площади передней стенки $S_M = S_1 = H \cdot L$.

Таблица 3.2. Коэффициент лобового сопротивления наиболее типовых городских сооружений

N п/п	H – B – L	α=0°	α=15°	α=45°	α=90°
1	1-1-1	1,4	1,202	1,414	1,10
2	2,5-2-5	1,4	-	1,030	0,52
3	2-1-2	1,4	-	1,061	0,65
4	1-4-4	1,2	1,166	1,273	1,20

Из таблицы видно, что первое сооружение имеет форму куба, который накрыт пологой крышей, второе и третье сооружения моделируют высотные здания, а четвертая – здания небольшой высоты. Значения коэффициентов рассчитаны с помощью эмпирических соотношений, которые получены на основе экспериментальных данных. Обозначения H – B – L представляют собой отношения размеров высоты строения (H), ширины (B) и длинны (L).

4 ОСНОВНЫЕ ЗАГРЯЗНЯЮЩИЕ ВЕЩЕСТВА

Поистине, если «чудом» мы называем власть над природой, то оно, «чудо», всего более являет себя в бедствиях.

Френсис Бекон

… и дым отечества нам сладок и приятен.

А. Грибоедов

В спертом воздухе не надышишься.

Козьма Прутков

4.1 Происхождение и классификация

Большинство вредных ингредиентов возникают и попадают в атмосферу в результате горения. Углерод, сера, водород, азот в чистом виде или в составе соединений при горении окисляются и поэтому в тепловых выбросах присутствует преимущественное количество именно таких вредных веществ. Окись водорода H_2O, то есть пары воды, и двуокись углерода CO_2 (углекислый газ) присутствуют в атмосфере как естественные компоненты и поэтому не отнесены к категории загрязнителей, несмотря на то, что концентрация CO_2 влияет на окружающую среду в глобальном измерении и это влияние анализируется с точки зрения климатологии. В то же время, недоокисленный углерод (CO), окислы серы и азота являются основными загрязнителями в процессах горения. При взаимодействии выбросов между собой и с атмосферным воздухом и водяным паром появляются новые вредные ингредиенты, которые следует учитывать в процессе анализа экологического состояния окружающей среды.

Если рассматривать не только горение, но и широкий класс технологических процессов, при которых имеют место химические реакции и физические превращения, то количество вредных ингредиентов возрастает в десятки раз. Кроме того, следует иметь в виду, что вредные вещества создаются в значительных количествах не только антропогенным путем, но также в результате природных явлений: извержения вулканов, лесных пожаров, солнечной радиации и т.п. Существует несколько способов классификации веществ, загрязняющих окружающую среду. С этой точки зрения вредные вещества разделяют на аллергены, мутагены, канцерогены, отрав-

ляющие вещества, а также ингредиенты радиоактивного и комплексного воздействия.

По химическому составу они также могут быть разделены на несколько групп: соединения серы (серная кислота, окислы серы, сероводород и т.д.), соединения азота (азотная кислота, аммиак, нитраты, цианиды, амины, растворяющие и разбавляющие соединения, окислы и т.п.), галогены и их соединения (хлор, фтор, бром, фтороводород, ДДТ, хлороформ, хлорбензол и т.п.), соединения углерода (окись углерода, углеводородные: бензол, толуол, метанол, этанол, фенол, альдегиды и т.п.), металлы и их соединения (свинец, ртуть, тетраэтилсвинец), соединения, которые возникают при фотохимическом синтезе и свободные радикалы.

Рассмотрим действие основных загрязняющих атмосферу веществ на окружающую среду, человека и другие живые существа. При этом будем иметь в виду то, что результат такого действия зависит от двух параметров: концентрации вещества в воздухе (ее мы будем выражать в мг/м^3 при нормальных условиях, то есть при $t°$=15°С; p=760мм рт. ст.), а также периода экспозиции в часах. Уровень вредного воздействия полютантов на человека можно оценить на основе экспериментально установленных норм, или значений предельно допустимой концентрации (ПДК). ПДК – это максимально допустимая концентрация вредного вещества в окружающей среде (в атмосфере в воде и т. п.), которая при заданном времени воздействия на человека еще не вызывает временного или устойчивого нарушения его жизнедеятельности. Перечень отдельных вредных веществ с указанием их предельно допустимой концентрации приведен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Значения предельно допустимой концентрации для основной группы полютантов

Вещество	ПДК максимальная разовая, мг/м^3	ПДК среднесуточная, мг/м^3
Азота диоксид	0,085	0,04
Азота оксид (II)	0,4	0,06
Азотная кислота	0,4	0,15
Акролеин	0,03	0,03
Аммиак	0,2	0,04
Анилин	0,05	0,03
Ацетальдегид	0,01	0,01
Ацетилен	-	-

Продолжение таблицы 4.1.

Вещество	ПДК максимальная разовая, мг/м^3	ПДК среднесуточная, мг/м^3
Ацетон	0,35	0,35
Барий металлический	-	-
Белок пыли белково-витаминного концентрата (БВК)	-	0,001
Бенз(а)пирен	-	1нг/м^3
Бензин нефтяной малосернистый (в пересчёте на углерод)	5	1,5
Бензин сланцевой (в пересчёте на углерод)	0,05	0,05
Бензол	1,5	0,1
Бериллий и его соединения (в пересчёте на бериллий)	-	-
Борная кислота	-	0,02
Бром	-	0,04
Бромоводород	0,1	0,1
1,3-Бутадиен	3	1
Бутан	200	-
Ванадия (V) оксид	-	0,002
Взвешенные вещества (пыль, недифференцированная по составу)	0,5	0,15
Винилацетат	0,15	0,15
Газообразные соединения фтора (в пересчёте на фтор)	0,02	0,005
Гексан	60	-
Гексахлорбензол	-	-
Гексахлорциклогексан (гексахлоран)	0,03	0,03
Диборан	-	-
Диметиламин	0,005	0,005
Диметиланилин	0,0055	0,0055
Диметилформамид	0,03	0,03
м-Динитробензол	-	-
о-Динитробензол	-	-
п-Динитробензол	-	-
Дихлорэтан	3	1
Диэтиловый эфир	1	0,6

Продолжение таблицы 4.1.

Вещество	ПДК максимальная разовая, мг/м^3	ПДК среднесуточная, мг/м^3
Диэтилртуть (в пересчёте на ртуть)	-	0,0003
Железа сульфат (в пересчёте на железо)	-	0,007
Железа оксид (в пересчёте на железо)	-	-
Железа хлорид (в пересчёте на железо)	-	0,004
Изопропилбензол	0,014	0,014
Йод	-	0,03
Кадмия нитрат (в пересчёте на кадмий)	-	0,0003
Капролактам (пары, аэрозоль)	0,06	0,06
Карбамид (мочевина)	-	0,2
Карбонат таллия	-	0,0004
Кобальт металлический	-	0,001
Ксилол	0,2	0,2
Магния оксид	0,4	0,05
Марганец и его соединения (в пересчёте на марганец)	0,01	0,001
Меди оксид (в пересчёте на медь)	-	0,002
Меди сульфат (в пересчёте на медь)	0,003	0,004
Меди хлорид (в пересчёте на медь)	-	0,002
Метан	-	-
Метанол	1	0,5
Метилметакрилат	0,1	0,01
Мышьяк в неорган. соед. (в пересчёте на мышьяк)	-	0,003
Нафталин	0,003	0,003
Никель металлический	-	0,001
Никель, растворимые соли (в пересчёте на никель)	0,002	0,0002
Никеля оксид (в пересчёте на никель)	-	0,001
Нитрат аммония	-	0,3
Нитробензол	0,008	0,008

Продолжение таблицы 4.1.

Вещество	ПДК максимальная разовая, мг/м^3	ПДК среднесуточная, мг/м^3
Озон	0,16	0,03
Оксид магния	0,4	0,05
Оксид углерода	5	3
Окситетрациклин	0,01	-
Ортофосфорная кислота	-	-
Пенициллин	0,05	0,0025
Пентакарбонил железа	-	-
Пентан	100	-
Пропанол	0,3	0,3
Пыль древесная	-	-
Пыль меховая (шерстяная, пуховая)	-	-
Пыль неорганическая, содержащая SiO_2 в % ниже 20 (доломит др.)	0,5	0,15
Пыль неорганическая, содержащая SiO_2 в % 20-70 (шамот, цемент и др.)	0,3	0,1
Пыль неорганическая, содержащая SiO_2 в % выше 70 (динас и др.)	0,15	0,05
Пыль стекловолокна	-	-
Пыль хлопковая	0,5	0,05
Растворимые соли бария (ацетат, нитрат, хлорид)	-	-
Ртуть металлическая	-	0,0003
Сажа	0,15	0,05
Свинец и его неорганические соединения (в пересчёте на свинец)	0,001	0,0003
Свинец и его соединения, кроме тетраэтилсвинца (в пересчёте на свинец)	-	0,0003
Сера элементарная	-	-
Серная кислота	0,3	0,1
Сероводород	0,008	-
Сероуглерод	0,03	0,005
Серы диоксид	0,5	0,05
Синильная кислота	-	0,01

Продолжение таблицы 4.1.

Вещество	ПДК максимальная разовая, мг/м^3	ПДК среднесуточная, мг/м^3
Скипидар	2	1
Смесь водорастворимых соединений ртути (в пересчёте на ртуть)	-	-
Смесь плохо растворимых в воде соединений ртути (в пересчёте на ртуть)	-	-
Смесь плохо растворимых и растворимых в воде соед. ртути (в пересчёте на ртуть)	-	-
Стирол	0,04	0,002
Сурьма	-	-
Тетраэтилсвинец	-	-
Титана диоксид	-	-
Толуол	0,6	0,6
Уксусная кислота	0,2	0,06
Фенол	0,01	0,003
Формальдегид	0,035	0,003
Фосген	-	-
Фториды неорганические плохо растворимые (в пересчёте на фтор)	0,2	0,03
Фториды неорганические хорошо растворимые (в пересчёте на фтор)	0,03	0,01
Хлор	0,1	0,03
Хлороводород	0,2	0,2
Хром (VI) (в пересчёте на оксид хрома (VI))	0,0015	0,0015
Циклопетадиены	-	-
Цинка оксид (в пересчёте на цинк)	-	0,05
Углерод четырёххлористый	4	0,7
Эпихлоргидрин	0,2	0,2
Этанол	5	5
Этилбензол	0,02	0,02
Этилен	3	3
Этиленоксид	0,3	0,03
Этиленхлорид	-	0,2

4.2 Окись углерода (угарный газ).

Химическая формула – CO, атомный вес – 28, газ без цвета и запаха. Возникает в процессе окисления углерода при горении. Одним из основных источников CO в городах есть автомобильный транспорт. Ежегодные мировые выбросы окиси атмосферу оцениваются в объеме 200÷250 млн. т., из них 80% приходится на подвижные источники. Выбросы окиси углерода в полтора раза превышают суммарные (то есть вместе взятые) выбросы окисей серы, азота и углеводов.

Известно, что в США, Западной Европе, Японии и других странах с высоким уровнем промышленного производства очень высока концентрация автомобилей на городских магистралях. В связи с этим, концентрация CO в больших городах значительно превышает допустимые нормы. Например, уже в 60 - 70 годах прошлого столетия в отдельных городах США (Чикаго, Лос-Анджелес, Филадельфия и др.) средняя концентрация CO составляла 10÷15 мг/м^3 , а максимальная достигала 60÷65 мг/м^3 . Конечно, в настоящее время эти показатели значительно выше. Специалисты относят окись углерода к категории токсинов (ядов).

Исследованиями установлено, что уже при φ=50÷60 мг/м^3 и экспозиции $T = 8 \div 10$ часов появляются признаки отравления: головная боль, потеря сознания, ухудшение психомоторных функций, ухудшение способности воспринимать интервалы времени и т.п. Потеря сознания наступает при $\varphi \approx 250$ мг/м^3 , а $\varphi \approx 750$ мг/м^3 является смертельной дозой. Самая большая опасность отравления появляется для водителей автомобилей и тех, кто длительное время находится вблизи автотрасс, а также лиц, находящихся в плохо вентилируемых помещениях с печным отоплением.

Физиология отравления объясняется тем, что CO заменяет кислород, которым должен насыщаться гемоглобин крови, и в организме наступает кислородное голодание.

Действие окиси углерода на растения и материалы (дерево, металлы) к особым изменениям не приводит.

В атмосфере CO сохраняется достаточно долго: от нескольких дней до нескольких месяцев.

4.3 Окиси серы.

Химические формулы SO_2 и SO_3. Двуокись серы – негорючий газ без цвета с резким раздражающим запахом (при φ >3,5 мг/м^3). Его молекулярный вес 32. Это загрязняющее вещество изучалось наиболее интенсивно. В фотохимических и каталитических процессах переходит в SO_3. Основная угроза – образование серной кислоты при взаимодействии с парами воды.

Уже при малых среднесуточных концентрациях, то есть при $\varphi \geq 0{,}2$мг/м^3 появляются респираторные симптомы, а при $\varphi \geq 0{,}55$мг/м^3 наступает тяжелое отравление. Особенно опасны окиси серы для детей и пожилых людей. Основным источником окисей серы являются некоторые высокосерные сорта угля, которые выделяют их при сгорании, а также некоторые технологические процессы.

Пары серной кислоты, которые возникают во влажном воздухе, являются активными окислителями металлов, порождают так называемые кислотные дожди, которые отрицательно влияют на растительность.

4.4 Окиси азота.

Азот в соединениях с кислородом создает шесть окисей, общая химическая формула которых имеет вид - N_xO_y. Наиболее распространенными при выбросах в атмосферу являются окись NO и двуокись NO_2. Поскольку азот и кислород присутствуют в атмосфере как ее основные компоненты (азот относится к инертным газам), то возникновение окисей обусловлено достаточно высокими температурами, которые возникают при сгорании других соединений. Окись N_2O_4 это газ желто-бурого цвета, который является активным окислителем. Подобно окисям серы окиси азота становятся особо опасными при взаимодействии с парами воды и возникновении азотной кислоты. При вдохе воздуха, перенасыщенного окисями уже при $\varphi \geq 0{,}015$мг/м^3 наступает раздражение дыхательных органов, особенно у 2÷3 – летних детей. При больших концентрациях появляются спазмы грудной клетки и сильный кашель.

4.5 Углеводороды

Таким термином обозначен большой класс соединений, которые имеют общую формулу C_nH_m (например, метан, этан, пропан и др.). возникают они естественным путем, в большинстве случаев по соседству с нефтяными угольными месторождениями. В атмосфере появляются также недоокиси при горении других углеводов и при некоторых химических реакциях. Углеводороды являются основой топливных соединений, например, бензина. Опасными для людей являются только их значительные концентрации, например, в угольных шахтах, в бытовых условиях и т.д. Кроме того, опасность имеет место при фотохимических реакциях этих соединений с другими веществами в атмосфере, когда возникает фотохимический смог.

4.6 Продукты фотохимических реакций.

При взаимодействии солнечной радиации с химическими элементами, которые находятся в атмосфере, имеют место сложные реакции, приводящие к возникновению новых вредных веществ – оксидантов, свободных радикалов и других. В настоящее время такие вещества почти не контролируются экологическими службами, поскольку они не являются прямыми выбросами, а возникают на последующих стадиях эволюции вредных веществ. В большинстве случаев для них даже не утверждены нормы, то есть максимально допустимые концентрации.

В то же время, как показала практика, в больших городах именно фотохимические смоги различного типа составляют самую большую опасность для здоровья населения.

Для инициирования фотохимических реакций в воздушную среду должно поступать значительное количество энергии. Источником такой энергии является солнечная радиация. Наибольшее количество энергии поступает в атмосферу в ультрафиолетовом диапазоне, когда энергия фотонов составляет 290÷580 кДж/моль. Первым шагом в этом процессе есть фотохимическая диссоциация (распад молекул на составляющие элементы), а потом возникает целая цепочка последовательных реакций. При этом, прежде всего возникает озон O_3, который является мощным оксидантом и относится к категории отравляющих веществ. Озон взаимодействует с

углеводородами C_nH_m и при этом возникают, так называемые, свободные радикалы *R*; *RO*; *HCO*; *ROO*, а также альдегиды и некоторые другие вещества, такие как пероаксиацилнитрат (ПАН), пероксибензоилнитрат (ПБН). Два последних вещества вредно воздействуют на слизистую оболочку, вызывают ее раздражение. Считается, что они являются активными канцерогенами, вызывают нарушения зрения и другие патологические явления. Известно, что во время фотохимического смога в Лос-Анджелесе наблюдалось увеличение количества различных заболеваний и смертельных случаев.

Можно предположить, что опасная экологическая ситуация, которая сложилась летом 2004 года в г. Запорожье, могла быть вызвана частично в результате возникновения фотохимического смога на фоне увеличения концентрации растительных аллергенов и других причин.

Известно, что в Лос-Анджелесе основными источниками загрязнений являются автомобильные выбросы. Увеличение интенсивности движения в наших городах (и в Днепропетровске в том числе) является преддверием возникновения фотохимических смогов и критического ухудшения экологического состояния.

4.7 Пылевые выбросы

Известно, что пылевые выбросы, т.е. выбросы твердых частиц, поступают в атмосферу от различных источников, которые можно подразделить на две группы: антропогенные и природные. Общая масса антропогенных выбросов в настоящее время составляет более 30 млн.т в год [129], из которых 53% обусловлено промышленными технологическими процессами, 21,5% – промышленными и бытовыми котельными, около 13% – тепловыми электростанциями, 9,5% – уничтожением мусора, 3% – работой автотранспорта. Природные выбросы включают в себя вулканический пепел, морскую соль, продукты лесных пожаров и ветровой эрозии, пыльцу и семена растений и др. В целом доля частиц, поступающих в атмосферу, в среднем составляет около 10% от общей массы выбросов антропогенного характера. В индустриализованных странах, а тем более на территории больших городов, доля подобных выбросов существенно выше. Так, к примеру, в Украине она составляет около 15% [212], а в Днепропетровске – 24% [166]. Хотя этот показатель, как

видно, в целом не превышает 25% от общего объема выбросов, тем не менее потенциальный ущерб от данного вида загрязнений весьма значителен.

Прежде всего, запыленность атмосферы влияет на трудоспособность и состояние здоровья человека. Наиболее опасными считаются частицы малого размера (до 1мкм), которые не отделяются в носоглотке и верхних дыхательных путях, а поступают внутрь дыхательного тракта. Если они нерастворимы, то происходит их накопление в легких и в лимфатических узлах. Растворимые частицы также опасны, поскольку в жидком состоянии вредные вещества разносятся по всему организму. Большую опасность для здоровья приносят частицы, содержащие тяжелые металлы или токсические соединения. Естественно, что наиболее чувствительны к этому виду загрязнений люди с бронхо-легочной и сердечно-сосудистой патологией. Как показывает медицинская статистика, именно в больших городах с запыленной атмосферой такие виды заболеваний значительно превышают показатели, характерные для сельской местности. Это легко объяснимо, поскольку наиболее значительная часть источников пылевых выбросов расположена на территории больших городов и индустриальных центров. Среднегодовая концентрация твердых частиц в атмосфере таких городов США как Нью-Йорк, Чикаго, Детройт, Лос-Анджелес и других крупных центрах превышает 100мкг/м^3 . При этом здесь наблюдается прямая корреляция между численностью населения и концентрацией частиц [129]. В Украине наиболее крупные выбросы вредных веществ в атмосферу (включая и выбросы пыли) наблюдаются в таких городах как Донецк, Днепропетровск, Луганск, Запорожье, Харьков, Кривой Рог, Днепродзержинск, Мариуполь и других. Уровень пылевого загрязнения существенно влияет практически на все метеопараметры городской атмосферы (температуру, влажность, уровень солнечной радиации, устойчивость атмосферы, химический состав воздушной среды, плотность облачного покрова, частоту образования туманов и выпадения осадков и т.п.) [23]. Исследованиями установлено, что над промышленными центрами обычно формируется несколько пылевых слоев: нижний, который залегает между домами и открытыми площадями (связан с выделениями транспорта, работой приземного ветра и локальных вихрей); промежуточный слой, питаемый дымом отопительных систем (на высоте $20 \div 30$ м) и верхний слой, питаемый дымом высоких промышленных труб (на

высоте $50 \div 100$ м). Такое явление наблюдается при слабых ветрах. Увеличение скорости ветра способствует более активному перемешиванию названных слоев и это необходимо учитывать в расчетах. Отдельные частицы пыли, являясь ядрами конденсации, способствуют образованию более частых туманов. Другие, так называемые «витающие частицы», участвуют в образовании дымки, мглы и городского смога. Запыленность атмосферы заметно понижает уровень солнечной радиации и влияет на характер «температурной инверсии» в атмосфере.

Размеры частиц пыли изменяются от 0,0002 мкм (чуть больше молекулы) и до 500 мкм. Частицы размером менее 0,1 мкм (тонкодисперсная пыль) проявляют свойства молекул, их движение хаотично и определяется столкновениями между молекулами. Частицы более 20 мкм достаточно быстро удаляются из атмосферы вследствие гравитационного оседания. Частицы в диапазоне от 0,1 до 20 мкм имеют тенденцию следовать потоку газа-носителя и могут оказывать существенное влияние на жизнедеятельность человека.

Столь широкий диапазон размеров аэрозольных частиц приводит к еще более существенным отличиям для значения скоростей оседания и соответственно времени их пребывания в воздухе. Этот же фактор усложняет задачу очистки отходящих газов, поскольку один какой-либо вид пылеулавливающего оборудования не может быть эффективным во всем указанном интервале. Данные об эффективности улавливания твёрдых частиц в зависимости от их размера, приведены в таблице 4.2.

Необходимо, однако, заметить, что пыль, поднимаемая с земли при движении транспорта и приземным ветром, имеет другой состав. Интенсивность поступления такой пыли в атмосферу и её гранулометрический состав менее изучены, хотя именно для городских территорий это было бы важно.

Таблица 4.2 Распределение техногенных частиц по размерам и эффективности их улавливания [129]

Область размеров dp, мкм	Средний размер, мкм	Весовой процент	Кумулятивный весовой процент	Эффективность улавливания, %
<0,5	0,25	0,1	0,1	8
0,5 – 1,5	1	0,4	0,5	30
1,5 – 2,5	2	9,5	10	47,5
2,5 – 3,5	3	20	30	60
3,5 – 4,5	4	20	50	68,5
4,5 – 5,5	5	15	65	75
5,5 – 6,5	6	11	76	81
6,5 – 7,5	7	8	84	86
7,5 – 8,5	8	5,5	89,5	89,5
8,5 – 11,5	10	5,5	95	95
11,5 – 16,5	14	4	99	98
16,5 – 23,5	20	0,8	99,8	99
>23,5		0,2	100	99+

4.8 Диоксины

Диоксины – это группа химических соединений, токсические свойства которых начали активно изучать только в последние годы. В эту группу включают полихлорированные соединения ароматического ряда, а также полихлорированные бифенилы (ПХБ), которые являются их близкими родственниками. Сюда же примыкают полиароматические углеводороды (ПАУ) – сильнейшие токсиканты и канцерогены. Основу молекулярной структуры диоксинов составляют два шестичленных углеродных кольца (бензольные кольца), которые связаны между собой одним или двумя атомами кислорода и, в принципе, являются мало токсичными соединениями. При замещении же атомов водорода хлором, токсичность вещества существенно повышается. В зависимости от размещения атомов хлора (при одинаковом их количестве) получаются так называемые изомеры с одинаковой суммарной формулой, но с разными свойствами. Так при введении в состав бензольных колец четырех атомов хлора получается 22 диоксиновых изомера, из которых токсичным (причем наиболее опасным среди этих веществ) является изомер 2,3,7,8 –тетрахлордибензо-пара-диоксин, чемпион среди ядов. Его название часто сокращают до аббревиатуры ТХДД, или 2378-

ТХДД. В целом, в настоящее время различают 75 диоксинов. К ним примыкают 135 фуранов и 209 полихлорированных бифенилов (ПХБ) – всего 419 соединений. Из них токсичны 7 диоксинов, 10 фуранов и 11 ПХБ. Уровень токсичности диоксинов и примыкающих к ним веществ выражается в соответствии с интернациональной шкалой факторов эквивалентной токсичности (1-TEF). Этот фактор равен числу, которое показывает уровень токсичности вещества по сравнению с ТХДД (для него 1-TEF равен единице).

Поскольку диоксины, как правило, образуются в виде смесей разного типа, то общий уровень токсичности определяется в зависимости от концентрации каждого из них. Учитывая высокую токсичность отдельных диоксинов, соответствующие государственные органы разных государств установили гранично допустимые нормы их поступления в организм человека. Эти нормы зависят от физических свойств диоксинов и характера их попадания в организм. Основная часть диоксинов поступает в организм вместе с пищей и частично через органы дыхания. Диоксины хорошо растворяются в жирах и накапливаются в жировых тканях живых существ, в молоке животных и в молоке кормящей матери. Накопление диоксинов происходит в течение всего жизненного цикла, что может привести к серьёзным патологическим изменениям в организме, включая и онкозаболевания. В качестве примера, можно привести суточные допустимые нормы, принятые в США и Европейском союзе. Эта норма равна 6,4 фг (фемтограмм) на 1кг массы тела человека (1фг=10^{-15} г). В России допустимая норма почти в тысячу раз больше. Для того, чтобы оценить эту норму можно показать, что в течение жизни человек не должен потребить более чем 0,00002 г диоксина! Это говорит о высоком уровне его токсичности. Например, по нормам США диоксин ТХДД примерно в миллион раз токсичнее мышьяка.

Диоксины попадают в окружающую среду в основном при сгорании пластиковых предметов на мусоросжигательных заводах, бытовых свалках (особенная опасность возникает при неконтролируемом их сжигании в жилой зоне городов). Впервые в мировом масштабе о токсичности диоксинов заговорили после применения дефолиантов во время войны во Вьетнаме. Диоксины содержатся также в составе отдельных пестицидов и других ядов. В отчете Управления по охране окружающей среды в США, в частности, говорится, что патологические изменения в функционировании кле-

ток наблюдаются уже при очень низких концентрациях этих веществ – в сотни и тысячи раз более низких, чем любого из до сих пор изученных экологических токсикантов. Мировые средства массовой информации оказались правы по отношению к диоксинам, когда ввели в обращение термин «химический СПИД». Понятно, что изучение характера распространения этих токсикантов в атмосфере является серьёзной современной проблемой, требующей своего разрешения.

4.9 Радионуклиды. Ионизирующее излучение.

Под радионуклидами или радиоактивными изотопами понимают вещества, способные на самопроизвольную трансформацию, сопровождающуюся ионизирующим излучением. Радионуклиды подразделяют на естественные и искусственные. Естественные радиоактивные вещества образуются в земной коре, водной среде и в атмосфере в процессе эволюции нашей планеты, а также при воздействии солнечной радиации или при попадании на Землю космического вещества. Искусственные вещества, среди которыз есть такие, которые в природной среде на встречаются, образуются при атомных и термоядерных взрывах, а также в реакторах атомных станций и в атомных двигателях кораблей и подводных лодок. В процессе ионизирующего излучения происходит распад исходного вещества и образование нового.

Радиоактивные лучи или частицы подразделяют на три категории.

α-лучи – это частицы, состоящие из двух нейтронов и двух протонов (протоны заряжены положительно). При взаимодействии с внешним веществом α-лучи, обладающие большой энергией, возбуждают целый каскад молекул – вплоть до 100 тысяч пар ионов от одной частицы. Такое возбуждение в живом организме считается «повреждением молекулы». После присоединения двух электронов α-частицы теряют скорость и превращаются в нейтральные молекулы гелия.

β-лучи – это поток выброшенных радионуклидами электронов. При столкновении с молекулами внешней среды β-лучи также возбуждают молекулы и ионизируют их. Скорость их движения – почти 300 тыс. км/с. (Заметим, что α-частицы движутся медлен-

нее.) При торможении они присоединяются к какой-либо молекуле и нейтрализуются.

γ-лучи (γ-кванты, γ-фотоны) – особый характер излучения. Физически они представляют собой электромагнитные волны высокой частоты и малой длины. Этим они отличаются от видимого света. γ-лучи обладают большой кинетической энергией и не имеют электрического заряда. Они зарождаются в процессе взаимной перестройки заряженных частиц в ядрах атомов. В отличие от световых лучей, они не отражаются от поверхности тел, а проникают внутрь, поскольку, большая часть веществ и предметов для этих веществ являются проницаемыми. При движении внутри вещества γ-кванты выбивают электроны из орбит и превращают молекулы и атомы в заряженные ионы. Оторванные электроны забирают у γ-квантов часть энергии и сами становятся ионизирующими частицами. Ионизация молекул в телах людей и живых существ как раз и является радиационным поражением, причём γ-кванты существуют только в движении и нейтрализуются при полной потере энергии.

Как было отмечено, радионуклиды характеризуются различными типами и энергией излучения. Кроме того, отличающими их признаками являются: число протонов в ядре Z (заряд ядра); число нейтронов в ядре N и атомное число A (общее число частиц в ядре). Ядра с одинаковым Z и разными числами N называются изотопами. Наконец, характерным признаком радионуклида является также период его полураспада $T_{1/2}$. Экологически опасными считается около 25 радионуклидов с разными атомными числами, начиная от легких (тритий-3, углерод-14, натрий-24, фосфор-32) и заканчивая тяжелыми (радон-222, радий-226, уран-238, плутоний-239, торий-232). Сильным α-излучением обладают только последние пять элементов. Остальные испускают β-кванты или γ-лучи. Период полураспада радионуклидов колеблется от нескольких секунд или часов, например $T_{1/2}$=2часа (аргон-41), до миллиардов лет, например $T_{1/2}$=13,9 млрд. лет (торий-232). Радиоактивный распад в отдельных случаях характеризуется наличием так называемой «радиоактивной цепочки» или же ветвлением. В конечном счете этот процесс заканчивается образованием стабильного, т. е. неделящегося вещества.

Активность излучения радионуклидов A определяется количеством распавшихся частиц N в единицу времени, то есть

$$\overline{A} = d\overline{N} / dt.$$

Единицей активности в системе СИ является Беккерель Бк (один распад в секунду). Ранее для обозначения активности использовалось Кюри (Ki) 1Ki=37млрд Бк .

При атомных взрывах образуется значительное количество радионуклидов, среди которых наиболее опасными являются стронций-90 с периодом полураспада $T_{1/2}$=27,7 лет и цезий-137 для которого $T_{1/2}$=32 года. Кроме того, в окружающую среду попадает часть непрореагировавших веществ, в частности плутоний-239, для которого $T_{1/2} = 24{,}4 \cdot 10^3$ лет. Кстати, это вещество опасно не только своей радиоактивностью, но и химической токсичностью. Стонций-90 и цезий-137 образуются также в атомных реакторах. Поэтому их выбросы в случае аварии являются очень опасными. Благодаря химическому сходству с кальцием, стронций-90 проникает в костную ткань позвоночных, а цезий-137 накапливается в мышечных тканях. Значительную роль в формировании обстановки в зоне, близкой к АЭС, играют инертные радиоактивные газы (ИРГ): криптон (18 изотопов), ксенон (20 изотопов), йод (20 изотопов). Большая часть из них имеют малый период полураспада (менее 1 минуты), однако другие накапливаются в серийных реакторах. Это отдельные изотопы криптона, ксенона и йода. В системе теплоносителя кроме продуктов деления накапливаются радионуклиды другого происхождения. Они образуются при активации теплоносителя и межреакторного воздушного пространства. В целом спектр радионуклидов, выбрасываемых в атмосферу реакторами и другими предприятиями ядерно-топливного цикла (добыча, обогащение, транспортировка, складирование отработанного материала) очень широк и разнообразен. Радионуклиды могут воздействовать на живые существа путем внешнего облучения, т. е. через одежду, обувь и кожу, и внутреннего облучения, т. е. при попадании в организм с пищей и в процессе дыхания. Естественно, что внутреннее облучение более опасно, поскольку нуклиды находятся внутри организма и находятся там в течение длительного времени. Уровень облучения, или так называемая доза, *Д*, определяется как отношение поглощенной лучевой энергии *E* к массе m вещества, которое ее поглотило

$$Д = E / m \text{ (Дж/кг=Гр).}$$

Здесь Гр. – сокращение от слова Грей. В зависимости от полученной дозы у человека и других существ происходят нарушения основ жизнедеятельности. Малые дозы снижают иммунитет, замедляют рост. По мере увеличения дозы уменьшается продолжительность жизни, наступает стерилизация. При больших дозах происходят изменения на генном уровне, и это проявляется во втором и последующих поколениях. Дальнейшее увеличение дозы приводит к возникновению лучевой болезни или к смертельному исходу.

К сожалению, человечество не выработало химических или физических способов нейтрализации радионуклидов. Единственные рекомендуемые варианты состоят в том, чтобы укрыться от облучения за определенным заслоном, удалится от источника радиоактивности и не употреблять в пищу пораженные радионуклидами продукты.

4.10 Биополютанты

Воздушная среда крупных городов содержит целый комплекс веществ, оказывающий вредное воздействие на здоровье человека. Данные о возможном воздействии типовых техногенных загрязнений, таких как окись углерода, окислы серы и азота, углеводороды, аммиак и других, широко известны и описаны в соответствующей литературе. В то же время, сведения о воздействии на здоровье витающих в воздухе частиц растительного происхождения (так называемых биополютантов) и, в частности, о характере их распространения в атмосфере, довольно ограничены. Наиболее распространенными биополютантами являются пыльца цветущих растений и споры плесневых грибов. В первую очередь следует назвать такие растения как амброзия, полынь, береза, сосна. К этой же категории относят некоторые злаковые, а также ольху, орешник, тополь, вяз, клен, дуб и другие растения. Обычное время пыления деревьев – март, апрель, май; злаков и луговых трав – июнь, июль; амброзии и полыни – август, сентябрь.

Опыт свидетельствует, что вдыхание загрязненного биополютантами воздуха, может оказаться еще более опасным, чем вдыхание промышленных выбросов. Дело в том, что воздействие техногенных выбросов может ограничиться болезненной реакцией сли-

зистой оболочки и бронхов. В то время, как большинство биополютантов могут привести к поражению иммунной системы на довольно длительный период и даже перейти в хроническое течение. Естественно, что городские жители подвергаются комплексному воздействию техногенных и биологических полютантов, что существенно усложняет приобретенную патологию. По данным всемирной организации здравоохранения не менее 30% населения Земли подвержены тем или иным видам аллергических реакций. При этом процент городских жителей в 5÷6 раз больше, чем доля жителей сельской местности. Установлено, что воздействие биополютантов может вызвать массовые заболевания, эпизоотии и другие фитопатогенные процессы. Основными симптомами заболевания являются: жидкий насморк, чихание, резь в глазах и слезотечение. Развитие болезни может привести к более серьёзным последствиям, а именно: возникновение бронхиальной астмы, появление серьезных отеков, включая опасные отеки языка и глотки, а также кожные заболевания в виде красных зудящих волдырей и т.п. Кроме аллергических реакций возникают и опасности другого рода. Отдельные виды пыльцы могут быть носителями радионуклидов (например, пыльца сосны, растущей в зоне отчуждения чернобыльской АЭС). Продуктивность сосны очень высока и составляет примерно 500 кг/час. Ветер может переносить такую пыльцу на расстояния в несколько сот километров. При этом возникает дополнительная экологическая нагрузка на территорию.

Изучением данной проблемы активно занимаются медики-аллергологи и в какой-то мере биологи, например, специалисты из Института ботаники НАН Украины. Гораздо в меньшей степени в её изучение вовлечены специалисты, занимающиеся гидроаеродинамикой процессов переноса биочастиц в воздушной среде. Слабо разработан математический аппарат, моделирующий данный процесс.

В отдельных странах накоплен довольно большой экспериментальный материал, полученный на основе природных замеров концентрации биополютантов в атмосфере. С этой целью создаются специальные биостанции. К примеру, в США функционирует 90 таких станций, в Италии – 91, в Германии – 80, в Испании – 50. К сожалению, в Украине имеется только одна такая станция. Пока что нет еще общепризнанных показателей уровня вредности биополютантов в зависимости от их концентрации. Осредненные данные по

принятым в разных странах уровнях вредности выглядят так, как показано в таблице 4.3 (в дальнейшем биочастица будет обозначена индексом ВР – от английского термина «bioparticle»). Концентрация задается количеством биочастиц в 1м^3, т. е. [ВР/м^3]

Таблица 4.3 Уровни вредности концентрации биочастиц [ВР/м^3]

Уровень вредности	Низкий	Средний	Высокий	Очень высокий
Число частиц	< 30	30 – 49	50 – 149	> 150

Патологические реакции у людей начинаются при уровне загрязнения 10÷30 ВР/м^3, затем усложняются по мере роста концентрации и становятся очень опасными при уровне 150÷200 ВР/м^3 и более.

В данной работе (см. раздел 7) приведены примеры математического моделирования распространения ВР в атмосфере при наличии разных очагов их образования.

4.11 Комбинированные загрязнения

Под комбинированным загрязнением будем понимать наличие в воздушной среде нескольких вредных веществ, которые отличаются один от другого, химическим составом, физическими свойствами, или своим происхождением.

Химический состав вещества, как известно, обозначается, соответственными формулами, например CO, H_2S, N_2O_4,NH_3OH, H_2SO_4 и т.п. Иногда по этому признаку рассматривают отдельные совокупности (группы) веществ, которые отмечаются подобной структурой или свойствами, например: диоксины, кислоты, альдегиды, полихлорированые бифенолы, углеводороды и т.п. Химический состав отдельных ингредиентов, которые определяются единым термином, может быть достаточно сложный. Например, такое вещество, как бензин, имеет в своем составе несколько компонент: парафины (до 58%), олефины (до 22%) и ароматические соединения (до 25%). В тоже время, условная формула бензина может быть записана достаточно просто – C_7H_3. Как пример, можно также отметить, что достаточно сложный химический состав имеют вредные соединения, объединенные единым названием, а именно - воздушные смоги.

Химический состав веществ определяет их способность вступать при определенных условиях в реакцию с другими веществами. В процессе таких реакций могут образовываться новые вредные ингредиенты, которые входят, например, в состав названого выше воздушного смога, и других сложных соединений.

В некоторых случаях в процессе реакции происходит нейтрализация вредных веществ. Во время осадков отдельные вещества растворяются в воде, что приводит к возникновению кислотных дождей и других негативных явлений.

Физические свойства вредных веществ определяются, прежде всего, их агрегатным состоянием, – то-есть они могут находится в атмосфере в твердом состоянии (пыль, сажа, растительная пыльца), жидком состоянии (капли, туманы) и газоподобном состоянии (включая пар отдельных жидкостей). Достаточно часто для, первых двух категорий употребляют общий термин – аэрозоли.

Другим физическим свойством является способность веществ к самопроизвольной трансформации, которая сопровождается ионизирующим излучением. Такие вредные вещества называются радионуклидами. В процессе подобной трансформации могут возникать α-лучи, β-лучи и γ-лучи, которые отличаются своей структурой, уровнем энергии и соответственным влиянием на людей и живые организмы.

Важной физической характеристикой является удельный вес твердых частиц (точнее говоря, уровень их плавучести в атмосфере). Такое свойство существенно влияет на характер их миграций в воздушной среде. Можно, для примера, назвать пыльцу отдельных растений, которой свойственна высокая плавучесть. Известно, что радиоактивная пыльца сосен, которые находятся в Чернобыльской зоне отчуждения может распространятся под действием ветра на расстояние в несколько сотен километров. С другой стороны, высокий удельный вес отдельных частиц содействует тому, что они достаточно быстро оседают на поверхности земли и не распространяются на большие расстояния.

По признаку происхождения вредных веществ источник их выбросов можно разделить на природные и антропогенные. Значительная часть соединений природного происхождения попадает в атмосферу при извержении вулканов. Объем выбросов в таких случаях могут быть достаточно значительными, а продукты выбросов распространяются иногда на тысячи километров. Другими причи-

нами природных выбросов могут быль лесные или степные пожары. Пылевые бури могут поднимать в атмосферу тысячи тонн пыли, переносить их на значительные расстояния. Наконец, природное происхождение имеют так называемые биополютанты и растительная пыльца, растительные фрагменты (например, тополиный пух), споры отдельных видов грибов, вредные бактерии и т.п.

Вредные вещества антропогенного происхождения составляют основную часть загрязнений, особенно на городской территории. Прежде всего, это выбросы промышленных предприятий – химических, металлургических, строительных, машиностроительных и других. Далее идут движущиеся источники – автомобильные, авиационные и другие виды транспорта.

Значительный вклад в загрязнения воздуха вносят коммунальные предприятия, которые исполняют функции теплодоставки, ликвидации (сжигания, или переработки) мусора и т.п., некоторая часть вредных выбросов поступает от домовладений, городских жилищ при отоплении, приготовление пищи.

Когда речь идет о комбинированное загрязнение среды, необходимо иметь ввиду не только вредные выбросы, но и некоторые физические явления.

В первую очередь, это электромагнитное излучение (ЭМИ), которое поступает в пространство от станций сотовой связи (в каждом большом городе их десятки тысяч) телевизионных и радиотрансляционных башен, а также линии электропередач высокого напряжения. Уже сейчас интенсивность ЭМИ во многих городах превышает допустимые нормы в несколько раз.

Сюда следует добавить ионизирующее, рентгеновское и лазерное излучения, шумовое и вибрационное загрязнение, ультразвуковые и инфракрасные волны, раздражающие запахи и другие явления.

Хотя названые физические факторы нельзя непосредственно считать вредными выбросами в атмосферу, но они, несомненно, усиливают негативное влияние среды на работоспособность и здоровье людей. В этом случае, следует говорить о более опасном варианте комбинированного загрязнения, когда обединяется действие атмосферных токсинов с оной стороны и вредных физических явлений - с другой.

Важно отметить суть комбинированного действия полютантов на человеческий организм. Известно, что в каждой стране (в том

числе и в Украине) существует созданная на государственном уровне система нормирования вредных выбросов. Эта система, как правило, разработана и используется для каждого ингредиента отдельно. Вместе с тем, вредное влияние комбинированного загрязнения среды на людей и живые существа с медицинской и биологической точки зрения на данное время еще не достаточно исследовано. Дело в том, что человек поддается вредному влиянию комбинированных загрязнений на протяжении всей своей жизни. В этом случае очень сложно создавать соответственную медицинскую статистику.

Новые статистические данные о состоянии здоровья людей, которые были подвержены комбинированному вредному влиянию загрязненной среды, показывают, что при этом возникает широкий список различных патологий:

- заболевание органов дыхания разного характера (раздражение и воспаление слизистой оболочки, временная и устойчива патология бронхо-легочной системы, отек легких);
- тяжелое отравление или летальная угроза;
- аллергия, астматические синдромы, поллиноз;
- онкологические заболевания;
- патология иммунной и эндокринной систем, ослабление иммунитета;
- нарушение репродуктивных функций;
- патология сердечнососудистой системы;
- накопление токсинов в организме и передача их будущим поколениям;
- головные боли, психические расстройства и другие типы патологий центральной нервной системы;
- повреждение ДНК клеток и возникновение локализированных мутаций;
- заболевания глаз и кожи;
- вредное влияния на плод у беременных женщин;
- патологии желудочного- кишечной системы и системы пищеварения

На начальных стадиях пребывания в загрязненной среде человек еще не теряет здоровье, но ощущает негативное влияние полютантов. При этом могут возникнуть общая слабость, утомление, насморк, кашель, головная боль, обморочность, бессонница или сонливость, ощущение страха, потеря аппетита и другие признаки.

Детальный анализ комбинированного влияния загрязненной среды на работоспособность и здоровье людей – дело медицинской науки и практики. В данной работе рассматриваются специфические проблемы компьютерного мониторинга состояния воздушной среды при его комбинированном загрязнении. Приведенные выше данные о влиянии загрязнений на организм человека иллюстрируют только актуальность и важность проблемы, которая рассматривается. С целью более детального ознакомления с действием различных полютатов на здоровье людей можно воспользоваться обобщающей таблицей 4.4. Как уже было отмечено, при нормировании вредных выбросов в окружающую среду вводится понятие гранично-допустимой концентрации (ГДК) для каждого вещества.

Таблица 4.4. Влияние полютантов на здоровье людей.

№ п/п	Характер влияния	Полютанты
1	Заболевание органов дыхания	Окись углерода, окись серы, двуокись и четыреокись азота, смоги, пыль, аммиак, бензопирен, биополютанты, сероводород, ЭМИ
2	Сердечнососудистые патологии	Окись углерода, аммиак, фтороводород, сероводород, ЭМИ
3	Заболевания центральной нервной системы	Окись углерода, тяжелые металлы, сероводород, формальдегид, формальдегид, фенол, ЭМИ
4	Патологии иммунной и эндокринной системы	Диоксин, тяжелые металлы, фенол, ЭМИ, радионуклиды
5	Онкологические заболевания	Смоги, бензопирен, диоксин, формальдегид, радионуклиды
6	Аллергия, астматический синдром	Биополютанты, фенол, пыль, смоги
7	Нарушение репродуктивных функций	Диоксин
8	Заболевания глаз и кожи	Окись серы, четыреокись азота, смоги, аммиак, бензопирен, диоксин, сероводород, формальдегид
9	Патологии желудочно-кишечной системы	Фтороводород, тяжелые металлы, радионуклиды
10	Накопление токсинов в организме и передача следующим поколениям	Диоксин, радионуклиды
11	Патологии беременности	Диоксин, формальдегид
12	Нарушение ДНК клеток и мутации	Радионуклиды, бензопирен, формальдегид, ЭМИ
13	Тяжелые отравления или летальная угроза	Окись углерода, окись серы, смоги, фтороводород, диоксин, радионуклиды

5 ИСТОЧНИКИ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ

Мы были достаточно цивилизованными, чтобы построить машину, но слишком примитивны, чтобы ею как следует воспользоваться.
Карл Краус

«Зачем, - говорит эгоист, - стану я работать для потомства, когда оно для меня ничего не сделало?» Несправедлив ты, безумец!
Козьма Прутков

Да, воздуха такого не испортишь.
Владимир Вишневский

5.1 Классификация источников.

Источники вредных техногенных выбросов можно классифицировать по нескольким признакам. Преобладающее количество источников стационарно расположены в каком-либо географическом пункте. Этот класс источников можно определить как стационарные. Другой класс – это перемещающиеся в пространстве источники, которые будем определять как подвижные.

В свою очередь стационарные источники делятся на несколько основных групп:

1. Предприятия по производству электрической, тепловой энергии и пара за счет сжигания органического топлива.
2. Атомные электростанции.
3. Черная и цветная металлургия.
4. Химическая промышленность.
5. Производство строительных материалов.
6. Горнодобывающая промышленность.
7. Машиностроение.
8. Коммунальная сфера.
9. Другие предприятия и источники

К подвижным источникам относят автомобильный и железнодорожный транспорт, а также авиацию. Надводный транспорт загрязняет атмосферу городов при активном движении на реках и в приморских городах с крупными портами.

Существуют и другие признаки классификации. В зависимости от геометрической формы самого источника они делятся на точечные, линейные, площадные и объёмные. Кроме того, источники

могут иметь постоянный или переменный массовый расход выбросов. Рассматривают также такие варианты как: источники непрерывных выбросов (к примеру, теплоэлектростанции), источники периодических выбросов (которые обусловлены технологическими циклами) и мгновенные выбросы (при авариях, взрывах и т.п.).

Наконец, одним из признаков классификации может быть химический состав или физическое состояние выбрасываемой примеси, т.е. различные газы, твердые и капельно-жидкие частицы.

Доля каждого из названных типов источников в каждом из крупных городов будет, естественно, разной.

5.2 Основные показатели по объёмам выбросов

По данным Госкомстата Украины в 2005 г. наиболее крупные (по массе) годовые выбросы были на предприятиях первой и третьей групп, а именно: 1,44 млн. т. и 1,289 млн. т. соответственно. В целом, по всем видам экономической деятельности в Украине в этом же году в атмосферу выброшено 4.44 млн. т. Объёмы выбросов неравномерно распределены по регионам страны. Минимальные показатели отмечены в таких областях, как Черновицкая (5,2 тыс. т.), Херсонская (11 тыс. т.), Закарпатская (11,4 тыс. т.), Волынская (11,8 тыс. т.). В то же время, в других областях выбросы намного превышают средние показатели: в Донецкой (1,6377 млн. т.), Днепропетровской (0,9935 млн. т.), Луганской (0,4476 млн. т.), Запорожской (0,262 млн. т.).

Если рассмотреть плотность выбросов на 1кв.км., то получаются такие данные: Донецкая обл. - 61759 кг, г. Киев – 40146 кг, Днепропетровская обл. – 31123 кг, Луганская обл. – 17786 кг. В других областях (В том числе и в АР Крым) эти показатели существенно меньше.

Для сравнения можно привести мировые выбросы с указанием их источников [49] – таблица 5.1.

Таблица 5.1 Вклад антропогенных источников в загрязнение атмосферы.

Источники выбросов	Массовая доля загрязняющих веществ в % (за год)
Все виды транспорта	$50 \div 60$
Производство электрической тепловой энергии и пара	$10 \div 15$
Промышленные технологии и процессы горения	$15 \div 20$
Местное отопление	10
Сжигание отходов	5

Таблица 5.2 Оценочные количества вредных ингредиентов, поступающих от различных источников

Тип источника	Объем загрязняющих веществ (млн т/год)					
	Твердые	SO_x	N_xO_y	CO	C_xH_y	Сумма
Транспорт	1,2	0,4	8,0	71,2	13,8	94,6
Источники ,сжигающие органическое топливо (электростанции промышленные предприятия, отопление городов и др.)	6,0	22,0	7,5	1,9	0,7	38,1
Производство товаров, переработка сырья	5,9	7,2	0,2	7,8	3,5	24,6
Складирование, локализация и переработка отходов	1,2	0,1	0,7	4,5	1,4	7,0
Прочие	0,4	0,6	0,2	1,2	4,2	6,6
Сумма	14,6	30,3	16,6	86,5	23,6	172,8

Из таблицы видно, что основным источником вредных выбросов является транспорт (более половины от общей массы). Если же говорить о городских территориях, то вполне понятно, что эта доля будет здесь еще более значительной из-за интенсивного автомобильного движения.

В литературе имеются данные и о физико-химическом составе вредных выбросов из различных источников [49]. Они приводятся в таблице 5.2.

Данные, приведенные в таблицах, несколько устарели, однако пропорции и соотношения близки к современным показателям.

5.3 Тепловые электростанции и теплоэлектроцентрали

Электрическая и тепловая энергия в этих комплексах производится за счет сжигания органического топлива: угля, мазута, и природного газа. Такие виды топлива, как торф, древесина, биогаз и т. п. используются для получения энергии в значительно меньших масштабах и, следовательно, образуют меньшую долю вредных выбросов. В процессе сжигания топлива образуются такие вещества как: диоксид углерода, диоксид и триоксид серы, оксид и диоксид азота (при высокотемпературном горении). Органические топлива (в особенности уголь и нефть) могут содержать следовые количества многих элементов, часть из которых в виде оксидов или других соединений также поступает в атмосферу. Это такие элементы, как хром, ванадий, свинец, германий, бериллий, мышьяк, фтор и другие. Большинство из них оказывают вредное воздействие на среду. При неполном сгорании топлива образуются такие вещества, как оксид углерода, углеводороды, альдегиды, кетоны, органические кислоты и другие вещества.

Рассмотрим сначала проблему выбросов оксидов серы, как одного из основных загрязнителей атмосферы. Известно, что содержание серы в угле и нефти колеблется в широких пределах в зависимости от их вида и генезиса. Так в каменном угле её содержание может быть около 1% (в антрацитах) и свыше 5% в отдельных сортах бурого угля. В отдельных сортах нефти доля серы может быть менее 1%, а в других сортах – до 5%. При сгорании угля и нефти преобладающая доля серы (95 – 98%) уходит в выхлопы и только небольшая часть выпадает в виде золы. Отходящие газы больших электростанций, работающих на буром угле, содержат обычно от 0,1 до 0,2% диоксида серы по объёму. Триоксид серы поступает в атмосферу в значительно меньших количествах. Считается, что он в основном образуется в результате каталитического окисления на оксидах металлов (марганца и железа). В качестве примера можно привести такие цифры [49]. Электростанция мощностью 100 МВт потребляет за год 6 млн. т. низкокалорийного бурого угля (с содержанием серы ~1,5%), выбрасывая в атмосферу за этот же период примерно 165 тыс. т. диоксида и 5 тыс. т. триоксида серы.

Теплоэлектростанции, работающие на нефти выбрасывают в атмосферу примерно вдвое меньше оксидов серы (при одной и той

же мощности). Это обусловлено более высокой теплотворной способностью нефти (которая равна примерно 42000 кДж/кг) по сравнению с углем. Для бурого угля этот показатель равен примерно 10500 кДж/кг.

Оксиды азота образуются как побочная реакция горения, поскольку оба вещества – азот и кислород – содержатся в воздухе, а не в самом топливе. Процесс окисления азота начинается при температурах около 1000°С и достигает максимума при температуре около 2700°С. При этой температуре объёмная концентрация оксидов азота достигает 5,2%. Непосредственно в печах (промышленных и бытовых) эта доля существенно меньше. Более того, при охлаждении после выхлопа объёмное содержание окислов уменьшается, поскольку они разлагаются на исходные компоненты. Тем не менее, опасность загрязнения воздушной среды оксидами азота, образующихся в так называемых «горячих» печах, довольно высока.

В отдельных сортах бурого угля, сжигаемого в печах теплоэлектростанций, содержится мышьяк и фтор. Хотя в выбросах содержится небольшое количество этих веществ, однако в силу своей токсичности, они могут причинить значительный вред людям, животным и растениям. При производстве электрической, тепловой энергии и пара образуются также твердые (пылевые) и жидкокапельные загрязнения, поступающие в атмосферу. При этом твердые частицы в основном образуются при сжигании угля, а жидкие загрязнения (туманы и капли) образуются при конденсации паров. Поскольку образование жидких частиц на теплоэлектростанциях менее характерно, следует упомянуть в основном о процессах образования пыли. В данном случае твердые частицы образуются как продукты сгорания (сажа и зола). В промышленных газах, которые поступают от каменноугольных печей, имеющих решетки с низким продувом, поступает до 10 г/м^3, а без поддува – до 30 г/м^3 пыли.

Крупная пыль образуется как раз в решеточных печах, а мелкодисперсная – в грануляционных печах, в которых уголь измельчается до поступления в зону горения. В последнем случае концентрация пыли достигает 25÷30 г/м^3.

В целом данные показатели являются довольно приближенными, поскольку они существенно зависят от многих факторов, а именно: типа сжигаемого угля, степени измельчения при грануляции, организации процесса горения и др.

Для удаления пыли в отходящих газах применяют механические и электрические сепараторы различного типа.

Следует иметь в виду, что кроме выбросов пыли в составе продуктов горения, необходимо учитывать и выбросы от вспомогательных операций, таких как: сушка, размол топлива, транспортировка угля и золы и т.п.

Для оценки уровня загрязнений атмосферы выбросами тепловых электростанций на территории Украины можно воспользоваться географией их размещения и их энергетическими параметрами. В настоящее время в нашей стране функционируют 12 крупных теплоэлектростанций (ТЭС), данные о которых размещены в таблице 5.3.

В целом мощность тепловых станций составляет 52,8 млн. кВт. В 2000г они выработали 82,6 млрд. кВтчасов электроэнергии. Учитывая, что 1кг условного топлива (УТ) при сгорании обеспечивает примерно 2кВтчаса электроэнергии, легко посчитать расход топлива и соответственно, объем выбросов. При этом нужно учесть, что 1т угля соответствует 0,65 тонн условного топлива (ТУТ), 1т нефти – 0,68 ТУТ, 1т газа – 1,5 ТУТ.

Таблица 5.3 Крупнейшие ТЭС Украины

Станции	Область размещения	Станции	Область размещения
Углегорская	Донецкая	Запорожская	Запорожская
Кураховская	«	Змиёвская	Харьковская
Славянская	«	Трипольская	Киевская
Старобешевская	«	Ладыженская	Винницкая
Криворожская	Днепропетровская	Бурштынская	Ивано-Франковская
Приднепровская	«	Луганская	Луганская

Практически все станции размещены на небольшом удалении от городов, и поэтому являются серьёзными загрязнителями городской среды. В оценках объёма выбросов следует учесть отклонения от норм и стандартов, обусловленные износом устаревшего очистного оборудования и другими технологическими факторами, характерными для большинства названных ТЭС.

5.4 Черная и цветная металлургия.

Известно, что черная металлургия является одной из базовых отраслей промышленности в нашей стране. Металлургические предприятия, как правило, расположены в крупных городах и индустриальных центрах и, поэтому, являются в большинстве случаев основными загрязнителями их воздушной среды. Металлургическая промышленность – это совокупность многих технологических процессов: производство сырого чугуна (доменные печи), производство стали (кислородные конверторы, мартеновские, электродуговые и двухподовые печи), литейное и вагранoчное производство, получение ферросплавов. Прокатное производство и некоторые другие технологические процессы также сопровождаются выбросами в атмосферу, но их объемы меньше, чем в упомянутых выше. Выбросами сопровождаются и некоторые вспомогательные процессы. К ним следует отнести, прежде всего, работу агломерационных и коксовых установок, а также добычу и обогащение руд.

Подробное описание технологических процессов в металлургии можно найти в специальных изданиях. Здесь же упор делается в основном на формирование веществ, выбрасываемых в атмосферу.

Основным агрегатом в производстве чугуна является доменная печь. В шахтную печь высотой 10÷30м и внутренним диаметром 4÷7 м в определенном порядке помещают сырьевые материалы (железную руду, металлолом, агломерат) а также кокс и шлакообразующие агенты. При горении кокса образуется колошниковый газ, в котором содержится оксид углерода. Восстановление железа из руды происходит за счет взаимодействия с раскаленным коксом и оксидом углерода (последний образуется при сжигании кокса). Основной продукт доменных печей – сырой чугун. Побочными продуктами являются доменный шлак и колошниковый газ. Колошниковый газ образуется в доменном процессе в соотношении 1000м^3 на 1т чугуна (отметим, что суточная производительность доменной печи может быть более 1000 т чугуна). Этот газ представляет собой смесь горючих (оксид углерода, водород, метан) и негорючих компонентов (углекислый газ и азот). Он частично используется для обогрева рабочих тел и получения дополнительного

тепла при сжигании. Оставшийся газ после дожигания должен проходить двойную очистку перед выбросом в атмосферу с целью доведения смеси до допустимой нормы (до 20 мг/м^3). Однако степень очистки во многих случаях не соответствует норме и значительная часть образовавшихся твердых частиц поступает в атмосферу. Кроме колошникового газа в атмосферу поступает много пыли. В самом процессе она образуется в соотношении от 20 до 300 кг на 1 т сырого чугуна или с концентрацией от 10 до 100 г/м^3.

В городах, где есть металлургические предприятия, заметно как в зимний период снег покрывается черной копотью. Это и есть наиболее видимые последствия, сопровождающие основные металлургические циклы.

Выплавка стали производится в конверторах и сталеплавильных печах. В конверторах с целью разуглероживания жидкого чугуна в расплав вдувается обогащенный кислородом воздух, чистый кислород или смесь кислорода с перегретым паром. Сам процесс проходит в течение короткого промежутка времени (до 20 мин), что обеспечивает его высокую производительность. Пламя, вылетающее из горловины конвертора, содержит высокотемпературный газ (от 1200 до 2400°С) и твердые излучающие частицы.

Газ состоит в основном из оксида углерода с добавкой диоксида. Излучающие частицы (т. н. «коричневый дым») состоит в основном из оксидов железа и марганца. При воздушном дутье они имеют размер около 0,05мкм, а при кислородном – 0,1мкм. Более крупные частицы (более 1мкм представляют собой частицы шлака и оксида кальция. Оксиды железа в выбросах составляют 80 – 85%, а их концентрация изменяется в широких пределах – от 15г/м^3 до 150г/м^3. Отделение газовых выбросов от пыли сильно затруднительно из-за их высокой температуры.

В сталеплавильных печах процесс выплавки стали более длителен – в тандем-печах – до 60 мин, а в мартеновских печах – до 8 часов.

В двухподовых печах также происходит образование «коричневого дыма» с высокой концентрацией твердых частиц в пределах от 5 до 50 г/м^3. Крупными источниками пыли, особенно при кислородной интенсификации плавки, являются электродуговые печи. В этом случае на 1т произведенной стали приходится 5÷9 кг пыли. В таблице 5.4 приведены данные о концентрации пыли в выбросах сталеплавильных агрегатов.

В вагранoчных печах сверху в шахту загружается шихта, т. е. перемежающиеся слои металлического сырья (сырой чугун, литой чугун, стальные отходы, лом, ферросплавы), а также слои кокса и шлакообразующих добавок. В нижнюю часть подается холодный или нагретый воздух. В процессе горячего окисления происходит образование железа, шлака и других побочных продуктов. Колошниковые отходящие газы содержат 2 – 18% диоксида углерода, 5 – 21% оксида углерода, до 16% кислорода, до 1% водорода до 0,1% диоксида серы, а также азот и пары воды. Отходящая пыль содержит диоксид кремния (30 – 60%), железо и его оксид (до 25%), оксид кальция (до 20%), марганца (до 9%), магния (до 5%), а также оксиды алюминия, цинка, олова и свинца. Концентрация пыли в колошниковых газах колеблется в диапазоне от 2 до 25 г/м^3.

Таблица 5.4 Концентрация пылевых выбросов при работе сталеплавильных агрегатов

Тип агрегата	Концентрация, г/м^3	Температура процесса сгорания, (°С)
Филипс-мартен	0,8 – 3	330 – 550
Марц-Бохен	3,5 – 5	300 – 600
Тандем	20	150 – 600
Электродуговая (+O_2)	1,5 – 3,5 Максимум – до 9	120 – 200
Кислородный конвертор	30 – 50 Максимум – до 150	150 – 300

При производстве ферросплавов также происходит выброс загрязненного примесями газа и пыли. Так при получении ферросилиция (*FeSi*) в открытых электродуговых печах, происходит выхлоп диоксида серы и оксида углерода. Концентрация пыли измеряется в диапазоне от 2 до 15 г/м^3, при 100 – 280 кг на 1т сплава.

В литейном производстве пыль образуется при формовке, производстве сердечников, разливке стали, выколотке, очистке, подготовке формовочного песка и других операциях. Выброс пыли происходит через вытяжку. Хотя концентрация пыли невысока, но в ней имеются частицы кварца, которые считаются довольно опасным ингредиентом.

Несколько слов следует сказать об агломерации, в процессе которой крупная пыль спекается в более крупные куски. Смесь пыли кокса и других добавок обжигается на движущихся лентах агломерационных установок при температурах не ниже 270°С. Количе-

ство отходящих газов в составе 5 – 10% диоксида углерода, 0,5% диоксида, серы , азота, кислорода изменяется от 1000 до 4000м^3 на 1т руды. Концентрация пыли в отходящих газах составляет от 2 до 20г/м^3. В составе пыли содержится примерно 50% железа, по 10% оксидов кремния, кальция и алюминия, а также и других веществ.

Получение кокса включает несколько операций, которые сопровождаются выделением газов и пыли. Эти операции включают заполнение коксовых батарей углем, выпресовку кокса из этих батарей и его гашение. Основное газовыделение происходит на первой операции, когда уголь соприкасается с горячими стенками камеры. При этом выделяется коксовый газ с парами смолы. Количество газовых выбросов составляет 3 – 5м^3 на 1 т сухого угля, а содержание смолистых веществ – от 0,2 до 0,5кг на 1т.

При выгрузке кокса из батарей выделяется пыль. Гашение кокса водой в бассейне-гасителе сопровождается выделением водяного пара, несущего с собой гидросульфат, аммиак, диоксид серы, гидроцианид и фенолы. При этом на 1 т сухого кокса выделяется 0,01 – 0,04 кг гидросульфида, 0,006 кг цианида, 0,08 – 0,1 кг фенола.

Производство цветных металлов характерно содержанием в выбросах чрезвычайно вредных и токсичных веществ. При производстве алюминия различают две разные технологии: производство оксида алюминия Al_2O_3 из бокситовой руды и электролитическое получение Al из его руды. При этом на первом этапе руду дробят, высушивают, обжигают в печах. При производстве анодных материалов концентрация пыли достигает 15г/м^3 (это преимущественно Al_2O_3 и криолет). При электролизе выделяются газы, среди которых наиболее опасным является фтор. Количество выбрасываемого фтора, включая твердые фториды, гидрофторид и другие соединения, зависит от электролизера и анодов, а также от организации мер по снижению выбросов. При высокой степени очистки можно получить примерно 1 – 2 кг на тонну продуктивного алюминия. При плохой очистке этот показатель может возрастать до 15 – 20 кг на 1 тонну.

Получение цинка, свинца, меди и никеля также связано с выбросами в атмосферу вредных и токсичных веществ.

При производстве свинца из сульфидных руд или рудных концентратов путем плавки в многоступенчатой печи выделяется

значительное количество диоксида серы (объемная концентрация достигает 4 – 8%), а также оксид мышьяка, и оксиды свинца.

Медь производят из сульфидных концентратов, получаемых, как правило, флотацией и плавкой в печи. Отходящие от плавильных печей газы содержат диоксид серы, свинец, олово, оксид мышьяка. Концентрат затем перерабатывается в конверторах с выделением летучих оксидов металлов.

На территории Украины размещено значительное число (около 2000) предприятий черной и цветной металлургии. Экологическая опасность от их деятельности состоит в том, что большая часть из них размещена в городах или на плотно заселенных территориях. Мы здесь назовем основные пункты размещения предприятия данной отрасли, с целью оценки их влияния на окружающую среду в том или ином регионе.

В Украине сформировались и функционируют несколько центров черной металлургии: Приднепровский, Донецкий и Приазовский. Первый из них включает пять крупных узлов: Днепропетровский, Криворожский, Запорожский, Николаевский и Кременчугский. Это наиболее мощный центр металлургического производства. В Донецком центре размещены такие узлы металлургии, как: Макеевский, и Енакиевский (Донецкая область) и Алчевско – Алмазненский (Луганская область). И, наконец, в Приазовском центре размещены металлургические заводы Мариуполя, а также железорудные добывающие и обогатительные предприятия.

В 2000 – 2001 гг в Украине производилось 20 млн. т чугуна, 25 млн. т стали, 2 млн. т стальных труб, 21 млн. т готового проката. Это примерно вдвое меньше по сравнению с 80-ми годами прошлого столетия.

Предприятия цветной металлургии размещены в основном поблизости мест добычи сырья. В Украине имеются месторождения алюминия, марганца, ртути, магния, циркония, золота и других металлических руд. Алюминиевая промышленность представлена Запорожским алюминиевым комбинатом, Николаевским глиноземным заводом, Свердловским (Луганской области) заводом алюминиевых сплавов. Месторождения никеля невелики – Житомирская область и Приднепровский регион. Марганец, уран, цирконий и титан добывают на Днепропетровщине, ртуть – в Донецкой области, золото – в Кировоградской, Донецкой и Закарпатской областях.

Основную долю меди, свинца, олова, цинка, сурьмы Украина импортирует из других стран.

5.5 Химическая промышленность.

Предприятия химической промышленности очень различаются по профилю своей деятельности, а следовательно, и по составу техногенных выбросов. Вещества поступают в атмосферу в виде газов, паров, тумана и пыли. Они могут классифицироваться как вредные, токсичные или вещества с неприятным запахом.

В атмосфере вокруг химических предприятий идентифицируют около 100 соединений. В эту категорию входят как органические так и неорганические вещества. Наиболее важными газообразными загрязнениями с точки зрения их токсичности и поступающих в атмосферу объемов являются: хлор, диоксид и триоксид серы, оксиды азота, серная и азотная кислоты, хлористый водород, гидросульфид, фтористый водород, дисульфид углерода, фтор и его соединения. Сюда же можно отнести такие органические соединения как: тиолы, углеводороды и их хлорпроизводные, альдегиды, кетоны и органические кислоты.

Следует также упомянуть такие органические соединения как фенол, креол, ксилол, толуол, этилбензол, стирол, антрацен, фенантрен, пирен, флюорен, бензпирен, диоксины и фураны.

Рассмотрим некоторые основные виды химических производств с точки зрения их выбросов в воздушную среду.

При производстве серной кислоты, как известно, сырьём служит пирит или природная сера. Технологическая цепочка получения кислоты из данного сырья выглядит таким образом: получение диоксида серы при обжиге пирита или сжигании серы, очистка и окисление полученного газа (содержащего 7 – 11% диоксида по объёму) при контакте с кислородом воздуха на ванадиевом катализаторе при температуре 430 – 480°С с целью получения три оксида; охлаждение и поступление в олеумный абсорбер (олеум – смесь триоксида и серной кислоты); поступление смеси в поглотительную башню, в которой находится 97%-ная кислота и доведение концентрации продукта до 98%. На всех стадиях неокисленный диоксид может поступить в атмосферу (1,5 – 2% в выбросах по объему). Кроме того, происходит выброс триоксида (0,01 – 0,1%) и серной кислоты в виде тумана.

Получение азотной кислоты основано на каталитическом окислении аммиака в оксид азота с последующим доокислением в диоксид в окислительно-абсорбционных аппаратах. Кислота получается при поглощении диоксида водой. Удельный выброс оксидов азота в атмосферу при хорошей очистке составляет 25 кг на 1 т продуктивной кислоты. При объемных концентрациях оксидов азота в воздухе более 0,03% газовая смесь окрашивается в характерный буро-желтый цвет. Такие дымовые хвосты видны далеко от источника выбросов.

Получение соляной кислоты происходит в две стадии. Сначала получают так называемый гидрохлорид в результате прямой реакции хлора с водородом при высокой температуре. Полученный гидрохлорид поглощается водой и образуется соляная кислота. Исходный и конечный продукт при попадании в атмосферу считается вредным выбросом.

При производстве фосфорной кислоты загрязняющим веществом является гидрофторид. Это же вещество выбрасывается в атмосферу при производстве фтористоводородной кислоты.

Одним из широко используемых в промышленности токсичных газов является хлор. Выбросы хлора в атмосферу могут происходить при получении этого продукта путем электролиза из хлористого натрия. На катоде натрий взаимодействует с водой и образует гидроксид. Выбросы хлора происходят в случае, если гидролиз недостаточно герметизирован. Хлор может находится в отходящих газах при получении хлорированных продуктов – очень богатого класса широко используемых веществ.

Значительные газовые выбросы образуются при производстве целлюлозы сульфатным методом. При этом в атмосферу попадает диоксид серы, и такие пахучие вещества как метанол, диметилсульфид, диметилдисульфид. Хотя выброс этих веществ незначителен, однако их воздействие на людей и живые существа может быть довольно чувствительным.

Несколько слов следует сказать о производстве удобрений.

Удобрения типа NPK (азотно-фосфорно-калийные) получаются из таких сырьевых компонентов как природный фосфат, азотная кислота или аммиак и хлорид или сульфат калия. Иногда используют фосфорную или серную кислоты. Первым этапом в производстве удобрений является азотнокислотное разложение природного фосфата и регулировка соотношения CaO и P_2O_3. Затем суспензия

нейтрализуется аммиаком, вводятся добавки калийных солей. Полученный продукт гранулируется, сушится, охлаждается и сортируется по крупности. Основной компонент выброса – фтор (до 10% от его содержания в сырье). Самыми большими источниками выбросов соединений фтора в химической промышленности являются заводы по производству суперфосфата. Сырьем для его получения являются природные фосфаты (апатит, фосфорит, фтор-апатит). Сырье размалывают, подают в реактор-смеситель, куда добавляется серная кислота 63 – 73% концентрации. Смесь дозревает в специальной камере и затвердевает в готовом для использования виде. Основное выбрасываемое вредное вещество – гидрофторид.

Предприятия химической промышленности размещены практически на всей территории Украины за исключением отдельных зон курортно-оздоровительных, природо-охранных, заповедных и т. п. Прежде всего следует отметить, что в отрасль химического производства вовлечен достаточно высокий научный потенциал. Во многом благодаря этому продукция химических предприятий отличается достаточно высоким качеством и конкурентно-способна не только на внутреннем, но и на внешнем рынке.

Развитие химической промышленности обусловлено наличием довольно богатой сырьевой базы. Органические продукты, т. е. природный газ и нефть, хотя и не могут полностью обеспечить потребности энергетики, в то же время, в основном покрывают производственные нужды химической отрасли. В Украине имеются значительные запасы таких видов сырья как уголь, сера, кухонная и калийная соли, карбонатное сырье и другие продукты. Большие запасы титановых руд используются не только в металлургической, но и в химической отрасли (для получения лаков и красок).

В коксо-химическом производстве, кроме получения основного продукта – кокса – получают ряд других химических веществ, которые используются для получения удобрений, анилиновых красок (Горловка, Рубежное, Крым) и других продуктов.

Нефтехимическая промышленность обеспечивает получение продуктов органического синтеза: синтетические спирты, органические кислоты, альдегиды, кетоны, фенолы. В Украине размещены 6 нефтеперегонных заводов (Кременчугский, Лисичанский, Херсонский, Одесский, Дрогобычский и Надднепрянский). Кроме светлых нефтепродуктов на заводах производят и продукты органического синтеза.

Кроме того, синтетические продукты производит лакокрасочная и анилино-красочная промышленность, основные предприятия которой размещены в Луганске, Донецке, Днепропетровске, Кривом Роге.

Синтетические смолы и пластмассы вырабатывают в Донбассе, Приднепровье, в Черкасах и Одессе, а синтетические волокна в Киеве, Чернигове, Черкасах, Житомире и Сокале (Львовская область).

Химическая отрасль включает в себя предприятия по производству и резино-технических изделий. Они размещены в Днепропетровске и Белой церкви. В целом, объемы химического производства к 2000 году существенно сократилтсь по сравнению с 80-ми годами прошлого столетия. К примеру, выпуск синтетических смол и пластмасс сократился с 827 до 162 тыс. т, Лакокрасочных материалов – с 674 до 107 тыс. т, синтетических красителей – с 32,5 до 0,5 тыс. т. Производство шин снизилось с 11200 до 6817 тыс. т. Правда производство шин для легковых автомобилей сократилось незначительно. В связи с сокращением производств значительно уменьшились объемы вредных выбросов.

5.6 Производство строительных материалов.

Производство строительных материалов сопровождается в основном выбросами дисперсных твердых веществ.

К категории этих производств относятся: цементные заводы, известковые печи, установки по производству магнезита, печи обжига кирпича, производство изоляционных материалов, огнеупорной глины, керамические заводы, установки по производству асфальта и другие предприятия. Высокая запыленность характерна не только для самого технологического процесса, но и для таких операций, как дробление, погрузка-выгрузка, транспортировка и других.

В качестве примера, рассмотрим процесс получения цемента. Сырьем для получения цемента служит известняк, силикаты, алюминаты кальция, сланец, мергель, доменный шлак, клинкер, зола, гипс, угольная пыль, кокс, железная руда. Клинкер, как составной элемент, получают при обжиге размолотых кальциевых мергелей и известняка, грунта, карбоната кальция и других добавок. Процеду-

ра осуществляется сухим способом или путем флотации в воде (мокрый способ).

На цементных предприятиях источниками выбросов являются такие операции:

- подготовка сырья (дробилки, барабанные сушилки, мельницы, транспортировка);
- обжиг клинкера (сушка угля, размол сырья, шахтные и вращающиеся печи, охлаждение, транспортировка);
- производство цемента (подготовка гипса, цементные мельницы, транспортировка);
- отгрузка (фасовка, складирование, транспортировка, известковая печь).

В целом для получения 1 т цемента необходимо раздробить, размолоть, обжечь и перевести почти 3т исходного продукта. При размоле и сушке продуктов концентрация пыли в отходящих газах достигает 200 г/м^3. В печах обжига образуются выбросы с концентрацией пыли до 30 г/м^3 и более. Состав отходящей пыли довольно сложен (более десятка веществ), среди которых: оксид кальция (до 48%), диоксид кремния (до 22%), оксид натрия (0,5 – 50%), оксид алюминия (до 12%), триоксид серы (до 13%) и другие.

Основные предприятия по производству строительных материалов размещены практически по всей территории страны. В настоящее время более половины предприятий этого типа находятся в составе строительных организаций, формируя при этом специфические индустриально-строительные объединения. Всего в Украине функционируют более тысячи предприятий стройматериалов. Наиболее крупными их производителями являются предприятия, размещенный в Киеве, Харькове, Одессе, Днепропетровске, Кривом роге, Запорожье, Донецке, Мариуполе. Цементные заводы, кроме того размещены в Амвросиевне, Краматорске, Енакиево (Донецкая область), Днепродзержинске (Днепропетровская область), Балаклее (Харьковская область), Николаеве (Львовская область), Здолбуниве (Ровенская область), Умница (Ивано-Франковская область), Бахчисарае (Автономная Республика Крым), Ольшанка (Николаевская область) и других населенных пунктах. Кирпичные заводы размещены в пределах территорий многих городов, а также в сельской местности.

5.7 Атомные станции и другие источники радионуклидов

Атомные электростанции (АЭС) находятся за пределами территории крупных городов, однако в их окрестности находятся небольшие города, где живут работники станций, а также сельские населенные пункты. Тем не менее, население больших городов подвержено риску появления в воздушной среде радионуклидов в случае аварийных ситуаций на этих станциях.

Кроме АЭС источниками радионуклидов, распространяемых в виде мелкодисперсной пыли, являются места добычи урановых руд, места хранения обедненного радиоактивного «мусора», предприятия по хранению урановых руд, а также территории, на которых поверхность земли была заражена радионуклидами во время Чернобыльской аварии.

На территории Украины действуют 4 атомные станции общей мощностью 11,8 млн. кВт: Запорожская, Южно-Украинская (Николаевская область), Хмельницкая и Ривненская. Чернобыльская АЭС (Киевская область) выведена из эксплуатации в 2003г, но наличие на ее территории так называемого «саркофага» над разрушенным четвертым блоком и «загруженных» радиоактивным топливом остальных блоков также порождает опасность возможных выбросов.

В процессе работы АЭС в так называемом «штатном режиме» выбросы радионуклидов в окружающую среду не превышают допустимых норм. Что касается «нештатных» ситуаций, то здесь можно говорить только о вероятных оценках этих величин. Печальный опыт Чернобыля позволяет делать подобные оценки. С другой стороны, этот опыт побудил специалистов в атомной отрасли к организации новой, более совершенной системы безопасности на АЭС. Разработка урановых месторождений ведется на территории Днепропетровской (Желтые воды) и Кировоградской областей. Первичное обогащение урановых руд производится в городе Днепродзержинске. Большие залежи мало радиоактивных отходов обогатительного производства расположены в нескольких километрах к северу от г. Днепропетровска. Технологическое распыление (добыча, погрузка-разгрузка, транспортировка) и естественное распыление поверхностного слоя приводит к попаданию радионуклидов в атмосферу в окрестности указанных пунктов.

5.8 Подвижные источники

Основными подвижными источниками вредных выбросов, типичных для городской территории, являются легковые и грузовые автомобили, автобусы и железнодорожные тепловозы. Определенную долю загрязнений выбрасывает в атмосферу т.н. бездорожный транспорт (тракторы, бульдозеры, погрузчики и т.п., однако эта доля в целом незначительна. Что касается авиатранспорта и водного транспорта, то его влиянием на состав городской атмосферы можно пренебречь, или же ограничиться территориями, непосредственно прилегающим к аэропортам и водным объектам.

В последние 20 - 30 лет наблюдается тенденция быстрого нарастания плотности автомобильного движения на территории больших городов. Уже в середине 80-х годов в крупных мегаполисах мира количество автомобилей исчисляется миллионами штук. Так, например, в Париже в это время было 1,5 млн. автомобилей, а в Лос-Анджелесе – 4 млн. В отмеченный период мировой автомобильный парк насчитывал 350 млн. (в среднем 75 машин на 1000 человек) городского населения. Рекордсменом здесь можно назвать США, где в это время было около 150 млн. автомобилей. Если же говорить о плотности размещения автомобилей на единицу площади страны, то по этому показателю ведущие позиции занимает Япония. Здесь плотность в 8 раз выше, чем в США.

Учитывая мировой прирост автомобилей 40 млн. в год и продолжительности жизни машины примерно 10 лет легко прогнозировать развитие этой тенденции в будущем. В начале нового тысячелетия в мире уже насчитывается около 800 млн. автомобилей, в том числе 80 млн. грузовых и примерно 1млн автобусов.

Общая протяженность автомобильных дорог во всем мире составляет более 18 млн. км (458 экваторов). Около 11 млн. км приходится на дороги с твердым покрытием. Каждая подобная трасса – это, так называемый, линейный источник вредных выбросов, совершаемых на приземном уровне, т.е. на уровне пешеходов.

Доля подвижных источников в общем объеме вредных выбросов непрерывно возрастает. Так, в конце 60-х годов прошлого столетия она составляла 42%, а в настоящее время она уже существенно больше половины. В крупных городах эта доля достигает 70-90% (например, в Киеве она равна 80%).

Установлено, что один легковой автомобиль ежегодно поглощает из атмосферы 4 т кислорода, выбрасывая с выхлопными газами 800 кг окиси углерода (CO), 200 кг различных углеводородов (C_nH_m), 40 кг окислов азота (N_xO_y), а всего – около 200 химических соединений, большинство из которых токсичны. Кроме названных веществ в продуктах сгорания находятся также альдегиды, оксиданты, аэрозоли свинца (при использовании этилированного бензина), бенз(а)пирен, сернистые соединения, сажа и другие ингредиенты. Объемный состав выхлопных газов автомобилей представлен в таблице 5.5.

Интерес представляют удельные выбросы, приходящиеся, к примеру, на единицу массы используемого горючего, на километр пути в единицу времени и т.п. Так, осреднённые вредные выбросы в килограммах на 1000л горючего представлены в таблице 5.6.

Удельные выбросы некоторых наших автомобилей типа «Жигули», «Москвич» (выпуска 1979 – 80 гг) и мотоциклов представлены в таблице 5.7.

Усредненные удельные выбросы легкового автомобиля, движущегося со скоростью 31,7 км/час представлены в таблице 5.8.

При отмеченной скорости объем выхлопных газов равен 28,95 $м^3$/км. Средняя масса сжигаемого топлива равна 2,75 кг/час и 0,087 кг/км.

Таблица 5.5 Сравнительный состав выхлопных газов автомобилей

Вещество	Бензиновые двигатели (объемных %)	Дизельные двигатели (объемных %)	Примечание
Азот	74-77%	76-78%	Нетоксичен
Кислород	0,3-0,8%	2-18%	«
Водяной пар	3-5,5%	0,5-4,0%	«
Диоксид углерода	5-12,0%	1,0-10,0%	«
Оксид углерода	1,0-7,0%	0,01-0,5%	Токсичен
Оксиды азота	0-0,8%	0,002-0,5%	«
Углеводороды	0,2-3,0%	0,01-0,5%	«
Альдегиды	0-0,2%	0,001-0,009%	«
Сажа	0-0,4г/$м^3$	0,01-1,1г/$м^3$	«
Бенз(а)пирен	До 20 мкг/ $м^3$	До 10 мкг/ $м^3$	Канцероген

Таблица 5.6 Вредные выбросы на 1000л горючего (кг).

Токсичные вещества	Карбюраторные двигатели	Дизельные двигатели
Оксид углерода	200	25
Углеводороды	25	8
Оксид азота	20	35
Сажа	1	3
Сернистые соединения	1	31
Всего	247	102

Таблица 5.7 Удельные выбросы (г/км) автомобилей и мотоциклов

Транспорт	Оксид углерода	Углеводороды	Оксиды азота
Автомобилей класса «Жигули», «Москвич»	10-15	1,0-2,0	1,0-2,5
Мотоцикл с четырехтактным двигателем (Объем 650см^3)	30-60	1,5-5,0	До 0,2
Мотоцикл с двухтактным двигателем (Объем до 350см^3)	10-35	4.0-10,0	До 0,05

Таблица 5.8 Средние удельные выбросы автотранспорта при скорости 31,7 км/час.

Вредные выбросы	г/час	г/км
Оксид углерода	752	23,7
Углеводы (C_nH_m)	29,4	0,93
Оксиды азота (N_xO_y)	33,2	1,05
Свинец (Pb)	1,11	0,035

Говоря о составе выхлопных газов необходимо рассматривать исходный продукт (горючее) и характер его превращения в процессе сгорания и выхлопа. Современные бензины представляют собой сложную смесь различных углеводородов, основными из которых являются парафины (до 58%), олефины (~до 22%) и ароматические соединения (~до 25%). Эти и другие углеводороды различного класса, включающие насыщенные соединения с прямой и разветвленными цепями, имеют различные температуры воспламенения, точки кипения и характеристики горения. Суммарная химическая реакция с использованием теоретического топлива в мольных долях может быть представлена в виде

$$C_7H_{13}+10{,}25O_2+38{,}54N_2 \rightarrow 7CO_2+6{,}5H_2O+38{,}54N_2.$$

Эта реакция отражает полное сгорание углерода и водорода без участия азота. Отношение массы воздуха (A) к массе топлива (F) называется стехиометрическим соотношением и равно 14,5. Реальное соотношение A/F может изменяться в широких пределах (от 11 до 18), при этом малым значениям соответствует недостаток воздуха (богатая смесь), а большим - избыток воздуха (бедная смесь). В богатых смесях образуется окись углерода CO и несгоревшие углеводороды C_nH_m. Окись азота образуется при нормальном соотношении, т.е. при температуре сгорания смеси. Другими словами, выброс вредных ингредиентов существенно зависит от режима эксплуатации автомобиля. На холостом ходу и при торможении реализуются высокие выбросы окиси углерода и несгоревших углеводородов. При экономичных скоростях и быстром разгоне возрастают выбросы окислов азота. Применительно к городским условиям можно говорить о значительных концентрациях вредных выбросов в окрестности регулируемых перекрестков, где есть торможение, холостой ход и быстрый разгон. Объемы выбросов на территории городов зависят от интенсивности движения на каждой из магистралей. В свою очередь эта интенсивность может зависеть от времени суток и времени года. Так, исследования этой ситуации в Париже показали, что минимум интенсивности наблюдается в промежутках с 7 до 11 часов утра и с 17 до 20 часов вечера, а годовая зависимость демонстрирует максимумы с марта по май и с сентября по ноябрь. При этом четкий минимум реализуется в августе. Упомянутые исследования подтвердили, четкую корреляцию между интенсивностью движения и объемом окиси углерода.

Объем и характер выбросов существенно зависит от конструктивных особенностей автомобиля, качества регулировки подачи и сжигания топлива. К сожалению, отечественные автомобили в этом смысле заметно уступают новым моделям импортных машин. У нас пока что речь идет о приближении к нормам выбросов типа Евро-2, в то время как Западная Европа переходит уже на Евро-5. Кроме конструктивных изменений существуют и другие способы регулирования вредных выбросов. Одним из основных подходов в этом смысле есть замена бензина или дизельного топлива другими видами горючего. В принципе дизельные двигатели считаются менее токсичными, поскольку в их топливе не содержится свинцовых

присадок, а выброс углеводородов и окиси углерода на 50-90% ниже. Правда, при этом выбрасывается больше сажи, продукты выхлопа имеют неприятный запах, а двигатель создает больше шума. В этом смысле более рациональным является оборудование автомобилей газобаллонными системами, а также применение биотоплив типа этанола и др. продуктов. Это может привести к некоторым потерям мощности. Однако, такая процедура могла бы способствовать сокращению токсичных выбросов на городских автомагистралях.

6 ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ В ОТДЕЛЬНЫХ ГОРОДАХ И РЕГИОНАХ УКРАИНЫ

Всякий прогресс основан на врождённой потребности всякого организма жить не по средствам.

Самюэл Батлер

Человечество вступило в столь высокую фазу развития, что о его будущем говорят с уверенностью только астрологи.

Дэвид Джеролд

Настоящее есть следствие прошедшего, а потому обращай свой взор на зады, чем обережёшь себя от знатных ошибок.

Козьма Прутков

6.1 Общая характеристика

Украина относится к числу государств, в которых наблюдается наиболее неблагоприятное воздействие человека на окружающую среду. Это обусловлено многими причинами и, в первую очередь, историческим наследием, а именно - хозяйственной деятельностью на ее территории в последние 7 – 8 десятилетий. Как результат этой деятельности техногенная нагрузка на единицу площади страны во много раз превышает показатели развитых стран. Уже в 80-е годы прошлого века Украина, которая занимала 3% территории бывшего Советского Союза, вырабатывала 20% общегосударственного ВВП.

Украина имеет развитую сеть горнодобывающих, металлургических, химических, энерго-генерирующих и других предприятий, создающих высокое давление на окружающую среду. Это утверждение можно проиллюстрировать некоторыми данными, приведенными в работе [164]. К концу 80-х годов в Украине ежегодно вырабатывалось 55 – 57 млн. т стали (практически столько же, как во Франции и Германии вместе взятых). Ежегодная добыча железной руды составляла до 120 млн. т, в то время как в США – 50 млн. т., а во Франции – 15 млн. т. Объем добываемого угля составлял 100 – 120 млн. т, что превышает добычу в любой из европейских стран.

В Украине до последнего времени было более 300 угольных шахт, 7 разрезов. Начиная с 1960 года в режиме “мокрой” консервации было закрыто более 100 шахт. Закрытие шахт производится и в настоящее время. К сожалению, подъем шахтных вод сопровождается подтоплением или заболачиваем окружающей территории и другими нарушениями природной среды. Деятельность горно-химических предприятий в Львовском и Волынском регионах приводит к карстовым образованиям, сдвиговым процессам и провалам.

Серьезную проблему представляет образование и складирование экологически опасных твердых отходов (более 700 млн. т в год), занимающих территорию 160 тыс. га при общем объеме ~ 25млрд тонн. Утилизация промышленных отходов осуществляется на 10-15% в то время, как в развитых странах этот показатель равен 65÷ 80%. В Украине в настоящее время размещены 6 хранилищ радиоактивных отходов. В стране функционирует более 2500 объектов, где вырабатываются или используются высоко-токсичные вещества. На шести мощных нефтеперегонных заводах сосредоточены сотни тысяч тонн углеводного топлива, энергоемкость которого соответствует 3 – 5 мегатоннам тротила. Нефтепроводы (более 7 тыс. км) и газопроводы (34 тыс. км.) также являются экологически опасными объектами. На железных дорогах и магистралях провозятся ежедневно значительное количество огнеопасных веществ. Положение усугубляется еще и тем, что во многих производственных процессах используются устаревшие энергоемкие технологии. По расходу ресурсов на единицу продукции Украина в 3 раза превышает уровень развитых стран. Объем твердых, жидких и газообразных вредных выбросов в окружающую среду превышает допустимые нормы еще и потому, что очистные устройства на отдельных предприятиях работают плохо или вовсе отсутствуют. На многих предприятиях, включая мощные тепловые электростанции, истекают сроки гарантированной безаварийной эксплуатации (30 – 50 лет), что тоже представляет потенциальную экологическую опасность. Оборонная промышленность и отдельные военные объекты (которых на территории Украины было довольно много) также вносят свой вклад в загрязнение среды, а некоторые из них потенциально опасны (склады оружия, хранилища реактивного топлива и т.д.).

В целом уровень техногенного загрязнения территории Украины в 3,2 раза выше, чем в 12 странах Европейского Союза вместе взятых. Страна до сих пор не оправилась от радиоактивной катастрофы мирового масштаба – взрыва реактора на Чернобыльской АЭС.

Следует отметить, что именно Чернобыль вошел в перечень десяти наиболее загрязненных городов мира. Мы здесь приведем список этих городов в порядке уменьшения уровня загрязнения:

1. Миньфень (Китай)
2. Тяньзынь (Китай)
3. Сукинда (Индия)
4. Вани (Индия)
5. Ороя (Перу)
6. Дзержинск (Россия)
7. Норильск (Россия)
8. Чернобыль (Украина)
9. Сугмант (Азербайджан)
10. Кабве (Замбия)

6.2 Основные показатели по атмосферным выбросам.

В последние годы общие объемы вредных выбросов в окружающую среду несколько уменьшились в результате сокращения промышленного производства. Эту тенденцию можно проследить пользуясь таблицами 6.1, 6.2, заимствованными из данных Госкомстата Украины за 1990 – 2005гг (http://www.ukrstat.gov.ua).

Данные по выбросам вредных веществ в 2005 году по отдельным областям и видам экономической деятельности приведены в таблицах 5.5 и 5.6.

В 2006 году выбросы в атмосферу увеличились. Из данных Госкомстата Украины следует, что от 11 тысяч промышленных предприятий, взятых на государственный учет территориальными органами Минприроды, в воздушный бассейн страны в 2006 году поступило 4,8 млн т вредных веществ (т.е. на 7,3% больше чем в2005г). Тенденция нарастания объёма выбросов наблюдается, начиная с 2001 года. Увеличение вредных выбросов отмечалось в 19 регионах Украины. Наиболее заметный рост наблюдался в Киевской (на 48% больше), Полтавской (на 36%), Херсонской (на 35%), Ивано-Франковской (на 32%) и Тернопольской (на 31%) областях. В показатели 2006 г. не включены данные по выбросам автотранспорта. Известно, что они в среднем по Украине составляют около 35% от

общего объёма. Следует отметить, что значительная доля выбросов, а именно 83%, генерируют парниковый эффект, т.е. влияют на характер изменений климата. В частности, это диоксид углерода (167,7 млн. т), оксид углерода (1,35 млн. т), диоксид серы (1,33 млн. т), метан (0,912 млн. т), оксиды азота (0,328 млн. т), летучие органические соединения (0,087 млн. т), аммиак (0,0194 млн. т), хлорфторуглерод (0,0002 млн. т). Из других веществ следует назвать металлы и их соединения (1,1%), твердые частицы (14,5%) и другие.

Таблица 6.1 Основные показатели охраны атмосферного воздуха

Годы	Вредные выбросы в атмосферный воздух			
	Всего тыс. т*.	в том числе		в расчете на 1кв. км территории страны, т
		Стационарными источниками	Автотранспортом	
1990	15549,4	9439,1	6110,3	25,8
1991	14315,4	8774,6	5540,8	23,7
1992	12269,7	8632,9	3636,8	20,3
1993	10015,0	7308,3	2706,7	16,6
1994	8347,4	6201,4	2146,0	13,8
1995	7483,5	5687,0	1796,5	12,4
1996	6342,3	4763,8	1578,5	10,5
1997	5966,2	4533,2	1433,0	9,9
1998	6040,8	4156,3	1884,5	10,0
1999	5853,4	4106,4	1747,0	9,7
2000	5908,6	3959,4	1949,2	9,8
2001	6049,5	4054,8	1994,7	10,0
2002	6101,9	4075,0	2026,9	10,1
2003	6191,3	4087,8	2009,7	10,3
2004	6325,9	4151,9	2076,9	10,5
2005	6600,4	4448,9	2056,0	10,9
2006	7027,6	4822,2	2205,4	11,6
2007	7380,0	4813,3	2566,7	12,2
2008	7210,3	4524,9	2685,4	11,9
2009	6442,9	3928,1	2514,8	10,7
2010	6678,0	4131,6	2546,4	11,1

* в 2003 – 2005 гг. учтены выбросы от железнодорожного, авиационного, морского и речного транспорта

Таблица 6.2 Положение с отходами I – III классов опасности

Годы	Отходы 1-III классов опасности				
	Образовалось, тыс. т	Направлено в хранилища, тыс. т	Направлено в места неорганизованного хранения, тыс. т	Наличие к концу года в хранилищах организованного складирования и на территории предприятий	
				Всего тыс. т	В расчете на кв. м. территории
1994	4955,8	1244,4	83,2	40843,3	67,7
1995	3562,9	1232,3	248,4	54841,0	90,9
1996	3150,9	1262,9	217,5	46014,0	76,2
1997	3161,4	1392,7	55,4	71551,2	118,6
1998	2454,1	668,9	35,9	34337,5	56,9
1999	2820,4	885,4	15,0	37098,9	61,5
2000	2613,2	760,6	13,2	26244,1	43,5
2001	2543,3	640,0	12,2	23002,0	38,1
2002	1728,8	726,9	8,5	18728,5	31,0
2003	2436,8	931,7	8,1	31304,0	51,9
2004	2420,3	1102,8	13,5	28349,0	47,0
2005	2411,8	948,5	1,8	21674,0	35,9

Таблица 6.3 Выбросы вредных веществ в атмосферу от стационарных источников загрязнения по регионам в 2005 году.

	Объемы выбросов			Плотность выбросов в расчете на 1кв. км, кг
	Тыс. т.	В % к 2004г	В % к итогу	
Украина	4449,3	107,2	100,0	7372,2
Автономная республика Крым	35,1	99,9	0,8	1346,1
Винницкая	107,4	139,8	2,4	4053,4
Волынская	11.8	139,3	0,3	586,0
Днепропетровская	993,5	113,7	22,3	31123,2
Донецкая	1637,7	102,5	36,8	61759,1
Житомирская	13,4	67,8	0,3	447,9
Закарпатская	11,4	118,5	0,3	893,0
Запорожская	262,0	113,6	5,9	9637,4
Ивано-Франковская	204,2	115,6	4,6	14664,4

Продолжение таблицы 6.3.

	Объемы выбросов			Плотность выбросов в расчете на 1кв. км, кг
	Тыс. т.	В % к 2004г	В % к итогу	
Киевская	72,9	92,5	1,6	2593,8
Кировоградская	Тыс. т.	В % к 2004г	В % к итогу	1340,0
Луганская	474,6	104,8	10,7	17786,4
Львовская	95,8	106,6	2,2	4389,3
Николаевская	24,3	109,6	0,5	988,3
Одесская	40,2	137,5	0,9	1205,9
Полтавская	68,4	94,5	1,5	2379,6
Ровенская	17,3	109,5	0,4	864,8
Сумская	26,1	86,4	0,6	1096,3
Тернопольская	14,9	118,5	0,3	1078,3
Харьковская	158,4	107,0	3,6	5041,8
Херсонская	11,0	126,9	0,2	386,3
Хмельницкая	16,0	95,0	0,4	777,4
Черкасская	39,4	113,4	0,9	1884,9
Черновицкая	5,2	108,1	0,1	642,7
Черниговская	37,5	99,0	0,8	1176,6
г. Киев	33,6	96,3	0,8	40146,8
г. Севастополь	4,2	119,4	0,1	4846,5

Таблица 6.4 Выбросы вредных веществ в атмосферу по видам экономической деятельности в 2005 г.

	Кол-во предприятий, которые имели выбросы, ед.	Объем выбросов			Выбросы в среднем на одно предприятие, т.
		Тыс. т	В % к 2004 г.	В % к итогу	
Все виды экономической деятельности	10921	4449,3	107,2	100,0	407,4
в том числе:					
добывающая промышленность	508	1023,5	103,2	22,7	2014,7

Продолжение таблицы 6.4.

	Кол-во предприятий, которые имели выбросы, ед.	Объем выбросов			Выбросы в среднем на одно предприятие, т
		Тыс. т	В % к 2004 г.	В % к итогу	
обрабатывающая промышленность	4526	1701,6	104,1	36,7	376,0
из них					
производство кокса, нефтяных продуктов и ядерного топлива	48	124,9	80,8	2,8	2601,6
металлургия и обработка металлов	353	1289,0	106,5	28,7	3651,5
производство электроэнергии, газа, воды	758	1440,7	115,1	34,7	1900,7
транспорт	1164	154,3	100,0	3,3	132,5

6.3 Загрязнение атмосферы в отдельных областях

В дополнение к приведенным данным следует сделать краткий анализ по отдельным регионам, начиная с наиболее загрязненных территорий (в данном случае с **Донецкой области**). В 2006 г в воздушный бассейн от стационарных источников здесь поступило 1,63 млн. т вредных веществ или 34% от общегосударственных показателей. Здесь размещено наибольшее количество населенных пунктов, в которых выбросы превышают 100 тыс. т в год. Это Донецк, Дебальцево, Курахово, Мариуполь, Макеевка, Светлодар и пгт Новый Мир. Плотность выбросов составляет 61,44 т/кв.км. Кроме проблемы загрязнения атмосферы, в области существует целый комплекс других экологических проблем: нехватка пресной воды, наличие больших территорий порушенных горными выработками и загрязненных отвалами горных пород, высокая плотность автомобильного движения, загрязнение водоемов и другие.

В **Днепропетровской области** в 2006 г. в атмосферу поступило 1,1 млн. т вредных веществ или 23% от общегосударственных показателей (не считая выбросов транспорта). Свыше 100 тыс. т в год выбрасывали предприятия областного центра, а также предприятия Кривого Рога, Днепродзержинска и Зеленодольска. На каждое из 685 предприятий области приходятся выбросы, которые в 4,1 раза превышают средне-республиканские. Плотность выбросов составляет 34,5 т/кв.км. Из числа других проблем следует назвать значительные загрязнения Днепра промышленными стоками, наличие в окрестностях Днепропетровска огромной массы отвалов отработанного радиоактивного сырья, скопление в городе Павлограде твердого реактивного топлива (после ликвидации корпусов ракет), интенсивное автомобильное движение в городах, большие территории, порушенные горными выработками. В Днепропетровске наблюдается неконтролируемый подъём грунтовых вод (на левом берегу Днепра), существует опасность сдвигов грунта на берегах глубоких оврагов, пересекающих городскую территорию.

В **Луганской области** выбросы стационарных источников составили 0,517 млн. т, или около 11% от общегосударственного уровня. При этом свыше 100 тыс. т выбрасывали в атмосферу предприятия Луганска, Алчевска и Счастья. Известно, что область специализируется на топливно-энергетической, металлургической, химической и нефтехимической отрасли, что обусловливает большие выбросы в атмосферу, в водный бассейн и в грунт. Большая территория области занята отвалами горнорудной промышленности, свалками промышленных и бытовых отходов. В результате неконтролируемой выработки сокращаются площади лесопосадок и лесозащитных полос, что неблагоприятно влияет на микроклимат и ситуацию в сельском хозяйстве.

В число регионов с наиболее высокими выбросами в атмосферу входит и **Ивано-Франковская область**. Общий объём выбросов в 2006г. Здесь составил 0,270 млн. т (т. е. 5,6% от общегосударственного уровня), а плотность выбросов – 19,34 т/кв.км. Около 85% из этого объёма дает Бурштынская ТЭС (г. Бурштын). Остальные 15% приходятся в основном на г. Ивано-Франковск и г. Калуш, где расположен Калушский калийный концерн.

Серьёзная экологическая ситуация складывается в **Запорожской области**. Общий объём выбросов в 2006 г был равен 0,258 млн. т (5,4% от общегосударственного объёма), а плотность – 9,5

т/кв.км. Основная масса выбросов приходится на областной центр и г. Энергодар. Более 50% вредных атмосферных загрязнений обеспечивает ПО «Запорожсталь», а еще 35% Днепровский электродный завод. Транспортные средства выбрасывают в атмосферу в течение года более 100 тыс. т вредных веществ. В области наблюдаются высокие показатели выброса загрязненных вод в р. Днепр и поверхностные водоёмы – 330 млн. $м^3$. На территории области находятся более 120 млн. т твердых токсических отходов. Наблюдается дефицит топливных и лесных ресурсов. Повышенную экологическую опасность представляет Запорожская АЭС.

В **Харьковской области** от стационарных источников в воздушный бассейн поступает 0,181 млн. т вредных веществ при плотности выбросов 5,78 т/кв.км. Доля выбросов составляет 3,8% от общегосударственного объёма. Наиболее значительные выбросы совершают предприятия топливно-энергетического комплекса. Змиевская ГРЭС, которая является наиболее мощной тепловой электростанцией страны, выбрасывает в атмосферу более 66% от общего областного показателя. В атмосферу городов области поступает значительное количество серного ангидрида и окислов азота. Экологический анализ фиксирует неудовлетворительный состав локальных атмосферных осадков, которые содержат сульфаты, нитраты, аммонийный азот и другие вещества. Водные артерии – Сиверский Донец и другие мелкие реки и водоёмы сильно загрязнены сточными водами. Объём коммунальных сточных составляет около 400 млн. $м^3$ ежегодно. Город Харьков перенасыщен автомобилями, количество которых непрерывно нарастает, а, следовательно увеличиваются выбросы окиси углерода, бензпирена, соединений свинца и других вредных вешеств.

В **Винницкой области** объём вредных выбросов в атмосферу от стационарных источников составляет 0,135 млн. т в год, т. е. 2,8% от общегосударственного показателя. Плотность выбросов равна 5,1т/кв.км. Основным загрязнителем местной атмосферы является город Ладыжин, предприятия которого имеют выбросы более 100 тыс. т за год. В самом областном центре выбросы значительно меньше.

Киевская область и город Киев имеют высокий уровень загрязнения атмосферы. Это обусловлено многими причинами. Прежде всего высоким уровнем индустриализации города и области. Здесь сосредоточены предприятия энергетики (ТЭЦ-5 и ТЭЦ-6),

машиностроительные, химические, электроэнергетические предприятия и предприятия пищевой промышленности. Общий объём выбросов от стационарных источников составляет 0,135 млн. т в год, из них 0,026 млн. т в городе Киеве. Плотность выбросов в области (без города Киева) составляет 3,8 т/кв.км, а в городе Киеве – 31,57 т/кв.км. В столице Украины более 60% атмосферных выбросов поступают от автотранспорта. Территория Киевской области подверглась значительному радиоактивному заражению после аварии на Чернобыльской АЭС. Значительную экологическую проблему представляют накопление промышленных и бытовых отходов и их утилизация. В Киеве и в области постоянно возрастают объёмы промышленных сточных вод. В целом по сравнению с 1990 годом уровень загрязнения внешней среды существенно понизился. Существенным положительным фактором с точки зрения экологии в городе и области является то, что довольно значительные части территории заняты лесными насаждениями, парками, рекреационными площадками и растительными массивами.

В **Львовской области** общий объём выбросов от стационарных источников составляет 0,11 млн. т, т. е. 2,3% от общегосударственного уровня. Плотность выбросов составляет 5,07 т/кв.км. Основные потоки загрязнений поступают от предприятий Львова и Добротвора. В городе и области довольно высокую долю выбросов составляют подвижные средства – свыше 80%. В области нередко возникают аварийные залповые выбросы, что существенно влияет на уровень здоровья и жизнедеятельности населения. Работы по лесообновлению и забота о наличных лесных ресурсах несколько смягчают сложную экологическую обстановку в области.

Полтавская область замыкает десятку областей с наиболее высокими выбросами вредных веществ в воздушный бассейн. Общий объём выбросов от стационарных источников здесь составляет 0,093 млн. т в год, т. е. 1,9% от общегосударственного уровня. Плотность выбросов составляет 3,24 т/кв.км. Экологическая обстановка в области обусловлена наличием крупных предприятий горнорудной, химической, нефтегазодобывающей отраслей (всего более 700 предприятий). Добыча нефти и газа на территории области становится приоритетным видом промышленной деятельности. Наиболее массовые выбросы в атмосферу происходят в областном центре, а также в городах Кременчуг и Комсомольск. Промышленные предприятия и коммунальные хозяйства выбрасывают в водо-

ёмы более 130 млн. $м^3$ в год. Довольно часто происходят аварийные залповые выбросы в атмосферу (15 выбросов в 2000г.). Полтавщина отнесена ко II-му (высокому) уровню техногенной нагрузки.

Одесская область характеризуется следующими экологическими показателями: объём выбросов от стационарных источников составляет 0,042 млн. т в год (0,9% от объёма выбросов по Украине). Плотность выбросов равна 1,26 т/кв.км. Довольно высокими являются выбросы подвижных источников, которые в 2000г были равны 90,3 тыс. т. В этом же году произошли 12 случаев аварийного загрязнения атмосферы. Область испытывает дефицит пресной воды. Существует насущная потребность в налаживании оптимальной эксплуатации водозаборов подземных вод.

В **Черниговской области** общий объем выбросов от стационарных источников составил 0,04 млн. т в год (0,8% от общих выбросов по стране). Плотность выбросов равна 1,26 т/кв.км. Основными источниками выбросов являются Черниговская ТЭЦ, Гнедиченский завод по переработке газа и стабилизации нефти, предприятия «Черниговнефтегаз», сахарные и спиртовые заводы (их доля составляет более половины выбросов). Довольно высокими являются объёмы вредных веществ, поступающих от автотранспорта в городах Чернигове, Нежине, Прилуках. Серьёзность экологической ситуации в области определяется радиоактивным заражением территории в результате Чернобыльской аварии. К зонам загрязнения отнесены 252 населенных пункта.

В **Крымской автономной республике** выбросы вместе с г. Севастополь составили 0,0385 млн. т (0,8% от общего показатель по стране). Плотность выбросов равна 1,31 т/кв.км. В республике непрерывно нарастают поступления вредных веществ в атмосферу. В 2000г они составили 80% от общего объёма, причем основная их доля приходится на города Симферополь, Севастополь, Керчь, Армянск, Красноперекопск, Ялта. Большую долю загрязнений поставляют ТЭЦ, расположенные в городах. Опасными для окружающей среды являются химические производства, расположенные в районе Сиваша. Особой проблемой является серьёзный дефицит пресной воды, а также загрязнения акватории Черного и Азовского морей.

Черкасская область характеризуется такими показателями: объём выбросов в атмосферу равен 0,403 млн. т (0,8% от общего по стране) при плотности 1,926 т/кв.км. Основными загрязнителями

воздушного бассейна являются Черкасские объединения «Азот», «Аврора» и «Химволокно» (более половины выбросов). Напряженная экологическая ситуация наблюдается также в городах Смела, Золотоноша, Тальное. Стоки загрязненных промышленных вод, а также смыв минудобрений и ядохимикатов пагубно влияют на состояние малых рек и других водоёмов.

В **Сумской области** объём выбросов от стационарных источников в 2006г. был равен 0,0284 млн. т (0,6% от общего по стране). Плотность выбросов составила 1,19 т/кв.км. По сравнению с другими восточными областями уровень загрязнения атмосферы в области существенно ниже. Основные источники выбросов расположены в городах Сумы, Шостка, Конотоп. Выбросы обусловлены развитием таких отраслей промышленности, как нефтегазодобывающая, машиностроительная, химическая, пищевая. В 2000г. были зафиксированы три залповых аварийных выброса вредных веществ.

Закарпатская область характеризуется такими экологическими показателями: объём выбросов в атмосферу равен 0,0256 млн. т (0,5% от общегосударственного). Плотность выбросов равна 2,0 т/кв.км. Предприятия, загрязняющие воздушную среду, расположены в основном в городах Ужгород, Воловец, Мукачево. Серьёзную экологическую проблему для области представляет экосистема реки Тиса, которая нередко загрязняется ртутными выбросами на территории Румынии.

В **Кировоградской области** выбросы от стационарных источников составили 0,0226 млн. т (0,5% от общегосударственных). Плотность выбросов равна 0,919 т/кв.км. Общие выбросы (с учетом подвижных источников) в 2000г составили 0,0447 млн. т, из них 0,032 млн. т в Александрии, 0,0235 – в Димитрове и 0,0022 млн. т. в самом Кировограде. Следует отметить, что выбросы в г. Димитрове на одно предприятие значительно превышают общегосударственный показатель.

Николаевская область – находится в числе девяти других областей, где выбросы в атмосферу составляют менее 0,5% от общегосударственных (в данном случае – 0,4%) или 0,0212 млн. т. Суммарные выбросы вместе с подвижными источниками составили 0,0267 млн. т в 2000 г. Позитивным фактором являются довольно редкие залповые аварийные загрязнения. Основные экологические проблемы связаны с организацией землепользования, где наблю-

даются такие процессы, как водная и эоловая эрозия, засоление грунта и т. п. явления. В области функционирует АЭС.

В **Тернопольской области** выброс в атмосферу составляет 0,0194 млн.т. (т. е. 0,4% от общегосударственного) при плотности выбросов 1,4 т/кв.км. Выбросы совершают в основном предприятия Тернополя и Кременца. Поступления вредных веществ в атмосферу от подвижных средств в 2000 г. составили 34,1 тыс. т (в 1990 г их было 149 тыс т). Объёмы выбросов в области существенно снизились по сравнению с 1990 годом в связи с деградацией многих промышленных предприятий. Это явление отразилось также на количестве аварийных выбросов, особенно в середине 90-х годов (62 выброса в 1995 г и 21 выброс в 1998 г.).

В **Хмельницкой области** объём выбросов в атмосферу равен 0,018 млн. т в год, т. е. 0,4% от объёма по стране. Плотность выбросов в 2006 г. составила 0,87 т/кв.км. За период с 1990 г. по 2006 г. масса выбросов уменьшилась в 7 раз. Основные пункты поступления вредных веществ в атмосферу расположены в Хмельницком, Староконстантинове и Славуте. Водная среда на территории области загрязняется постоянно за счет вредных стоков. Их объём в 2000 г. был 6 млн $м^3$. Твердые токсические отходы в больших объёмах накапливаются в организованных местах складирования и на территории предприятий. Экологическая напряженность создается в области за счет функционирования Хмельницкой АЭС.

В **Ровенской области** выбросы в воздушный бассейн составили 0,0179 млн. т (0,4% от общего по стране) при плотности выбросов 0,895 т/кв.км. Основными загрязнениями являются предприятия химической и пищевой промышленности, а также автомобильный транспорт. В водные объекты происходит сброс недостаточно очищенных вод в объёме 18 млн. $м^3$ в год. В области расположена Ровенская АЭС.

Житомирская область характеризуется такими экологическими показателями: общий объём выбросов от стационарных источников составляет 0,0156 млн. т в год (0,3% от общегосударственного показателя) при плотности выбросов 0,522 т/кв.км. Область значительно пострадала в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Значительная часть её территории выведена из хозяйственного оборота. Объём выбросов в атмосферу в 5,6 раза уменьшился по сравнению с 1990 г. в результате сокращения производства в машиностроении, легкой и пищевой промышленности. В то же

время, постоянно нарастает объём выбросов от подвижных источников. В 2000 г. он становил 0,055 млн. т, что значительно больше, чем от стационарных объектов.

В **Херсонской области** выбросы от стационарных источников становили 0,0148 млн. т (0,3% от общего показателя по стране) при плотности выбросов 0,521 т/кв.км. Объёмы выбросов снизились в 5 раз по сравнению с 1990 г. в результате сокращения производства. Подвижные источники выбрасывали в 2000 г. 0,0527 млн. т. Особую опасность представляет проблема накопления твердых отходов высокой степени токсичности, особенно отходов гальванического производства, которые концентрируются на полигоне «Южэлектромаш» в г. Новая Каховка.

В **Волынской области** выбросы в атмосферу равны 0,0122 млн. т в год, что составляет 0,3% от общего показателя по Украине. Плотность выбросов составляет 0,608 т/кв.км. Вредные выбросы поступают в атмосферу от промышленных предприятий, основная доля которых (87,2%) относится к отрасли машиностроения – завод «Волынь-Маш», ВАО «КиверцыСпецМаш», ВАО «Ковельсельмаш», Луцкий автомобильный и авторемонтный заводы и др.. В области есть несколько предприятий химической и нефтехимической промышленности – «Спектр», «Полимер» и др., которые также загрязняют воздушный бассейн. В городах Луцк, Новомосковск, Ковель, наблюдается сброс недостаточно очищенных вод в воздушную среду (32 млн. $м^3$ в 2000 г.).

В **Черновицкой области** реализуются самые низкие по Украине выбросы в атмосферу от стационарных источников, а именно: 0,0042 млн. т в год (т. е. 0,1% от общегосударственного уровня). Плотность выбросов при этом становит 0,519 т/кв.км. Объёмы выбросов в 2000 г составили всего лишь 15,8% от показателей 1990 года. В настоящее время вредные вещества поступают в атмосферу в основом от предприятий пищевой промышленности и автомобильного транспорта. В частности подвижные источники в 2000г выбросили в воздушный бассейн 0,031 млн. т. В 1990 году область пережила экологический кризис, обусловленный попаданием в природную среду талия. Это привело к серьёзным заболеваниям среди населения, причем в первую очередь пострадали дети.

В соответствии с данными Госкомстата Украины за 2008 г. Первая десятка наиболее загрязненных городов нашей страны выглядит таким образом (в скобках указаны годовые объемы выбро-

сов в атмосферу в тысячах тонн): Кривой Рог – (449,4); Мариуполь – (359,3); Бурштын (Ивано-Франковская обл.) – (218,3); Курахово (Донецкая обл.) – (162,8); Зеленодольск (Днепропетровская обл.) – (146, 0); Запорожье – (130,36); Днепропетровск – (120,3); Комсомольск (Харьковская обл.) – (115,5); Дебальцево (Донецкая обл.) – (114,9).

В соответствии с этими же данными областные центры Украины за объемами выбросов в атмосферу расположились в таком порядке:

Луганск (175,8), Запорожье (130,36), Днепропетровск (120,3), Донецк (101,66), Киев (26,97), Черкассы (19,52), Одесса (17,63), Херсон (10,48), Сумы (9,49), Николаев (7,05), Харьков (5,98), Винница (4,18), Ровно (3,49), Кировоград (2,9), Полтава (2,13), Львов (1,89), Симферополь (1,86), Житомир (1,79), Ужгород (1,75), Черновцы (1,1), Хмельницкий (1,05), Луцк (1,02), Тернополь (0,72), Ивано-Франковск (0,66).

6.4 Пример анализа экологической ситуации в отдельном городе

Здесь предлагается более подробный анализ экологической ситуации на примере одного из наиболее загрязненных техногенными выбросами городов Украины, а именно: г. Днепропетровска. Ранее в пункте 6.3 были приведены некоторые стандартные данные о степени загрязнения природной среды в городе и области. Далее следует материал, в котором содержится более подробная информация о самом городе, особенностях его территории, количестве характере и интенсивности источников выбросов, составе поступающих в среду вредных веществ, а также характерных локальных метеоусловиях. Приводятся некоторые факты о деятельности муниципальных органов власти, профильных учреждений и организаций, направленные на обеспечение экологической безопасности и улучшение условий жизнедеятельности городского населения. Используемая информация базируется на данных относящихся к пятилетнему периоду 1999 – 2004гг [166]. Естественно, что количественные данные ежегодно обновляются, но для оценки экологической картины в целом это не столь существенно. Поскольку речь идет о примерах построения структурной схемы анализа. Известно,

что распространение вредных веществ в городской воздушной среде обусловлено тремя основными факторами:

- особенностями подстилающей поверхности, т.е. рельефом, характером застройки территории и т. п.;
- метеорологическими параметрами, т.е. направлением и скоростью ветра, уровнем устойчивости атмосферы и т.п.;
- размещением источников загрязнения, их интенсивностью и составом выбросов.

Рассмотрим эти факторы в такой же последовательности. Город Днепропетровск расположен на северном изгибе большой Днепровской речной излучины, в месте впадения реки Самары; координаты его центра расположены на 48°27' с.ш. и 36°02' в.д. Площадь города – около 400 кв.км., население – примерно 1,1 млн. человек, плотность населения – 280 чел./кв.км. Город лежит на обоих берегах Днепра, причем более крутой правый берег является отрогом Приднепровской возвышенности с превышением в пределах города абсолютных отметок 135м, а левый берег пониженный, поскольку он принадлежит к долинно-речному ландшафтному типу. Правый берег разрезан восемью балками, открывающимися в меридиональном направлении в долину Днепра. Крутизна их склонов лежит в пределах от 9° до 55°, а ширина днища – 60-350 м. Балки покрыты растительностью и частично заселены. Ширина р. Днепр в пределах города – 0,7 – 1 км. Берега соединены пятью мостами.

Высотная застройка характерна для центральной части города на правом берегу и прибрежной части левого берега. В городе расположено несколько растительных массивов: ботанический сад, несколько парков, гидропарк и т.п. Застройка основной части территории города не всегда велась с учетом особенностей строения его природных комплексов и ландшафтов. В связи с этим создалась мозаичная картина распределения локальных экологических условий. Отдельные участки территории имеют значительную техногенную нагрузку. Специалисты выделяют более 150 локально обособленных экологических участков – урбоэкотопов.

Такие особенности подстилающей городской поверхности существенно влияют на характер воздушных потоков в приземном слое, что необходимо учитывать при анализе распространения атмосферных загрязнений.

Микроклимат и метеоусловия на территории обусловлены тем, что город расположен в умеренно континентальной зоне. Сте-

пень континентальности по соответствующему стандарту равна 38%. Температура воздуха в основном (а именно на 70%) соответствует показателям умеренных широт. Повторяемость вторжений холодного арктического воздуха и горячего тропического воздуха примерно одинакова и равна 15%.

Средняя температура наиболее жаркого месяца, июля, равна 21,6°С, средняя температура наиболее холодного месяца, января, равна -6°С. Коэффициент, зависящий от стратификации атмосферы, $K_{стр} = 200$. Ветровые условия умеренные. Среднегодовая скорость ветра $V_{ср} = 4$м/с. Повторяемость скорости ветра более 6 м/с равна 12,7%, более 10 м/с – 5%. Наибольшую повторяемость имеют ветры со скоростями 2 – 5 м/с. Среднегодовая роза ветров характеризуется данными приведенными в таблице 6.5.

Таблица 6.5 Среднегодовая роза ветров по румбам (%)

С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
15	13	11	14	12	10	10	15

Направление и скорость ветра являются факторами, определяющими участки территории города, которые при данных условиях в данный момент наиболее подвержены воздействию вредных выбросов. Учитывая размещение промышленных предприятий и транспортных магистралей, можно установить следующие закономерности.

Прежде всего необходимо учесть, что промышленные предприятия, на которые приходится наиболее высокая доля вредных выбросов, расположены в западной части правобережной территории, а также в прибрежной центральной (т. е. восточной) части левобережной территории. На левом берегу в юго-восточной части города расположена приднепровская ТЭС, имеющая наиболее крупные выбросы.

На ветры южной четверти приходятся наибольшие среднегодовые концентрации пыли в восточной части правобережья. В течение же холодного полугодия наибольшая запыленность воздуха наблюдается при восточных и северо-восточных ветрах, которые приносят пылевые выбросы предприятий, расположенных на левом берегу Днепра.

На содержание сернистого ангидрида в атмосфере влияют Приднепровская ГРЭС, расположенная на юго-востоке и западная

группа заводов с мощными вредными выбросами на правом берегу. В летние месяцы концентрация сернистого газа более равномерно распределена по румбам, причем её высокие значения приходятся на штилевые условия.

Концентрация окиси углерода в основном определяется транспортными выбросами, поэтому её высокие значения наблюдаются вдоль автомагистралей с интенсивным движением, особенно в период штилей. В целом следует отметить, что параметры ветрового потока по-разному влияют на концентрацию загрязнений на отдельных участках территории и здесь нет необходимости в подробной детализации этих явлений.

На характер миграции полютантов в воздушной среде влияют осадки, способствующие вымыванию загрязнителей. Среднегодовое количество дней с осадками в городе – 151. Годовое количество осадков равно 477 мм. Среднегодовое количество дней с туманами равно 44.

Состояние воздушной среды определяется уровнем устойчивости атмосферы и наличием температурных инверсий. Данные об этих явлениях имеются в локальном метеорологическом пункте. Рассмотрим основные данные об источниках выбросов. На территории города находятся более 170 предприятий и организаций, которые имеют 7 тыс. источников выбросов (из них ~90% – организованные). В городе имеется широкая сеть улиц и дорог, по которым ежедневно движутся более 100 тыс. легковых пассажирских и грузовых автомобилей. В воздушный бассейн города выбрасывается более 80 наименований загрязняющих веществ: взвешенные частицы, серный ангидрид окись углерода, окись азота, аммиак, бензол, сероводород, ацетон и другие. В качестве примера, в таблице 6.6 приводятся объёмы и состав выбросов, поступавщих в атмосферу от стационарных источников в 1999г.

Для сравнения в таблице 6.7 приводятся данные о выбросах в атмосферу в отдельных городах Днепропетровской области в 1999г. При этом следует иметь ввиду, что наиболее крупные выбросы совершали такие предприятия, как Криворожская ТЭС (94705,6 т), Приднепровская ТЭС (71048 т), ОАО Днепровский меткомбинат (106907 т), «Криворожсталь» (128889,5 т), ОАО «ЮЖГОК» (128299,5 т) и другие.

В г.Днепропетровск, кроме Приднепровской ГЭС наиболее крупные выбросы в атмосферу (твердые и жидкие) имели такие

предприятия как: ОАО «ДМЗ им.Петровского» (4346,8 т), ОАО «Днепрошина» (1766,3т), ОАО «Днепротяжмаш» (249,2 т), ОАО «Нижнеднепровский трубопрокатный завод» (638,0 т) и другие.

Таблица 6.6 Динамика выбросов загрязняющих веществ, поступивших в атмосферу (в тоннах).

Наименование загрязняющих веществ	2004 г	2005 г	2006 г
Металлы и их соединения	0,297	2,548	214,124
Вещества в виде суспендированных твёрдых частиц	2703,938	9870,991	9714,719
Соединения азота	925,584	1187,113	1016,987
Диоксид и другие соединения серы	375,549	807,444	716,044
Оксид углерода	5695,416	8692,189	12249,700
Неметановые летучие органические соединения (НМЛОС)	-	6,220	5,800
Метан	-	7,893	6,874
Фтор и его соединения	0,475	0,428	0,517
Цианиды	-	0,031	0,052
Всего	9701,259	20574,857	23924,817

Таблица 6.7 Выбросы в атмосферу в городах области в1999г.

Наименование пункта	От стационарных источников	От автотранспорта
Днепропетровск	105,1	40,7
Кривой рог	425,0	28,9
Днепродзержинск	108,7	10,1
Новомосковск	0,3	3,4
Никополь	2,1	5,8
Марганец	0,6	2,0
Павлоград	3,1	3,3

В 2003 г по сравнению с 1999 г объёмы выбросов в атмосферу возросли до 115,5 тыс. т, а с учетом транспорта – до 150 тыс. т. При этом на одного жителя приходилось 108,4 кг/год. Среднегодовые концентрации пыли, аммиака, бенз(а)пирена, диоксида азота, формальдегида превышают ПДК в среднем в 2÷2,5 раза. Кроме высоких концентраций атмосферных выбросов, город имеет много дру-

гих экологических проблем. Около 40 предприятий сбрасывают свыше 670 млн.м^3/год сточных вод непосредственно в водные объекты, из них 210 млн.т/год – без очистки. Несмотря на то, что город расположен на берегах Днепра, остро стоит вопрос обеспечения жителей качественной питьевой водой в основном из-за недостаточно надежной работы очистных сооружений.

В городе и на близлежащих территориях находятся 26 накопителей промышленных отходов и три свалки бытовых отходов. Их площадь составляет около 340 га. Масса промышленных отходов по состоянию на начало 2004 г составила 39 млн. т. Кроме того, в городе накапливается ежегодно 1,5 млн. м^3 твёрдых отходов.

В последние 30 – 40 лет происходит интенсификация обводнения грунтовых вод на территории города в основном за счет увеличения водопотребления и инфильтрации воды из систем водоканализации. За эти годы водоносный горизонт повысился на 40 метров, и в отдельных местах расположен близко к поверхности или даже просачивается через эту поверхность. Подтопление во многих случаях становится причиной сдвигов и отвалов, особенно по кромке крутых балок. В 1997 г произошел катастрофический обвал на жилмассиве Тополь, при котором обрушился и ушел под землю 9-этажный дом, школа и другие сооружения.

В городе ежегодно возрастает интенсивность автомобильного движения, растет число автотранспортных средств, увеличиваясь на 50 – 60 тыс. единиц ежегодно. Строительство метрополитена, который мог бы разгрузить наземные транспортные потоки, после ввода первой очереди фактически приостановлено.

За промежуток времени между выходом в свет первого и второго изданий нашей работы экологическая ситуация в г. Днепропетровске, к сожалению, продолжала ухудшаться. Прежде всего, пополнился список предприятий и организаций, которые вносят весомый вклад в загрязнения окружающей среды. По-прежнему функционируют такие источники вредных выбросов в крупных объемах, как Приднепровская ТЭС, ОАО «Интертайп» - Нижнеднепровский трубопрокатный завод им. К. Либнехта, ОАО «Днепропетровский металлургический завод им. Коминтерна», ОАО «Днепропетровский металлургический завод им. Петровского», ОАО «Днепртяжмаш», ОАО «Днепрошина», ОАО «Днепрококс» и другие. На данный момент сюда необходимо добавить новые мощные аккумуляторные заводы «Иста» и «Веста», 7 заводов по произ-

водству асфальта, 6 обойных фабрик, мусоросжигающий завод, НВО завод «Приват-Кабель», ряд предприятий по металлургическому переплаву цветного метала и другие.

Возросло количество автомобилей на улицах города, сейчас их более 200 тысяч, сюда же нужно добавить еще 5 тысяч транзитных.

При этом появилась новая угроза – мощные поля электромагнитного излучения (ЭМИ). В городе установлено значительное число базовых станций сотовой связи – сейчас их свыше 3,5 тысяч. К этому следует добавить излучение от линий высоковольтных передач, опутавших жилую часть города сетью с общей длиной более 2 тыс. километров. Во многих местах города плотность потока ЭМИ в 5 – 10 раз превышает допустимую норму.

Естественно, электромагнитные излучения нельзя напрямую отнести к числу загрязнений атмосферы. Однако они являются элементом комплексного вредного воздействия на здоровье человека.

Атмосферу загрязняют коммунальные источники выбросов - неконтролируемые бытовые и строительные свалки, где часто в жилой зоне сжигается мусор. В большинстве случаев в нем содержится значительное количество пластиковых предметов (бутылки, пакеты и т.п.), при сгорании которых в атмосферу попадают многие ядовитые вещества, включая такие опасаные ингредиенты, как диоксины, полихлорированые бифинилы и фураны.

По-прежнему в городе много карантинной растительности, типа амброзии, насыщающей атмосферу сильными аллергенами. Таким образом , возникает проблема комбинированного, т.е. более опасного, загрязнения воздушной среды.

Здесь следует привести некоторые числовые показатели, характеризующие степень загрязнения городской атмосферы.

Согласно официальным данным Государственного управления охраны окружающей и естественной среды в Днепропетровской области в настоящее время в атмосферу города (с учетом транспорта) поступает несколько более 120 тыс. тонн вредных веществ в год. Однако, экологическая общественность считает эту цифру значительно заниженной (по крайней мере – в несколько раз).

Установлено, что на данный момент основные вредные ингредиенты в атмосфере города существенно превышают предельно-

допустимые концентрации (ПДК). Здесь можно привести такие данные:

– Пыль (педифференезированная по сосотаву) – 2,2 ПДК;
– бенз(а)пирен – 4,8 ПДК;
– диоксид азота – 2,2 ПДК;
– омиак – 1,5 ПДК;
– формадегиды – 2,3 ПДК;
– фенол – 1,2 ПДК.

Серьезную экономическую опасность для города представляют поступления в окружающую среду тяжелых металлов: свинца, ртути, цинка и других. Так в результате деятельности предприятий по производству и утилизации аккумуляторов в грунте и в атмосфере возникли значения концентрация свинца, превышающий ПДК в 5 – 6 раз.

Следует отметить, что в соответствии с решением областного совета (декабрь, 2007 г) Днепропетровск, Кривой Рог и некоторые другие области признаны зоной экологического бедствия. Основой для данного решения стало не только загрязнения внешней среды, но и его последствия , которые привели к значительному ухудшению здоровья жителей этих городов и повышенного показателей смертности. Согласно медицинской статистике Днепропетровск занимает ведущее место в Украине по темпам роста заболеваний дыхательных путей, туберкулеза и онкозаболеваний (довольно печальное первенство).

Приведенные факты говорят о том, что перед городской администрацией и областными органами стоят серьёзные задачи по обеспечению экологической безопасности жителей города и организации рационального природопользования в довольно сложной экологической обстановке. Основную работу в этом направлении осуществляет исполком и Управление по экологии Днепропетровского горсовета. Проблемами экологии города довольно продуктивно занимаются также другие государственные органы, научно-исследовательские и учебные заведения, медицинские учреждения, специализированные частные предприятия, отдельные службы на промышленных предприятиях, общественные организации, размещенные в городе. Это Управление экологии и природных ресурсов в Днепропетровской области; областная, городская и районные СЭС; Институт проблем природопользования и экологии НАН Украины; Институт экологии и безопасности жизнедеятельности в

строительстве (при академии строительства и архитектуры); практически все высшие учебные заведения города; Центр по гидрометеорологии и лаборатория наблюдения за загрязнениями атмосферного воздуха; некоторые проектные институты; ЗАО «Экоцентр», ООО «Экология» и другие организации. Исполком и управление по экологии разрабатывают и координируют выполнение оперативных и стратегических планов в данном направлении. Под их контролем на многих предприятиях осуществляются меры по сокращению вредных выбросов в окружающую среду, совершенствуется система водоочистки, реализуются природоохранные программы. Городской совет в 2002 г утвердил «Комплексную долгосрочную программу по оздоровлению окружающей среды и рационального использования природных ресурсов города Днепропетровска на 2002-2010 гг». Управление экологии выпустило в свет в 2000 г «Экологический паспорт города Днепропетровска» (второе издание), учёные ДНУ выдали в 1995 г «Экологический атлас Днепропетровской области», в городе регулярно выходит подготовленный горсоветом журнал «Экополис», издана монография «Экология мегаполиса», выходят другие профильные публикации, включая информацию для населения в местной печати, по радио и телевидению. В 2001 г. по заказу управления по экологии Институтом проблем природопользования и экологии НАН Украины была составлена экологическая карта г. Днепропетровска.

В целом экологическая ситуация в городе находится под контролем, хотя говорить о больших успехах в преодолении экологических проблем ещё нельзя. Причинами сложившихся трудностей являются сложная ситуация в экономике, недостаток средств, выделяемых для природоохранной деятельности, невнимание к проблеме со стороны руководства многих промышленных предприятий и достаточно низкий уровень экологического образования населения.

7 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

Книга природы написана на языке математики.

Галилео Галилей

Любая формула, включённая в книгу, уменьшает число её покупателей вдвое.

Стивен Хокинг

7.1 Физические основы

Атмосферный воздух пребывает в непрерывном движении, а вещества, которые в нем находятся, подвергаются сложным физико-химическим превращениям. Все эти явления подчиняются известным законам природы. Рассмотрим эти закономерности отдельно.

Закон сохранения массы в газовой или жидкой среде выражает тот факт, что изменение массы в каком-либо фиксированном объеме, ограниченном проницаемой поверхностью, равно разности масс, поступающих и вытекающих из него через эту поверхность. В механике сплошной среды этот закон называют законом неразрывности. Физически это означает, что если из какого-либо пространства воздушная масса уходит (например, при возникновении ветрового потока), то это пространство заполняется воздухом, пришедшим из окружающего пространства. При этом возникают замкнутые ячейки циркуляции. Если же рассмотреть какую-либо трубку тока с поперечным сечением F (м^2) и с непроницаемыми боковыми стенками, то, в соответствии с этим законом, секундный массовый расход $\dot{m}$ (кг/с) в каждом сечении этой трубки будет оставаться постоянным, т. е. $\dot{m} = \rho VF = const$. Здесь ρ (кг/м^3) есть плотность среды. Если газ состоит из отдельных компонент, включая сюда и вредные примеси, то закон сохранения массы может быть записан для каждой из этих компонент в отдельности. Уравнение сохранения массы, записанное в дифференциальном виде, называют уравнением неразрывности и записывают в виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \overline{v_j})}{\partial x_j} = 0; \; j = 1, 2, 3. \qquad (7.1)$$

x_1, x_2, x_3 – декартова система координат, v – скорость.

Закон сохранения количества движения для подвижной среды (газ, жидкость) является обобщением известного закона механики для твердого тела: произведение массы тела на ускорение равно сумме приложенных к нему сил. Для газовой частицы в атмосфере это уравнение выглядит следующим образом: произведение её массы на ускорение равно в общем случае сумме нескольких сил. К ним следует отнести:

- силу, обусловленную барическим градиентом (перепадом давления);
- силу тяжести;
- силу трения;
- центробежную силу, возникающую при движении по криволинейной траектории (циклон, антициклон);
- силу Кориолиса.

Последняя из них возникает в результате вращения Земли вокруг своей оси. В результате этого вращения атмосферная частица получает дополнительное ускорение относительно неподвижной точки, находящейся на поверхности Земли. Это ускорение ассоциируется с дополнительной силой. Уравнение сохранения количества движения, записывается в векторном виде или в виде проекций на оси координат. Уравнение движения обычно представляется в форме Эйлера (для невязкого потока) или в форме Навье-Стокса (при учете сил трения).

$$\rho\left(\frac{\partial \overline{v_i}}{\partial t}+\overline{v}_k\frac{\partial \overline{v_i}}{\partial x_k}\right)=\rho F_i+\frac{\partial p}{\partial x_k}+\frac{\partial}{\partial x_k}\left(\nu\frac{\partial \overline{v_i}}{\partial x_k}-\overline{v_i' v_k'}\right),\ i=1,2,3. \qquad (7.2)$$

По индексу k идет суммирование $k=1,2,3$.

Закон сохранения энергии. Формулируя этот закон, следует, прежде всего, отметить, что энергия подвижной частицы состоит из двух компонент: кинетической энергии, которая пропорциональна квадрату скорости её перемещения и внутренней энергии, которая определяется её температурой.

Исходя из этого, закон можно сформулировать таким образом: изменение полной энергии частицы определяется подведенным к ней количеством тепла и работой, выполненной над ней внешними силами. При этом тепло может быть подведено как извне (за счет теплопередачи через поверхность частицы), так и за счёт внутренних источников тепла (химическая реакция, конденсация и т.п.).

Исходя из сформулированных законов, можно назвать некоторые важные следствия. Одно из них состоит в том, что при ускорении частицы газа равном нулю (например, при постоянной скорости ветра) действие всех внешних сил уравновешивается, т.е. их геометрическая сумма равна нулю.

При подводе энергии в общем случае изменяются такие параметры частицы как её скорость $\bar{V}$, ускорение $d\bar{V}/dt$, давление p, плотность ρ, температура T и другие. Для описания процессов в газовой среде используются различные упрощенные термодинамические модели.

Модель совершенного газа, применяемая к воздушной среде, предполагает простую связь между названными выше параметрами:

$$p = \rho RT, \tag{7.3}$$

где R – газовая постоянная. Записанное соотношение называют уравнением состояния.

Адиабатическая модель предполагает, что термодинамические процессы внутри частицы (т.е. изменение p, ρ, T) происходят без энергообмена с внешней средой. Именно эта модель используется, когда речь идет об изменении температуры в приповерхностном слое атмосферы.

Для сухого воздуха связь между давлением и температурой в адиабатическом приближении задается уравнением:

$$\frac{p}{p_0} = (T/T_0)^n, \tag{7.4}$$

в котором n = 0,288. Индекс «0» обозначает фиксированное значение величин, например, параметры торможения. Отсюда следует, что с уменьшением температуры давление в частице газа также уменьшается (происходит расширение) и наоборот. Во влажном воздухе показатель n будет другим (влажная адиабата). В этом случае при том же давлении температура частицы будет больше.

Изменение агрегатного состояния. Вещества, находящиеся в атмосфере (в первую очередь, вода) могут изменять своё агрегатное состояние. Эти изменения включают: испарение, конденсацию, замерзание и таяние. При этом в процессе испарения и таяния тепло поглощается, а при конденсации и замерзании – выделяется. Названные процессы связаны со скоростью беспорядочного (теплово-

го) движения молекул. По мере нагревания, т. е. увеличения этой скорости, растет число столкновений между ними, повышается температура и вещество переходит последовательно из твердого состояния в жидкое, а затем – в газообразное. Конденсация водяных паров связана соотношением парциальных давлений, находящихся в смеси воздуха $p_в$ и водяного пара p_e. При этом суммарное давление равно:

$$p = p_в + p_e . \qquad (7.5)$$

Если p_e превышает некоторую величину p'_e, то происходит конденсация влаги и выделение тепла. Отношение p_e / p'_e, выраженное в процентах, называют степенью насыщения, или уровнем влажности. Степень насыщения зависит не только от абсолютного значения p_e, но и от температуры. Чем ниже температура, тем выше степень насыщения. Вот почему по мере поднятия частицы вверх давление и температура в ней падают, и в какой-то момент наступает полное насыщение, приводящее к конденсации. Окружающий воздух начинает от этого нагреваться и двигаться далее вверх. Такой процесс очень характерен для атмосферы над теплым океаном и часто является первой стадией рождения ураганов.

Турбулентность. Различают два режима движения газа в жидкости: ламинарный и турбулентный. Ламинарным называют устойчивое движение без перемешивания слоев. Турбулентное движение является неустойчивым и характеризуется наличием нерегулярных поперечных и продольных флуктуаций. Движение атмосферного воздуха практически всегда происходит в турбулентном режиме. Пульсирующий поток, проходящий через некоторую точку, можно представить в виде суперпозиции (наложения) различного размера и интенсивности вихрей. Крупные атмосферные вихри зарождаются на мезомасштабном уровне и обладают большой энергией. Они вызваны неравномерным нагревом земной поверхности. Эта энергия рассеивается затем в более мелких вихрях под влиянием вязкости среды. Активное турбулентное перемешивание в воздушной среде способствует передаче тепла и рассеиванию различных примесей в атмосфере. Для описания этих явлений вводятся понятия коэффициентов турбулентного переноса соответствующей субстанции (турбулентной диффузии).

Теплоёмкость. Под теплоемкостью среды понимают количество тепла, необходимое для нагревания единицы массы вещества

на один градус. Для газа оперируют с понятиями теплоемкостей при постоянном давлении c_p и при постоянном объеме c_v. В метеорологии понятие теплоёмкости различных участков земной поверхности (суши и моря) используются для анализа возникновения ветровых систем. Например, вода имеет более высокую теплоемкость, чем твердые земные породы. Поэтому она медленнее нагревается, медленнее остывает. Земная же поверхность прогревается (летом, днём) быстрее, чем море, а (зимой и ночью) она быстрее остывает и становится холоднее моря. Это приводит к изменению направления ветра. Приземный ветер, как было отмечено ранее, всегда направлен от более холодного участка земной поверхности к более тёплому.

Химические реакции. С химическими реакциями приходится иметь дело при рассмотрении процессов горения и других технологических процессов, при которых образуются вредные атмосферные выбросы. Кроме того, вещества, попадающие в атмосферу, могут также взаимодействовать между собой, образуя новые соединения.

При горении органического топлива происходит окисление углерода, водорода, серы, азота и других веществ. Окислы этих веществ, например, CO, SO_2, NO_2 , составляют основу примесей, поступающих в атмосферу. Более подробное их рассмотрение приводится в предыдущих разделах. Кроме реакций окисления (горения) в воздушной среде происходят десятки других реакций.

Диффузия. Под диффузией понимают распространение вещества в какой-то среде в направлении убывания его концентрации. Диффузия может происходить на молекулярном уровне, когда молекулы вещества в результате броуновского движения стремятся к равномерному распределению в среде. Диффузионный массоперенос пропорционален градиенту концентрации. Различают также турбулентную диффузию, происходящую за счет турбулентного перемешивания.

Полютанты и их концентрация. Как было отмечено ранее, чистый атмосферный воздух состоит в основном из азота и кислорода, а также некоторых других химических веществ, составляющих небольшую массовую долю. Среди них следует назвать, прежде всего пары воды и углекислый газ. Под воздействием природных явлений (вулканическая деятельность, лесные пожары и т. п.) и антропогенных факторов в атмосферу поступают чуждые ей вещест-

ва, получившие обобщенное название полютантов. В атмосферной среде они находятся в виде газов, жидких или твердых частичек, которые называют газоаэрозолями. Уровень загрязнения атмосферы обычно характеризуется их объёмной концентрацией, т. е. массой вредного вещества в единице объёма. Величина концентрации которая здесь и далее обозначена φ (мг/м^3), является главным искомым параметром при математическом моделировании процессов распространения загрязнений в природной среде. Процесс распространения загрязнений описывается математическими соотношениями, главным из которых является уравнение турбулентной диффузии. Его также называют уравнением переноса, поскольку турбулентная диффузия, в большинстве случаев, происходит на фоне ветрового потока, который перемещает в пространстве не только воздух, но и загрязняющие его вещества. В связи с этим употребляется термин «конвективная диффуия».

7.2 Основные уравнения конвективной диффузии

Под **конвективной диффузией** атмосферных загрязнений мы будем иметь ввиду процесс распространения загрязняющих примесей в атмосфере на основе механизмов конвекции (общее движение воздушных масс, то-есть ветер), и диффузии молекулярной или турбулентной (выравнивание уровня концентрации загрязнений в пространстве и времени).

Для теоретического описания и проведения расчетов конвективной диффузии атмосферных загрязнений необходимо построить математическую модель процесса, то-есть описать физический процесс конвективной диффузии с помощью системы математических уравнений, которые адекватно ее отображают. Это описание в общем случае может быть осуществлено с помощью хорошо известных в классической гидромеханике способов Эйлера и Лагранжа [94]. Выбор того или иного способа зависит от постановки задачи и цели, с которой проводятся расчеты. Способ Лагранжа описывания таких явлений приводит к широкому использованию результатов **статистической теории турбулентности** [103]. Способ Эйлера связан с использованием полуэмпирических теорий турбулентности для получения замкнутой системы уравнений математической модели конвективной диффузии [46].

В лагранжевом способе описания процесса конвективной диффузии наряду со средними скоростями переноса частичек воздуха и дисперсиями компонент скорости пульсации турбулентного движения, необходимо знать лагранжевые корреляционные функции этих компонент пульсационных скоростей, или их интегральных масштабов. Измерение этих характеристик в атмосфере – достаточно трудоемкий и сложный процесс. Эйлеровы характеристики измерения значительно проще. Поэтому **на практике**, при описании атмосферной диффузии, предпочтение отдается способу Эйлера, в частности – для моделирования диффузии в атмосфере больших городов.

В дальнейшем при построении математической модели конвективной диффузии атмосферных загрязнений будем использовать способ Эйлера. Как отмечалось ранее, характер движения воздушных течений в нижних слоях атмосферы существенно турбулентный. Частички воздуха движутся неупорядочено, хаотически, их скорости постоянно подвержены пульсациям разной величины, то-есть.

$$\vec{V} = \vec{\bar{V}} + \vec{V}', \tag{7.6}$$

где $\vec{\bar{V}}$ – вектор осредненной за некоторый промежуток времени Δt, мгновенной скорости движения частички $\vec{V}$; $\vec{V}'$ – вектор пульсационной скорости.

Осреднение по времени происходит следующим образом:

$$\vec{\bar{V}} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t}^{t+\Delta t} \vec{V} dt, \tag{7.7}$$

Аналогичные пульсации присущи и другим величинам, которые характеризуют состояние турбулентной атмосферы: давлению p, температуре T, плотность ρ, влажности υ.

Во всех математических моделях турбулентной атмосферы при использовании способа Эйлера, поля скорости движения воздушных масс, поля их давления, температуры, плотности, влажности, определяются как **осредненные поля** ($\vec{\bar{V}}$, $\bar{p}$, $\bar{T}$, $\bar{\rho}$, $\bar{\upsilon}$); а влияние пульсационных полей соответствующих величин определяется и учитывается путем **существенного** увеличения импульса (турбулентное трение), теплопроводности (турбулентная теплопроводности) и турбулентной влажности среды, для описания которых ис-

пользуются полуэмпирические теории турбулентности. С их помощью и замыкается система математических уравнений.

Движение газовой частички в атмосфере происходит под дейсвием нескольких сил:

1) Сила барического градиента

$$\vec{F}_p = -(grad\bar{p}) \cdot \Omega_m \tag{7.8}$$

где вектор-градиент давления берется со знаком «минус», так как направление этого вектора противоположной направлению вектора ускорения частички $d\vec{V}/dt$ (частичка движется в сторону уменьшения давления); Ω_m – объем газовой частички.

Отметим, что здесь и в дальнейшем под скоростью турбулентного движения атмосферных воздушных масс $\vec{V}$ мы будем иметь в виду ее осредненное значение $\bar{\vec{V}}$, отбросив для упрощения записи обозначение «черточка». Это же относится ко всем остальным величинам: давлению p, температуре T, плотности ρ, влажности υ.

2) Сила тяжести

$$\vec{F}_g = m \cdot \vec{g}, \tag{7.9}$$

пропорциональна ускорению земного притяжения $\vec{g}$; m – масса движущейся частички газа.

3) Центробежная сила

$$\vec{F}_c = m\frac{V^2}{r} \tag{7.10}$$

возникает при движении частички по криволинейной траектории, она прямо пропорциональна квадрату скорости движения и обратно пропорциональна радиусу кривизны траектории r.

4) Сила трения $\vec{F}_{тр}$, возникает только в движущемся газе, она обусловлена изменяемым количеством движения (импульсом) при переходе частички с одной линии тока на другую и зависит от величины касательного напряжения трения

$$\vec{\tau} = \left(\mu + \mu^T\right)\frac{d\vec{V}}{dn}, \tag{7.11}$$

Оно пропорционально изменению скорости по нормали к линии тока $d\vec{V}/dn$.

Тут μ, μ^T – молекулярный и турбулентный динамические коэффициенты вязкости (коэффициенты обмена импульса). Во время

движения газа вдоль земной поверхности происходит замедление скорости этого движения, обусловленное как раз влиянием силы трения.

5) Сила Кориолиса

$$\vec{F}_к = m \cdot \left[\vec{V} \times 2\vec{\omega}\right], \tag{7.12}$$

где $\vec{\omega}$ – угловая скорость вращения Земли. Сила Кориолиса, или отклоняющая сила вращения Земли изменяет направление движения частички воздуха, если за ней наблюдать с поверхности планеты. Эта сила имеет максимум на полюсах и превращается в ноль на экваторе. В нижних слоях атмосферы сила Кориолиса значительно меньше, чем сила трения и ее влиянием во многих случаях можно пренебречь, но в верхних слоях она значительно больше чем сила трения.

Таким образом, в соответствии со вторым законом Ньютона, уравнение движения атмосферной частички массой m в общем случае можно записать в виде:

$$m\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F}_p + \vec{F}_g + \vec{F}_c + \vec{F}_к + \vec{F}_{тр}, \tag{7.13}$$

или, считая, что объем частички равен единице, – в виде:

$$\rho\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F}_p + \vec{F}_g + \vec{F}_c + \vec{F}_к + \vec{F}_{тр} \tag{7.14}$$

Следует отметить, что из пяти сил, которые действуют на частичку, причиной ее движения служат только две – сила барического градиента $\vec{F}_p$, и сила тяжести $\vec{F}_g$, а центробежная сила, сила Кориолиса и сила трения – искривляют или тормозят это движение. Центробежную силу $\vec{F}_c$ обычно учитывают лишь в задачах, которые связаны с описанием циклонов и антициклонов, в других случаях она несущественна.

Если ввести в рассмотрение декартову прямоугольную правую систему координат $Oxyz$, с центром в точке O на поверхности Земли, расположением осей Ox и Oy в плоскости земной поверхности и с осью Oz, которая сориентирована вертикально вверх, то вектор скорости ветра $\vec{V}(x,\ y,\ z,\ t)$ можно представить в виде:

$$\vec{V} = u(x,y,z,t)\cdot\vec{i} + v(x,y,z,t)\cdot\vec{j} + w(x,y,z,t)\cdot\vec{k}\ , \tag{7.15}$$

где u, v, w – компоненты скорости ветра на осях координат $Oxyz$; $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – орты системы координат, t – время.

Сила тяжести $\vec{F}_g$ в этом случае задастся в виде:

$$\vec{F}_g = -\rho\vec{g}\cdot\vec{k} = -\gamma\vec{k}\ , \tag{7.16}$$

где $g = 9{,}81$ (м/сек^2) – ускорение земного притяжения; $\gamma = \rho\cdot g$ – дельный вес воздуха.

Сила Кориолиса записывается так:

$$\vec{F}_к = \left[(f\cdot v)\cdot\vec{i} - (f_1\cdot w + f\cdot u)\cdot\vec{j} + (f_1\cdot v)\cdot\vec{k}\right]\cdot\rho, \tag{7.17}$$

где $f = 2\omega_0\cdot\sin\varphi$; $f_1 = 2\omega_0\cdot\cos\varphi$; $\omega_0 = 2\pi/86164$ (1/сек); φ – географическая широта, на которой находится рассмотренная точка ($\varphi = 0$ на экваторе, $\varphi = 90^\circ$ на полюсе).

Из гидромеханики [94] известно, что, если коэффициенты динамической вязкости μ, μ^T считать постоянными величинами, то силу трения $\vec{F}_{тр}$ можно представить в виде:

$$\vec{F}_{тр} = \left(\mu + \mu^T\right)\cdot\left(\nabla^2 u\cdot\vec{i} + \nabla^2 v\cdot\vec{j} + \nabla^2 w\cdot\vec{k}\right), \tag{7.18}$$

где $\nabla^2 = \dfrac{\partial^2}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2}{\partial y^2} + \dfrac{\partial^2}{\partial z^2}$ – дифференциальный оператор Лапласа.

Однако, в теории атмосферных течений [103] коэффициент турбулентной вязкости μ^T не является постоянной величиной. В общем виде динамический коэффициент турбулентной вязкости является функцией координат, времени, и зависит от состояния атмосферы. Тогда сила трения записывается в виде:

$$\begin{aligned}
\vec{F}_{тр} &= \left\{\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\mu+\mu^T\right)\frac{\partial u}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\left(\mu+\mu^T\right)\frac{\partial u}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\mu+\mu^T\right)\frac{\partial u}{\partial z}\right]\right\}\cdot\vec{i} + \\
&+ \left\{\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\mu+\mu^T\right)\frac{\partial v}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\left(\mu+\mu^T\right)\frac{\partial v}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\mu+\mu^T\right)\frac{\partial v}{\partial z}\right]\right\}\cdot\vec{j} + \\
&+ \left\{\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\mu+\mu^T\right)\frac{\partial w}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\left(\mu+\mu^T\right)\frac{\partial w}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\mu+\mu^T\right)\frac{\partial w}{\partial z}\right]\right\}\cdot\vec{k} = \\
&= \left[\nabla_u^2(u)\right]\cdot\vec{i} + \left[\nabla_v^2(v)\right]\cdot\vec{j} + \left[\nabla_w^2(w)\right]\cdot\vec{k},
\end{aligned} \tag{7.19}$$

где $\Delta_\alpha^2(\alpha)$ – дифференциальный оператор вида:

$$\begin{gathered}
\nabla_\alpha^2(\alpha) = \frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\mu+\mu^T\right)\frac{\partial\alpha}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\left(\mu+\mu^T\right)\frac{\partial\alpha}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\mu+\mu^T\right)\frac{\partial\alpha}{\partial z}\right], \\
\alpha = (u, v, w).
\end{gathered} \tag{7.20}$$

Пренебрегая центробежной силой $\vec{F}_c$, как силой, которая имеет ограниченное применение, векторное уравнение (7.14) запишем в проекциях на оси декартовой системы координат в виде:

$$\begin{cases} \dfrac{du}{dt} = -\dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial p}{\partial x} + fv + \dfrac{1}{\rho}\nabla_u^2(u); \\ \dfrac{dv}{dt} = -\dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial p}{\partial y} - (f_1 \cdot w + f \cdot u) + \dfrac{1}{\rho}\nabla_v^2(v); \\ \dfrac{dw}{dt} = -\dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial p}{\partial z} + f_1 v - g + \dfrac{1}{\rho}\nabla_w^2(w). \end{cases} \tag{7.21}$$

К системе уравнений (7.21) необходимо добавить уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) \tag{7.22}$$

и уравнение состояния среды (уравнение состояния идеального газа)

$$p = \rho RT \ , \tag{7.23}$$

где R – газовая постоянная.

На характер атмосферных процессов значительное влияние оказывает температура воздуха. От того, как распределена температура воздуха в атмосфере, то-есть, от атмосферного температурного поля зависит скорость и направление ветра, атмосферное давление, характер протекания физических (испарение и конденсация жидкости) и химических процессов. Используя закон сохранения энергии [94], можно получить уравнение баланса тепла в атмосфере в виде:

$$\rho \cdot C_p \frac{dT}{dt} = \rho L^* \cdot \Phi + Q_r + \nabla_T^2(T) + \dot{Q}_T \, , \tag{7.24}$$

где C_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении; L^* – скрытое удельное тепло испарения (парообразования) или конденсации; Φ – скорость образования жидкой фазы; Q_r – радиационное слагаемое притока тепла; $\dot{Q}_T$ – приток тепла, которое происходит за счет внутренних источников (стоков);

$$\nabla_T^2(T) = \frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\lambda + \lambda^T\right)\frac{\partial T}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\left(\lambda + \lambda^T\right)\frac{\partial T}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\lambda + \lambda^T\right)\frac{\partial T}{\partial z}\right], \tag{7.25}$$

λ, λ^T – молекулярный и турбулентный коэффициенты теплопроводности (коэффициенты молекулярного и турбулентного обмена тепла).

В воздухе, даже в жаркую погоду удерживается значительное количество влаги, постоянно происходят процессы парообразова-

ния и конденсации, выпадают осадки. По этим причинам определение распределенной влажности (поля влажности) в атмосфере является одним из важнейших заданий метеорологии и экологии. Используя закон сохранения массы влажности, можно получить уравнение баланса влаги в атмосфере в виде:

$$\rho \frac{d\upsilon}{dt} = -\rho \cdot \Phi + \nabla_{\upsilon}^{2}(\upsilon) + \dot{Q}_{\upsilon}, \tag{7.26}$$

где υ – удельная (на единицу массы) влажность воздуха; $\dot{Q}_{\upsilon}$ – приток влажности за счет внутренних источников (стоков).

$$\nabla_{\upsilon}^{2}(\upsilon) = \frac{\partial}{\partial x}\left[\left(D_{\upsilon} + D_{\upsilon}^{T}\right)\frac{\partial \upsilon}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\left(D_{\upsilon} + D_{\upsilon}^{T}\right)\frac{\partial \upsilon}{\partial y}\right] + \\ + \frac{\partial}{\partial z}\left[\left(D_{\upsilon} + D_{\upsilon}^{T}\right)\frac{\partial \upsilon}{\partial z}\right]. \tag{7.27}$$

где D_{υ}, D_{υ}^{T} – молекулярный и турбулентный коэффициенты диффузии влажности (коэффициенты молекулярного и турбулентного обмена влажности).

Мы получили систему уравнений турбулентной атмосферы (7.21) – (7.27). В ней остаются неизвестными коэффициенты турбулентного обмена количества движения, тепла и влажности – μ^{T}, λ^{T}, D_{υ}^{T}. Как указывалось ранее, при Эйлеровом описании процессов в турбулентной атмосфере для замыкания системы уравнений (7.21) – (7.27) используются полуэмпирические модели разного уровня сложности [94, 84]. Вообще, таких моделей много, но на практике наиболее часто используют самые простые из них – модель пути смешения Прандтля, которая базируется на понятии турбулентной вязкости и турбулентной теплопроводности, внедренных Буссинеском.

В модели пути смешения Прандтля предусмотрено предполагают линейную зависимость коэффициента турбулентности вязкости μ^{T} от градиента осредненного течения над поверхностью $z = 0$. Для однонаправленного течения она имеет вид:

$$\mu^{T} = \rho \cdot l^{2} \cdot \left|\frac{\partial u}{\partial z}\right|, \quad l = \aleph \cdot z, \tag{7.28}$$

где $\aleph = 0{,}4$ – постоянная Кармана, l – длина пути смешивания.

Но, согласно [94]

$$\left|\frac{\partial u}{\partial z}\right| = \frac{u^*}{\aleph \cdot z} \tag{7.29}$$

где $u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ – скорость сдвига, или скорость трения. Тогда

$$\mu^T = \rho \cdot \aleph \cdot u^* \cdot z. \tag{7.30}$$

Значение величины u^* как правило изменяется в пределах

$$u^* = (0{,}2 \div 0{,}8) \text{ (м/сек).}$$

Что касается коэффициентов турбулентной теплопроводности λ^T и турбулентной диффузии влажности D_υ^T, то они считаются пропорциональными коэффициенту турбулентной вязкости μ^T

$$\lambda^T = D_\upsilon^T = \frac{\mu^T}{\Pr^T}, \qquad \Pr^T = \frac{\mu^T C_p}{\lambda^T}, \tag{7.31}$$

где $\Pr^T$ – турбулентное число Прандтля.

Для течения стратифицированной атмосферы длина пути смешения l зависит от характера температурной стратификации [84].

$$\begin{gathered} l = l_0 \cdot (1 - \beta_1 \cdot R_i); \\ l = l_0 \cdot (1 - \beta_2 \cdot R_i)^{-0{,}25}, \;\; l_0 = \aleph \cdot z, \end{gathered} \tag{7.32}$$

где β_1, β_2 – константы, R_i – параметр Ричардсона, который характеризует состояние атмосферы (устойчивое, неустойчивое и нейтральное).

Соотношение (7.30), (7.31), (7.32) замыкают систему уравнений (7.21) – (7.27). Для решения этой системы необходимо задать исходные и граничные условия.

Начальные условия связаны с тем, что в момент времени $t = 0$, задано начальные профили всех искомых величин:

$$u = u_0(x, y, z);\ v = v_0(x, y, z);$$
$$w = w_0(x, y, z);\ p = p_0(x, y, z);$$
$$T = T_0(x, y, z);\ \upsilon = \upsilon_0(x, y, z); \qquad (7.33)$$
$$\rho = \rho_0(x, y, z), \quad \text{при } t = 0.$$

Граничные условия при решении конкретных задач могут быть разными. Существенное влияние на определение граничных условий имеет рельефная, температурная и влажностная неоднородность подстилающей поверхности Земли. Наличие на поверхности глубоких впадин, высоких холмов и горных массивов значительно усложняют постановку и решение конкретных задач. Если решаются задачи, связанные с атмосферой большого города, то необходимо учесть, что на территории города могут быть расположены участки поверхности с повышенной температурой и влажностью (теплотрассы, промышленные предприятия, ТЭЦ, искусственные и природные водоемы). Все это усложняет установление конкретных граничных условий, требует привлечения экспериментальных данных.

Но во многих практически важных случаях можно считать, что далеко от городской территории, при $x^2 + y^2 \to \infty$, подстилающая поверхность **относительно однородная** и это приводит к выравниванию искомых величин, в отдельности, по горизонтальным координатам, то-есть:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial \upsilon}{\partial x} = 0,$$
$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial \upsilon}{\partial y} = 0 \qquad (7.34)$$
$$\text{при } x^2 + y^2 \to \infty.$$

При $z \to \infty$, необходимо учитывать тот факт, что на высотах более z~(1,0÷1,5) км начинается зона геострофического ветра, который возникает под действием силы барического градиента $\vec{F}_p$ и силы Кориолиса $\vec{F}_k$. Поэтому на верхней границе области решения задачи необходимо задавать условия, которые соответствуют зоне геострофического ветра:

$$u = u_g(x, y, t); \quad v = v_g(x, y, t); \quad w = 0; \quad P = P_g(x, y, t);$$
$$\rho = \rho_g(x, y, t);\ T = T_g(x, y, t);\ \upsilon = \upsilon_g(x, y, t) \text{ при } z \to \infty, \qquad (7.35)$$

Здесь индексом «g» обозначены искомые физические величины в зоне гестрографического ветра. Иногда для компонент скорости ветра используется условие

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad \text{при} \, z \to \infty. \tag{7.36}$$

На поверхности земли граничные условия ставятся не при $z = 0$, а при $z = z_0 \neq 0$, где z_0 – высота шероховатости поверхности, которая в разных случаях может быть разной и зависеть от характера растительного покрова и величины городских построек.

Для компонент скорости имеем:

$$u = v = w = 0 \text{ при } z = z_0, \tag{7.37}$$

а для температуры и влажности – условия теплового баланса и баланса влажности:

$$\begin{cases} \Phi_\Gamma - C_p \cdot \left(\dfrac{\mu^T}{\Pr^T} \cdot \dfrac{\partial T}{\partial z} \right) - L^* \cdot \left(\dfrac{\mu^T}{\Pr^T} \cdot \dfrac{\partial \upsilon}{\partial z} \right) = \overline{R} + \dot{I}_T \quad , \\ \upsilon = \eta_0 \cdot \left[\dfrac{0{,}622 \cdot E_0(T_0)}{p_0} \right] + \dot{I}_\upsilon \quad \text{при } z = z_0 \quad , \end{cases} \tag{7.38}$$

где Φ_Γ – притекания (приток) тепла в грунте; $\overline{R}$ – радиационный баланс поверхностной структуры (баланс поглощения и отражения солнечного излучения); η_0 – относительная влажность на поверхности грунта (эмпирический коэффициент); T_0, p_0 – температура и давление при $z = z_0$; $E_0(T_0)$ – мощность насыщения водного пара при температуре T_0 и давлении p_0; $\dot{I}_T$, $\dot{I}_\upsilon$ – потоки тепла и влажности от искусственных источников на поверхности грунта. Отметим, что на поверхности природных или искусственных водоемов $\eta_0 = 1$, $\dot{I}_\upsilon = 0$.

Система нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных (7.21) – (7.27), где

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u\frac{\partial}{\partial x} + v\frac{\partial}{\partial y} + w\frac{\partial}{\partial z} \quad ,$$

вместе с соотношениями (7.30) – (7.32), начальными и граничными условиями (7.33) – (7.38) представляют собой математическую модель движения воздушных масс в турбулентной атмосфере, то-есть на тех высотах, где фактор турбулентности значительный и заметным оказывается влияние подстилающей поверхности Земли. Эта

зона высотой H ~(1,0÷1,5) км называется **пограничным слоем атмосферы Земли**. Выше начинается зона геострофического ветра и крупномасштабных вихревых течений, где указанная математическая модель не срабатывает. Во многих практически важных случаях систему (7.21) – (7.27) можно существенно упростить. В действительности, если считать, что рельеф поверхности является относительно однородным (без заметных впадин и возвышенностей), то течение в пограничном слое атмосферы будет подобным течению в пограничном слое при обтекании тела [94], и тогда вертикальные градиенты скорости, температуры и влажности будут заметно превышать горизонтальные, то-есть

$$\frac{\partial}{\partial z}(\ ) > \left[\frac{\partial}{\partial x}(\ ); \frac{\partial}{\partial y}(\ )\right],$$

а вертикальная диффузия будет большей, чем горизонтальной

$$\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\mu + \mu^T\right)\frac{\partial}{\partial z}\right] > \left\{\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\mu + \mu^T\right)\frac{\partial}{\partial x}\right]; \frac{\partial}{\partial y}\left[\left(\mu + \mu^T\right)\frac{\partial}{\partial y}\right]\right\},$$

Вертикальная составляющая скорости w – будет значительно меньше чем горизонтальные составляющие

$$w << u; w << v \ .$$

Если при этом считать, что плотность воздуха в пограничном слое атмосферы мало изменяется в зависимости от высоты, а скорости ветра значительно меньше скорости звука, и температурные перепады умеренные, то, плотность воздуха в этом слое можно считать величиной постоянной, то-есть

$$\rho \approx \rho_{cp} = const,$$

Молекулярной вязкостью μ, радиационным притоком тепла Q_r, притоком тепла от фазовых превращений и влиянием силы Кориолиса на вертикальные потоки воздуха в расчетах, как правило, пренебрегают, то-есть считают, что

$$\mu = Q_r = \Phi = f_1 = 0,$$

В этом случае система уравнений пограничного слоя атмосферы (7.21) – (7.27) принимает вид:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u}{\partial t}+u\dfrac{\partial u}{\partial x}+v\dfrac{\partial u}{\partial y}+w\dfrac{\partial u}{\partial z}=-\dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial P}{\partial x}+f\cdot v+\dfrac{\partial}{\partial z}\left(\nu^T\cdot\dfrac{\partial u}{\partial z}\right), \\ \dfrac{\partial v}{\partial t}+u\dfrac{\partial v}{\partial x}+v\dfrac{\partial v}{\partial y}+w\dfrac{\partial v}{\partial z}=-\dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial P}{\partial y}-f\cdot u+\dfrac{\partial}{\partial z}\left(\nu^T\cdot\dfrac{\partial v}{\partial z}\right), \\ \dfrac{\partial p}{\partial z}=-\rho\cdot g\ , \\ \dfrac{\partial u}{\partial x}+\dfrac{\partial v}{\partial y}+\dfrac{\partial w}{\partial z}=0, \\ \dfrac{\partial T}{\partial t}+u\dfrac{\partial T}{\partial x}+v\dfrac{\partial T}{\partial y}+w\dfrac{\partial T}{\partial z}=\dfrac{\partial}{\partial z}\left(\dfrac{\nu^T}{\mathrm{Pr}^T}\cdot\dfrac{\partial T}{\partial z}\right)+\dfrac{\dot{Q}_T}{\rho C_p}\ , \\ \dfrac{\partial \upsilon}{\partial t}+u\dfrac{\partial \upsilon}{\partial x}+v\dfrac{\partial \upsilon}{\partial y}+w\dfrac{\partial \upsilon}{\partial z}=\dfrac{\partial}{\partial z}\left(\dfrac{\nu^T}{\mathrm{Pr}^T}\cdot\dfrac{\partial \upsilon}{\partial z}\right)+\dfrac{\dot{Q}_\upsilon}{\rho}, \end{cases} \tag{7.39}$$

где ν^T – кинематический коэффициент турбулентной вязкости.

В пограничном слое атмосферы выделяют нижний **приземный слой** высотой $0\le h\le$ (50 – 100) м, который характеризуется стабильностью вертикальных потоков количества движения, тепла и влажности

$$\nu^T\cdot\frac{\partial u}{\partial z}=u_*^2=const,$$

$$\frac{\nu^T}{\mathrm{Pr}^T}\cdot\frac{\partial T}{\partial z}=const,$$

$$\frac{\nu^T}{\mathrm{Pr}^T}\cdot\frac{\partial \upsilon}{\partial z}=const,$$

Происходит такое резкое изменение профилей скорости, температуры и влажности с изменением высоты. Исследованиями установлено, что коэффициент турбулентной вязкости $\nu^T(z)$ линейно изменяется по высоте именно в пределах приземного слоя $0\le z\le h$, а при $z>h$ он почти не изменяется, и в расчетах его можно принять равным:

$$\nu^T(z)=\begin{cases}\aleph\cdot u^*\cdot z, & \text{при} \quad 0\le z\le h;\\ \aleph\cdot u^*\cdot h, & \qquad\quad z>h\end{cases}. \tag{7.40}$$

Численные интегрирования систем уравнений (7.21) – (7.27) или (7.39), при начальных и граничных условиях (7.33) – (7.38), со-

вместимо с соотношениями (7.30) – (7.32), (7.40) дает возможность определить поле скоростей ветра, поле температур и поле влажности в пограничном слое турбулентной атмосферы. Предположим, что в некоторой точке $M_0(x_0, y_0 z_0)$ находится источник выбросов загрязняющей примеси с интенсивностью q (кг/сек) или q (м^3/сек), например заводская труба. Загрязняющая примесь, которая попала в атмосферу, распространяется в пространстве конвективно вдоль траектории частичек воздуха под действием ветра, а также диффузионно, под действием механизмов молекулярной и турбулентной диффузии. В атмосфере частички примеси могут вступать в физико-химические превращения и трансформации со скоростью σ (1/сек). Обозначим через φ (кг/м^3) объемную концентрацию примеси в атмосфере. Тогда, согласно с [97], дифференциальное уравнение, которое описывает процесс переноса и диффузии примеси в турбулентной атмосфере в общем случае имеет вид

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} + u\frac{\partial\varphi}{\partial x} + v\frac{\partial\varphi}{\partial y} + \left(w - w_g\right)\frac{\partial\varphi}{\partial z} =$$
$$= \frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_x^T \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_y^T \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_z^T \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial z}\right) - \sigma\cdot\varphi + q^* , \qquad (7.41)$$

де ν_x^T, ν_y^T – горизонтальные, а ν_z^T – вертикальный кинематический коэффициент турбулентной диффузии; w_g – скорость оседания тяжелой примеси (например, пыли) под действием силы гравитации (для легкой аэрозольной примеси w_g = 0). Отметим, что концентрация загрязняющее примеси $\varphi(x, y, z, t)$ в турбулентном потоке воздуха – это осредненная величина с смысле (7.7); q^* (кг/м^{3}сек) – суммарные притекания массы примеси за счет действия всех источников загрязнения.

Если поле скоростей ветра $\vec{V} = (u, v, w)$ известно, то уравнение (7.41) представляет собой линейное дифференциальное уравнение второго порядка параболического типа. Для интегрирования этого уравнения необходимо задать начальные и граничные условия.

Начальное (исходное) условие в момент времени $t = 0$ задается в виде начального пространственного распределения концентрации:

$$\varphi = \varphi_0(x, y, z), \text{ при } t = 0 \ . \qquad (7.42)$$

Граничные условия должны задаваться так, что бы решение краевой задачи было единственным. Согласно [97], этому требованию удовлетворяют следующие условия

$$\begin{cases} \varphi = \varphi_s, \\ \dfrac{\partial \varphi}{\partial n} = 0, \end{cases} \quad \text{на } \Gamma \begin{matrix} V_n < 0; \\ V_n \geq 0; \end{matrix} \tag{7.43}$$

$\dfrac{\partial \varphi}{\partial z} = \alpha \cdot \varphi$ при $z = z_0$, – уравнение шероховатости;

$\dfrac{\partial \varphi}{\partial z} = 0$ при $z = H$; $\varphi = 0$ (для весомой примеси);

здесь Γ – боковая граница замкнутой пространственной зоны распространения примеси; $\vec{n}$ – вектор единичной внешней нормали к границе Γ; V_n – перпендикулярная к границе Γ составляющая скорости ветра, $\alpha = \lambda / \nu_z^T$; λ (м/сек) – скорость поглощения примеси подстилающей поверхностью Земли; $z = H$ – верхняя граница слоя распространения примеси.

Для многих задач можно взять $H = \infty$.В случае неограниченной в плане области переноса примеси (отсутствие границы Γ) как граничное условие можно взять

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0 \quad \text{при } x^2 + y^2 \to \infty. \tag{7.43*}$$

Коэффициенты турбулентной диффузии $\nu_x^T, \nu_y^T, \nu_z^T$, которые входят в уравнение (7.41) определяются с помощью эмпирических моделей разного типа. Согласно [46, 84], в приземном слое $z \leq h$ можно высчитать эти коэффициенты по формулам:

$$\nu_x^T = \nu_y^T = K_0 \cdot u(x, y, z, t); \; \nu_z^T = K_1 \cdot \left(\frac{z}{z_1} \right)^P, \tag{7.44}$$

где $K_0 = 0{,}1...1{,}0$ (м); $K_1 = (0{,}1 \div 0{,}2)$ (м^2/сек); $P = (0{,}8 \div 1{,}2)$, в зависимости от устойчивости атмосферы: $z_1 = 1$ м. выше чем в приземном слое можно принять

$$\nu_x^T = \nu_y^T = \nu_z^T = K_1 \cdot \left(\frac{h}{z_1} \right)^P \tag{7.45}$$

Местоположение источника выбросов загрязнений и характер их расположения в пространстве могут быть достаточно разнообразными. Классифицируют точечные источники (заводские трубы) с интенсивностью выбросов q (кг/сек), линейные источники (авто-

трассы) с интенсивностью q_l (кг/м·сек) и плоскостные источники (мусорные свалки, территории предприятий) с интенсивностью q_s (кг/м^2 сек). В общей математической модели конвективной диффузии атмосферных загрязнений все виды точечных выбросов заменяются системой в виде дельта функций Дирака $\delta(\vec{r}-\vec{r}_0)$ где $\vec{r}$ – радиус-вектор поточной точки пространства, $\vec{r}_0$ – радиус-вектор точки местонахождения источника выброса. Так что, в общем случае при наличии большого количества источников загрязнений интенсивностью q_i , в уравнении (70) имеем:

$$q^* = \sum_{i=1}^{N} q_i(t)\cdot\delta(\vec{r}-\vec{r}_i(t)). \qquad (7.46)$$

В отдельных случаях удобно использовать уравнение конвективной диффузии в упрощенной постановке, то-есть без учета температурных полей и уровня влажности атмосферы.

В равновесной воздушной среде выполняются условия термодинамического равновесия:

- отсутствуют макроскопические движения;
- температура T и давление p постоянны.

Будем считать, что нарушение равновесия в среде связано с изменением концентрации от точки к точке и с наличием в ней макроскопического (конвективного) движения. Предполагаем температуру смеси постоянной, а градиент давления достаточно малым.

Таким образом, перенос вещества в движущейся среде будет обусловлен лишь двумя различными механизмами. Во-первых, взвешенные газоаэрозольные частицы увлекаются средой и переносятся вместе с ней; во-вторых, при наличии разности концентраций в среде возникает молекулярная и турбулентная диффузия. Совокупность обоих процессов называют конвективной диффузией вещества в рассматриваемой воздушной или жидкой среде.

Макроскопическое движение смеси описывается уравнениями неразрывности и количества движения.

Выведем дифференциальное уравнение, описывающее диффузионный перенос вещества в стационарно и ламинарно движущейся несжимаемой среде.

Рассмотрим изотропное пространство, в котором концентрация вещества в момент времени t определяется выражением

$$\varphi(x, y, z, t) = f(x, y, z, t). \tag{7.47}$$

В рассматриваемом пространстве можно провести некоторые воображаемые поверхности, в каждой точке которых в момент времени t концентрация постоянна. Такие поверхности называют изоплетами. Основная гипотеза математической теории диффузии состоит в том, что диффузионный поток вещества через единицу площади изоплеты в единицу времени изнутри наружу, равен:

$$\vec{J}_d = -D\frac{\partial\varphi}{\partial n} = -D\,grad\varphi = -D\frac{\partial\varphi}{\partial x_k}, \tag{7.48}$$

где D – коэффициент молекулярной диффузии, зависящий в общем случае от концентрации φ и температуры T; $\vec{n}$ – внешняя нормаль к поверхности. Знак минус указывает, что поток вещества направлен в сторону уменьшения концентрации вещества.

Если взвешенное вещество находится в движущейся со скоростью $\vec{V}$ среде, то последняя увлекает его в своем движении. Наряду с диффузионным, при этом возникает конвективный поток (масса вещества, переносимого средой через единицу площади в единицу времени): $\vec{J}_k = \varphi\vec{V}$. Полный поток вещества представляет собой сумму конвективного и диффузионного потоков:

$$\vec{J} = \vec{J}_k + \vec{J}_d = \vec{V}\varphi - D\,grad\varphi. \tag{7.49}$$

Выделим в рассматриваемой сплошной среде произвольный объем W, ограниченный поверхностью S. Тогда масса вещества, проходящего в единицу времени через поверхность S, равна

$$-\iint_S \vec{J}dS. \tag{7.50}$$

Изменение массы вещества в объеме W за единицу времени равно

$$\iiint_W \frac{\partial\varphi}{\partial t}dW. \tag{7.51}$$

Пусть в рассматриваемом объеме находится источник (или сток) вещества. Обозначим через Q (мг/с) мощность источника (т. е. массу вещества, появляющегося в данном объеме за одну секунду), тогда приток вещества в рассматриваемый объем в единицу времени от источника равен

$$\iiint\limits_W QdW\,. \tag{7.52}$$

Если вещество исчезает, тогда Q отрицательно. Необходимо подчеркнуть объемный характер величины Q. Исчезающие или возникающие на граничной поверхности частицы учитываются только граничными условиями.

Тогда, исходя из закона сохранения, изменение массы вещества в объеме W в единицу времени равно сумме массы вещества, проходящей через поверхность, ограничивающую данный объем, и притока вещества от источника:

$$\iiint\limits_W \frac{\partial\varphi}{\partial t}dW = -\iint\limits_S \vec{J}dS + \iiint\limits_W QdW\,. \tag{7.53}$$

Преобразуя поверхностный интеграл по формуле Остроградского – Гаусса, получим

$$\iiint\limits_W \frac{\partial\varphi}{\partial t}dW = -\iiint\limits_W div\vec{J}dW + \iiint\limits_W QdW\,. \tag{7.54}$$

В виду произвольности выбора объема W, имеем

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} = -div\vec{J} + Q\,. \tag{7.55}$$

Учитывая (7.49), получим:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} + div\,\vec{V}\varphi = div(Dgrad\varphi) + Q\,. \tag{7.56}$$

В прямоугольной декартовой системе координат уравнение конвективной диффузии в ламинарно движущейся среде запишется следующим образом:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \frac{\partial u\varphi}{\partial x} + \frac{\partial v\varphi}{\partial y} + \frac{\partial w\varphi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_x\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_y\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_z\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right) + Q \tag{7.57}$$

где u, v, w – соответствующие компоненты скорости движущейся сплошной среды, которые в общем случае являются функциями координат и должны быть определены из гидродинамической задачи; D_x, D_y, D_z – коэффициенты молекулярной диффузии в соответствующих направлениях.

Можно выполнить преобразование:

$$div(\vec{V}\varphi) = \vec{V}\,grad\varphi + \varphi div\vec{V} \tag{7.58}$$

В силу несжимаемости среды $div\vec{V} = 0$. Тогда уравнение для концентрации принимает вид:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \vec{V}\,grad\varphi = div(D\,grad\varphi) + Q, \tag{7.59}$$

или:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} + u\frac{\partial\varphi}{\partial x} + v\frac{\partial\varphi}{\partial y} + w\frac{\partial\varphi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_x\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_y\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_z\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right) + Q \tag{7.60}$$

Обобщим теперь уравнение для случая турбулентно движущейся среды. Представим концентрацию вещества и скорость ветра в виде суммы осредненного значения и малых пульсационных составляющих:

$$\varphi = \overline{\varphi} + \varphi', u = \overline{u} + u', v = \overline{v} + v', w = \overline{w} + w', \tag{7.61}$$

причем

$$\overline{\varphi} = \frac{1}{\Delta t}\int_t^{t+\Delta t}\varphi\,dt, \quad \overline{u} = \frac{1}{\Delta t}\int_t^{t+\Delta t}u\,dt,$$
$$\overline{v} = \frac{1}{\Delta t}\int_t^{t+\Delta t}v\,dt, \quad \overline{w} = \frac{1}{\Delta t}\int_t^{t+\Delta t}w\,dt, \tag{7.62}$$

$$\overline{\varphi'} = \frac{1}{\Delta t}\int_t^{t+\Delta t}\varphi'\,dt = 0, \qquad \overline{u'} = \frac{1}{\Delta t}\int_t^{t+\Delta t}u'\,dt = 0,$$
$$\overline{v'} = \frac{1}{\Delta t}\int_t^{t+\Delta t}v'\,dt = 0, \qquad \overline{w'} = \frac{1}{\Delta t}\int_t^{t+\Delta t}w'\,dt = 0. \tag{7.63}$$

Подставляя (7.61) в (7.57) и интегрируя полученное уравнение на интервале от t до $t + \Delta t$, получим уравнение турбулентной диффузии

$$\frac{\partial\overline{\varphi}}{\partial t} + \frac{\partial\overline{u}\,\overline{\varphi}}{\partial x} + \frac{\partial\overline{v}\,\overline{\varphi}}{\partial y} + \frac{\partial\overline{w}\,\overline{\varphi}}{\partial z} = \tag{7.64}$$

$$=\frac{\partial}{\partial x}\left(D_x\frac{\partial\overline{\varphi}}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(D_y\frac{\partial\overline{\varphi}}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(D_z\frac{\partial\overline{\varphi}}{\partial z}\right)-\frac{\partial\overline{(u'\varphi')}}{\partial x}-\frac{\partial\overline{(v'\varphi')}}{\partial y}-\frac{\partial\overline{(w'\varphi')}}{\partial z}+\overline{Q}\,.$$

Корреляционные моменты между пульсациями скорости и концентрации $\overline{v_i'\varphi'}$ характеризуют дополнительный турбулентный перенос вещества. Согласно полуэмпирической модели турбулентности полагают, что турбулентный поток вещества в i-ом направлении равен

$$J_{ti}=-\overline{v_i'\varphi'}=D_{ti}\frac{\partial\overline{\varphi}}{\partial x_i}\,. \qquad (7.65)$$

Где D_{ti} – коэффициент турбулентной диффузии, характеризующий отношение потока примеси к градиенту концентрации. Поскольку для большинства газов коэффициент молекулярной диффузии составляет 0,1÷1см^2/с, а значение коэффициента турбулентной диффузии находится в пределах 104÷105см^2/с в большинстве случаев молекулярным переносом пренебрегают:

$$\frac{\partial\overline{\varphi}}{\partial t}+\overline{u}\frac{\partial\overline{\varphi}}{\partial x}+\overline{v}\frac{\partial\overline{\varphi}}{\partial y}+\overline{w}\frac{\partial\overline{\varphi}}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(D_{tx}\frac{\partial\overline{\varphi}}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(D_{ty}\frac{\partial\overline{\varphi}}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(D_{tz}\frac{\partial\overline{\varphi}}{\partial z}\right)+\overline{Q}\,. \qquad (7.66)$$

В дальнейшем, индекс t коэффициента турбулентной диффузии и черточки осреднения будем опускать.

Итак, конвективная диффузия описывается уравнением в частных производных второго порядка с переменными коэффициентами. Для его решения необходимо знать распределение вещества в рассматриваемой области в начальный момент времени (начальное условие), геометрию рассматриваемой области (безграничное, полуограниченное или ограниченное пространство) и закон взаимодействия исследуемой примеси с граничной поверхностью (граничное условие). Начальное условие записывается в следующем виде:

$$\varphi(x,y,z,t)\big|_{t=0}=f(x,y,z)\,, \qquad (7.68)$$

где $f(x,y,z)$ – известная функция координат.

В качестве граничного условия на бесконечности задают, что концентрация при удалении от источника стремится к фоновому значению φ_0 или к нулю:

$\varphi=\varphi_0$, при $l\to\infty$, где l – расстояние до источника.

На граничной поверхности условия выглядят сложнее. При задании концентрации вещества на граничной поверхности S в любой момент времени имеем граничное условие первого рода:

$$\varphi(x, y, z, t)\big|_S = f_S(x^S, y^S, z^S, t). \tag{7.69}$$

В частном случае, концентрация на протяжении всего процесса поддерживается постоянной ($\overline{\varphi}\big|_S = const$) или равна нулю ($\overline{\varphi}\big|_S = 0$).

Граничное условие второго рода состоит в задании плотности потока вещества на граничную поверхность как функции времени:

$$-D_n \frac{\partial \varphi}{\partial n}\bigg|_S = \mu_S(x^S, y^S, z^S, t). \tag{7.70}$$

Простейший случай однородного граничного условия второго рода состоит в постоянстве потока вещества на поверхность

$$-D_n \frac{\partial \varphi}{\partial n}\bigg|_S = \mu = const. \tag{7.71}$$

При исследовании распространения газоаэрозольных примесей в атмосфере, полагают, что на поверхности земли выполняется условие отражения (поток вещества на поверхности равен нулю):

$$-D_n \frac{\partial \varphi}{\partial n}\bigg|_S = 0. \tag{7.72}$$

На водной поверхности обычно задают условие поглощения примеси

$$\varphi\big|_S = 0. \tag{7.73}$$

Более общий случай частичного поглощения потока примеси на границе описывается граничным условием третьего рода

$$\left(-D_n \frac{\partial \varphi}{\partial n} + \beta\varphi\right)\bigg|_S = 0, \tag{7.74}$$

где β – параметр взаимодействия примеси с граничной поверхностью.

7.3 Особенности миграции атмосферных загрязнений в условиях большого города и их моделирование

Система уравнений (7.21) – (7.27), или (7.39) – (7.41) с начальными условиями (7.33) – (7.38), (7.42) – (7.43*), совместно с соотношениями (7.30) – (7.32), (7.40), (7.44) – (7.45) представляют собой модель конвективной диффузии атмосферных загрязнений в общем виде. Но условия большого города, или пригородного центра накладывают свои особенности (ограничения) на математическую модель подобного рода. Эти особенности обусловлены прежде всего значительной рельефной, температурной неоднородностью, неоднородностью влажности подстилающей поверхности городской территории.

Прежде всего, это касается расчетного определения поля скоростей ветра на территории города. Наличие плотной и высотной застройки усложняет движение воздушных масс в приземном ($z \le h$) слое атмосферы города, приводит к торможению воздушных потоков, к резкому ухудшению проветриванию городской территории, и, как следствие, – к увеличению концентрации вредных атмосферных загрязнений. Но для того, чтоб определить уровень концентрации вредных примесей расчетным путем, необходимо проинтегрировать уравнение (7.41), а это невозможно сделать, не зная поля скоростей ветра. В условиях города это поле имеет очень сложный вид, оно изменяется почти в каждой точке пространства как по абсолютной величине так и по направлению. В действительности, при обтекании ветром одного отдельного дома или сооружения возникает заторможенный поток вокруг лобовой части преграды, ускоренный поток на боковых поверхностях и над крышей и отрывные течения на тыльной стороне объекта.

Для того, чтоб получить детальную картину поля скоростей ветра расчетным путем вокруг одного единственного дома, необходимо проинтегрировать численно на компьютере систему уравнений гидромеханики (7.21) – (7.24), потратив на это несколько часов работы самого современного компьютера. Но в большом городе сотни, а то и тысячи строений! Задача становится практически неразрешенной.

В связи с этим, необходимо принять ряд допущений, которые могут существенно упростить постановку и решение задачи рас-

четного определения поля скорости ветра. Остановимся на двух таких подходах.

1. В работе [84], при расчетах поля скоростей ветра на территории города, предлагается отказаться от учета вязкости и турбулентных эффектов, и использовать вместо этого потенциальную модель течения газа.

Такой подход объясняется тем, что влияние сил трения на движение воздуха в близи поверхности земли ощутим до 10 м, а для застройки выше 10 м это влияние менее существенно и определяющим является изменения характеристик потока при его движении над преградой, которое описывается с помощью потенциальной (невязкой) модели. В этом случае скорость ветра определяется с помощью выражения:

$$\vec{V} = grad\Phi = \frac{\partial\Phi}{\partial x}\cdot\vec{i} + \frac{\partial\Phi}{\partial y}\cdot\vec{j} + \frac{\partial\Phi}{\partial z}\cdot\vec{k}\,, \qquad (7.75)$$

где $\Phi(x, y, z)$ – потенциал скорости потока воздуха, который удовлетворяет уравнению Лапласа [94]:

Поскольку общее решение задачи конвективной диффузии загрязняющей примеси будет осуществляться путем численного совместного интегрирования уравнений (7.41) с использованием сеточных конечно-разностных методов для описания движения воздушных масс над сложным рельефом, то предлагается этот рельеф (дома, городские промышленные сооружения) заменить кусочно-постоянными зависимостями, связанными с выбранной сеткой численного моделирования. Расчетная область интегрирования T_1 выбирается конечной (в виде параллелепипеда), а форма земной поверхности (городской и промышленной застройки) представляется с помощью кусочно-постоянной функции вида $\{z = z_{ij} = const$ для координат *x*, *y*, которые принадлежат разностным решеткам в горизонтальной плоскости (рис. 7.1)

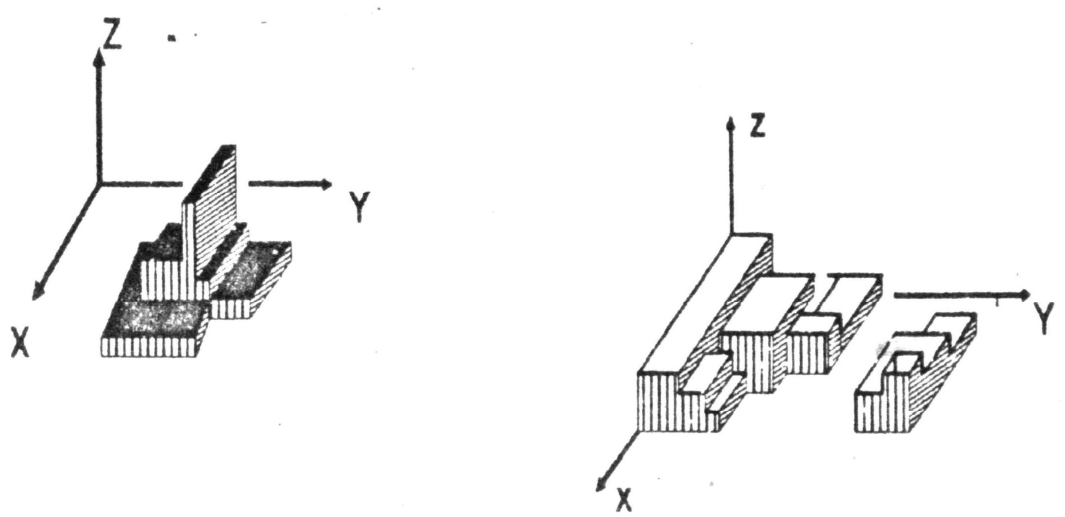


Рис. 7.1 Схема задания рельефа местности

Граничные условия для расчета скорости ветра $\vec{V}$ при интегрировании уравнения (7.75) задаются так:

а) $\partial\Phi/\partial n = 0$, ($\vec{n}$ – нормаль к поверхности рельефа), условие непротекания на твердых непроницаемых границах поверхностной структуры, заданной в виде ломаной кусочно-постоянной поверхности:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial\Phi}{\partial z} = 0, & \text{на горизонтальных элементах земной поверхности;} \\ \dfrac{\partial\Phi}{\partial x} = 0, \quad \textit{або}\ \dfrac{\partial\Phi}{\partial y} = 0 & \text{на вертикальных элементах земной поверхности;} \end{cases} \tag{7.76}$$

$$\text{б)} \begin{cases} \dfrac{\partial\Phi}{\partial n} = V_n, \quad \text{на боковой границе расчетной области } T_1\text{, где происходит втекание воздуха;} \\ \Phi = \Phi^*(x = const, y, z)\ \textit{або}\ \Phi = \Phi^*(x, y = const, z), \\ \text{на боковой границе расчетной области } T_1\text{, где происходит вытекание воздуха;} \\ \dfrac{\partial\Phi}{\partial z} = 0, \quad \text{на верхней границе } z = H \text{ области } T_1. \end{cases} \tag{7.77}$$

Следует отметить, что течение воздуха над сложным рельефом может сопровождаться отрывом потока на границах, которые содержат сломы в форме поверхности. Эти эффекты нельзя учесть

в рамках потенциальной модели, и в этом содержится основной недостаток предложенного подхода.

2. Второй подход основан на допущении о существовании аналогии между полем скорости ветра в городских районах высотной и плотной застройки и полем скорости жидкости в грунтах и скальных породах, изучению которых посвящена теория фильтрации [27].

Дело в том, что в природных условиях поры грунтов и трещины скальных горных пород имеют невероятно сложные очертания, и течения жидкости в них происходят достаточно непростым способом. Отсутствие всякой закономерности в распределении пор и трещин не позволяет расчетным путем определить скорость течения жидкости в любой точке породы. Но, как указано выше, в условиях города мы сталкиваемся с аналогичной ситуацией при расчетах скорости ветра.

Оказывается, что при решении практических задач теории фильтрации совсем необязательно точно определять скорость жидкости в каждой конкретной точке грунта или скальной породы, а необходимо знать эти скорости и расходы жидкости в пределах малых площадок, величина и размеры которых, однако, значительны сравнительно с размерами пор грунта и трещин. Такой подход дает возможность определить некоторое осредненное фиктивное поле скоростей жидкости, которое покрывает всю область грунта или скальной породы, которое получило название **фильтрационного поля.** Такое поле в полной мере пригодно для проведения разного типа расчетов при решении практических задач.

Если применить такой подход к задаче расчета поля скоростей ветра в городских районах высотной и плотной застройки (в так называемых «городских лабиринтах»), то можно аналогичным образом получить осредненное фиктивное поле скоростей ветра. Оно будет покрывать всю территорию города, и определять скорость, расходы и давление воздуха, постоянные вдоль малых площадок (размер которых, однако, больший чем среднее расстояния между домами). Такое поле скоростей ветра тоже можно назвать фильтрационным и использовать при расчетах распространения загрязнений в атмосфере города.

Превосходством такого метода является то, что отпадает потребность в проведении сложных и достаточно трудоемких расчетов обтекания каждой отдельной постройки, – достаточно один раз

численно проинтегрировать единственную для всего города систему уравнений конвективной диффузии загрязняющей примеси в фильтрационной постановке. Эта система уравнений дает возможность определить не только фильтрационное поле скорости ветра на всей территории города, но и фильтрационное поле температуры, влажности, концентрации загрязняющей примеси. Недостатком фильтрационной модели является то, что расчетные фильтрационные поля не всегда совпадают с экспериментальными данными в произвольно выбранной точке.

Может возникнуть вопрос – каким образом установить аналогию между течением жидкости в порах грунта и щелей скальных пород с течением воздушных масс в городском лабиринте, если поперечные размеры поры и щели несравнимо малы сравнительно с средним расстоянием между строениями? Но ведь характерные масштабные размеры водоносных пластов грунта также несравнимо малы в сравнении с характерным масштабом городского лабиринта L.

Поэтому, если ввести для городского лабиринта, аналогично грунтам, коэффициент пористости:

$$m = \frac{W'}{W}, \tag{7.78}$$

где W' – пространственный объем всех пустот городского лабиринта (пустоты между строениями, улицы, дворы); W – полный пространственный объем всего массива городского лабиринта, то этот показатель в целом может быть того же порядка, что и для грунтов. Во всяком случае, разумные пределы для коэффициента пористости городского лабиринта такие:

$$0 < m \leq 0{,}5.$$

Коэффициент (7.78) можно именовать также коэффициентом плотности застройки городского лабиринта.

Все выше сказанное свидетельствует в пользу аналогии между фильтрацией жидкости в порах грунтов и скальных пород и движением воздушных масс в городском лабиринте. Но есть и некоторые отличия. Они следующие:

а) в отличии от большинства задач классической теории фильтрации, движения воздушных масс в «порах» городского лабиринта будет существенно турбулентным, скорость ветра значительно превышает скорость течения жидкости в порах грунтов, и

пренебрегать конвективным переносом импульса, тепла, вещества – уже недопустимо;

б) в отличии от пор грунтов и трещин скальных пород, которые во всех направлениях имеют довольно сложные очертания и формы лишь в горизонтальных направлениях, а в вертикальном направлении они практически прямолинейны и перпендикулярны подстилающей поверхности земли (рис. 7.2).

Если в пространстве городского лабиринта выделить элементарный параллелепипед (с ребрами *dx*, *dy*, *dz*, параллельными координатными осями декартовой системе координат *Oxyz* , где оси *Ox*, *Oy*, лежат на поверхности земли, а ось *Oz* – перпендикулярно к ней), такой, что длина ребер будет значительно превышать среднее расстояние между строениями и средний горизонтальный размер самих зданий l_{cp}, то очертания и формы «пор» лабиринта будут выглядеть так (см. рис. 19):

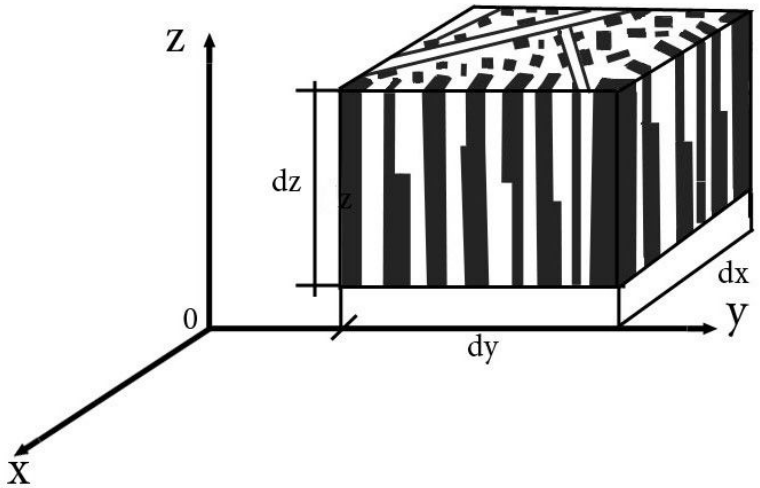


Рис. 7.2 Очертания и формы городского лабиринта

Указанные отличия несущественно влияют на фильтрационную аналогию движения масс в условиях городского лабиринта, поскольку теория фильтрации рассматривает и некоторые задачи турбулентного движения жидкости и газов в порах грунта и трещинах скальных пород [27]. Далее, при изучении движения воздушных масс в условиях городского лабиринта будем предполагать наличие фильтрационной аналогии такого движения с течением жидкости и газа в порах грунтов и щелях скальных пород [27].

Введем понятие про поры и скелет городского лабиринта. **Порами** городского лабиринта мы будем называть пустоты между зданиями разнообразными сооружениями лабиринта, в том числе улицы, переулки, дворы; а **скелетом** – собственно здания и соору-

жения. Будем также считать, что коэффициент пористости или плотности застройки городского лабиринта , который определяется соотношением (7.78), известный.

Введем понятие фильтрационного потока воздуха в городском лабиринте. Возьмем в пространстве городского лабиринта, который состоит из пор и скелета, произвольную малую площадку ΔS (малую в сравнении с площадью подстилающей поверхности самого лабиринта), размеры которой, однако, значительные в сравнении с средней площадью поперечного сечения пор и средней площадью горизонтального сечения самих зданий. Пусть объемный расход воздуха через площадку ΔQ (м^3/сек) равняется настоющему расходу воздуха через эту площадку, который осуществляется через поры. Тогда под скоростью фильтрационного потока воздуха в городском лабиринте $\vec{V}(x, y, z, t)$ мы будем иметь введу скорость, постоянную в пределах данной площадки ΔS и такую, что определяется соотношением:

$$\vec{V} = \frac{\Delta Q}{\Delta S}. \tag{7.79}$$

Фильтрационный поток воздуха с полем скоростей $\vec{V}(x, y, z, t)$ является фиктивным осредненным потоком, который непрерывно заполняет все пространство городского лабиринта, включая объем пор и скелета. Но в действительности, воздух движется только через ту часть площадки ΔS, которая занята порами и величина которой равна $m\Delta S$. Тогда средняя скорость воздуха в порах при действительном расходе ΔQ, будет:

$$\vec{V}^* = \frac{\Delta Q}{m\Delta S} = \frac{1}{m}\vec{V}. \tag{7.80}$$

Вводя, по сути, статистическое понятие скорости фильтрации и фильтрационного потока в пространстве городского лабиринта, мы в том же статистическом понимании этих понятий, можем рассматривать все известные из гидродинамики [94] кинематические и динамические определения. Это определения таких понятий, как линии тока, свободные поверхности, поверхностные и объемные силы. Таким образом, мы в геометрическом смысле, извлекли из рассмотрения скелет городского лабиринта, оставив только его поры. Понятно, что мы не можем игнорировать силовое влияние этого скелета на поток, поскольку он является основным фактором дей-

ствия сил сопротивления $\vec{R}(x, y, z, t)$, которые возникают при обтекании реальным воздушным потоком зданий и разнообразных сооружений. Как известно [94], силы сопротивления в общем случае сводятся к результирующей силы нормального давления на поверхность объекта и силы трения об его поверхность. Допуская, что некоторый малый объем $d\tau = dxdydz$, выделенный в пространстве городского лабиринта (рис. 7.2), содержит достаточное количество частичек скелета (то-есть большое количество зданий при плотной застройке), мы делаем вывод, что силы сопротивления $\vec{R}(x, y, z, t)$ равномерно распределены в объеме. Таким образом, силы сопротивления при фильтрационном движении воздушных масс в городском лабиринте пропорциональны объему и могут, рассматривается как силы объемные или массовые.

Поскольку основным заданием данной работы является изучение процесса распространения загрязнений в атмосфере городского лабиринта, то рядом с введенным понятием фильтрационного поля скоростей ветра (7.79), следует ввести понятие фильтрационного поля температуры и фильтрационного поля концентрации загрязняющих веществ. Такие поля, так же, как фильтрационное поле скорости ветра, по сути, должны быть фиктивными – такими, которые непрерывно заполняют все пространство городского лабиринта, включая и поры и скелет; они также должны соответствовать (7.79).

Итак, пусть через выделенную в пространстве городского лабиринта произвольную малую площадку ΔS, происходит реальный расход тепла ΔQ_T (кДж/сек). Этот расход состоит из тепла, подведенного к площадке снаружи путем теплопроводности ΔQ_{TT} и тепла, перенесенного через площадку конвективно ΔQ_{TK} путем действительного расхода воздуха ΔQ, то-есть

$$\Delta Q_T = \Delta Q_{TT} + \Delta Q_{TK} \ ,$$

где

$$\Delta Q_{TT} = \left(\lambda \frac{\partial T_P}{\partial n} \right) \Delta S \ ;$$

$$\Delta Q_{TK} = \rho C_P \Delta Q (T_P - T_S) = \Delta'_{TK} (T_P - T_S) ;$$

$T_P(x,y,z,t)$ – действительное поле температур в городском лабиринте; T_S – действительная температура площадки ΔS; λ (кДж/м·сек·град) – коэффициент теплопроводности среды; ρ (кг/м^3) – плотность воздуха; C_P (кДж/кг·град) – удельная теплоемкость воздуха; $\vec{n}$ – единичная нормаль к площадке ΔS; Δ'_{TK} (кДж/сек·град) $= \rho C_P \Delta Q$ – удельный, относительно к единицы температуры, действительный конвективный расход тепла через площадку ΔS.

Тогда под фильтрационным полем температуры $T(x,y,z,t)$ будем иметь введу соотношение, постоянное в пределах площадки ΔS:

$$T = \frac{\Delta Q_T}{\Delta'_{TK}} = \left(\frac{a}{\Delta Q} \cdot \frac{\partial T_P}{\partial n} \right) \Delta S + (T_P - T_S), \tag{7.81}$$

где a (м^2/сек) $= \lambda / \rho C_P$ – коэффициент температуропроводности среды;

Фильтрационное поле температуры $T(x,y,z,t)$ пронизывает как поры городского лабиринта, так и его каркас. При этом каркас поглощает часть тепла с воздушной среды лабиринта. Используя формальное тождественное равенство

$$\Delta'_{TK} \equiv m \cdot \Delta'_{TK} + (1-m) \cdot \Delta'_{TK} \ ,$$

найдем:

а) среднюю температуру воздуха в порах лабиринта

$$T^* = \frac{\Delta Q_T}{m \Delta'_{TK}} = \frac{1}{m} \cdot T \ ; \tag{7.82}$$

б) среднюю температуру каркаса

$$T_1^* = \frac{\Delta Q_T}{(1-m)\Delta'_{TK}} = \frac{1}{1-m} T = \frac{m}{1-m} T^* . \tag{7.83}$$

Пускай **действительный** реальный расход загрязняющей примеси ΔQ_φ (кг/сек) через площадку ΔS состоит из примеси, подведенной к площадке снаружи путем диффузии $\Delta Q_{\varphi g}$ и примеси, которая перенесена через площадку конвективно $\Delta Q_{\varphi k}$ действительным расходом воздуха ΔQ, то-есть

$$\Delta Q_{\varphi} = \Delta Q_{\varphi g} + \Delta Q_{\varphi k}$$

где

$$\Delta Q_{\varphi g} = \left(\frac{D}{\rho} \frac{\partial \varphi_p}{\partial n} \right) \Delta S \; ; \quad \Delta Q_{\varphi k} = \Delta Q_{\varphi} \varphi_p \, .$$

Здесь: φ_p (кг/м^3) $= \varphi_p(x, y, z, t)$ – реальное, действительное поле объемной концентрации загрязняющей примеси; D (кг/м·сек) – динамический коэффициент диффузии примесей.

Тогда под фильтрационным полем объемной концентрации загрязняющее примеси $\varphi(x, y, z, t)$ в атмосфере городского лабиринта мы будем иметь в виду соотношение, которое остается постоянным в пределах площадки ΔS:

$$\varphi = \frac{\Delta Q_{\varphi}}{\Delta Q} = \left(\frac{\nu_{\varphi}}{\Delta Q} \cdot \frac{\partial \varphi_p}{\partial n} \right) \Delta S + \varphi_p \tag{7.84}$$

где ν_{φ} (м^2/сек) $= D/\rho$ – кинематический коэффициент диффузии.

Тогда средняя объемная концентрация загрязняющей примеси в порах городского лабиринта будет:

$$\varphi^* = \frac{\Delta Q_{\varphi}}{m \Delta Q} = \frac{1}{m} \varphi \, . \tag{7.85}$$

Рассмотрим, в чем преимущества введения фильтрационных полей скорости ветра, температуры и концентрации загрязняющих примесей в атмосфере городского лабиринта? Они состоят в следующем:

а) хотя фильтрационные поля (7.79), (7.81), (7.84), непрерывно заполняют все пространство лабиринта – поры и каркас, по сути являются фиктивными, но они связаны с действительными, реальными расходами воздуха, тепла и загрязняющей примеси через любые малые площадки в объеме лабиринта;

б) замена действительных, реальных полей скорости ветра, температуры и загрязняющих примесей на фильтрационные поля дает возможность провести математические моделирования и расчет процесса распространения загрязнений в очень сложных условиях состояния атмосферы городского лабиринта;

в) в процессе рассмотрения конкретных задач фильтрационной атмосферы городского лабиринта (фильтрационный приземный слой, фильтрационный поглощающий слой…) теперь, при установ-

ке параметров турбулентного обмена можно использовать хорошо зарекомендовавшие себя полуэмпирические теории турбулентной атмосферы [46, 50, 103].

Необходимо отметить следующие обстоятельства. Каркас городского лабиринта – это, как правило, железобетонные, кирпичные и различного вида металические сооружения. Процессы сорбции атмосферных загрязняющих примесей на поверхности такого каркаса очень незначительные, в отличии от фильтрации жидкости в грунтах. Поэтому можно считать, что средняя концентрация загрязняющих примесей в каркасе

$$\varphi_1^* \approx 0 \ .$$

В процессе построения математической модели распространения загрязнений в атмосфере городского лабиринта мы будем исходить из следующих соображений:

а) реальные величины скорости ветра в городском лабиринте не настолько велики, чтоб считать число Маха сколько-нибудь значительным;

б) реальные перепады температуры также в большинстве случаев можно считать незначительными, поскольку они не могут существенно влиять на значения основных физических констант воздуха – коэффициентов вязкости и теплопроводности;

в) малость значений числа Маха потоков воздуха позволяет пренебречь влиянием вязкой диссипации энергии, а незначительные перепады температур – обменом тепла за счет излучения, и можно считать, что процесс теплопередачи в атмосфере лабиринта полностью сводится к теплопроводности и конвекции.

Исходя из того, что диапазон высот атмосферы, который должен описываться с помощью математической модели, не превышает 1 км, и учитывая все вышесказанное, будем считать, что в атмосфере городского лабиринта воздуха практически несжимаем

$$\rho \approx const,$$

но неизотермической

$$T \neq const,$$

средой, то-есть атмосфера лабиринта тамперетурно стратифицирована.

Для упрощения будем считать подстилающую поверхность городского лабиринта плоской (если это не так, то изменения в

орографии можно учитывать отдельно). Введем декартовую прямоугольную правую систему координат $Oxyz$ так, чтоб начало координат – точка O находилась в центре городского лабиринта, оси Ox, Oy лежали в плоскости подстилающей поверхности, а ось Oz была перпендикулярна к этой плоскости и направлена вверх. Кроме того, будем считать, что направление оси Ox совпадает с направлением вектора скорости ветра на бесконечности ($x^2 + y^2 \to \infty$), то-есть с направлением ветра за пределами города.

Атмосферу городского лабиринта можно условно представить так, что она состоит из трех слоев:

а) с приземного слоя, который в нашем случае полностью занят именно городским лабиринтом

$$0 \le z \le h \approx (50 \div 100) \text{ м};$$

б) с верхней части пограничного слоя атмосферы, в которой еще отмечается влияние подстилающей поверхности городского лабиринта

$$h < z \le H \approx 1 \text{ км};$$

в) из области геострофического ветра $z > H$, в которой влияние городского лабиринта уже неощутимо; мелкомасштабная завихренность, которая обеспечивает турбулентный обмен в слоях атмосферы, расположенных ниже – практически отсутствует; а вклад этой области в настоящую математическую модель проявляется только в задании граничных условий при $z = H$.

Следует заметить, что в самом общем случае нестационарного состояния атмосферы, положения верхних границ

$$z = h(x, y, t), z = H(x, y, t),$$

сначала неизвестно, его необходимо найти в процессе решения задачи.

Известно [103, 46], что приземный слой атмосферы, $0 \le z \le h$, над сравнительно ровной и однородной подстилающей поверхностью, характеризуется тем, что в нем сохраняется по высоте вертикальные потоки количества движения и тепла:

$$\nu^T \cdot \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau}{\rho} = u_*^2 = const \ ; \qquad (7.86)$$

$$-\left(\frac{\nu^T}{P_r^T}\right)\cdot\frac{\partial T}{\partial z}=\frac{q}{\rho C_p}=const\ ;$$

где $u_*=\sqrt{\tau/\rho}\approx(0{,}2\div0{,}8)$ (м/сек) – скорость трения или скорость сдвига; $\nu_z^T=\aleph\cdot u_*\cdot z=k_1\cdot(z/z_1)$ – вертикальный кинематический коэффициент турбулентного обмена количества движения; z_1 – некоторая высота над подстилающей поверхностью (отмеченный z_1 = 1 м); $\aleph=0{,}41$ – постоянная Кармана; $K_1=\aleph\cdot u_*\cdot z_1\approx(0{,}1\div0{,}2)$ (м^2/сек) – коэффициент обмена на высоте $z=z_1$; $P_r^T=\mu^T\cdot C_p/\lambda^T$ – турбулентное число Прандтля; μ^T,λ^T – коэффициент турбулентной динамической вязкости и теплопроводности.

Кроме того, для приземного слоя атмосферы Земли свойственна значительная изменчивость по высоте скорости ветра, температуры и турбулентности. Считается, что вертикальные градиенты скорости ветра и температуры в приземном слое атмосферы превышают горизонтальные градиенты, то-есть:

$$\left\{\frac{\partial u}{\partial x};\frac{\partial u}{\partial y};\frac{\partial V}{\partial x};\frac{\partial V}{\partial y};\frac{\partial T}{\partial x};\frac{\partial T}{\partial y};\right\}<\left\{\frac{\partial u}{\partial z};\frac{\partial V}{\partial z};\frac{\partial T}{\partial z}\right\}. \qquad (7.87)$$

Здесь четко определяется и влияние устойчивости атмосферы, непосредственно связанной с температурной стратификацией. Выделяют условия безразличной (равновесной) стратификации, когда вертикальный поток тепла равняется нулю, а изменение температуры воздуха по высоте происходит по адиабатическому закону. Неравновесная стратификация характеризуется температурными градиентами, которые существенно отличаются от нуля. Условия с неадиабатическими градиентами температуры, когда температура уменьшается по высоте, относят к неустойчивому состоянию атмосферы. В таких случаях стратификация служит причиной развития случайных возмущений в потоке воздуха и содействует усилению турбулентного обмена. Наоборот, инверсионное распределение, которое связано с ростом температуры по высоте, определяется как стойкая стратификация. В случае наличия инверсии температуры, возмущения в потоке воздуха гасятся, а интенсивность турбулентного обмена значительно слабеет.

Как было отмечено ранее, условия (7.86), (7.87) справедливы в приземном слое, если подстилающая поверхность достаточно ровная и однородная (в идеальном случае – плоскость). Однако в атмо-

сфере городского лабиринта с плотной и высотной застройкой (когда высота здания сопоставима с высотой приземного слоя атмосферы *h*, а поля скоростей ветра и температуры имеют очень сложный характер), при любой температурной стратификации условия (7.86), (7.87) не выполняются.

Математическую модель приземного слоя атмосферы городского лабиринта мы будем строить на основе фильтрационной аналогии. В пространстве городского лабиринта выделим элементарный объем $d\tau = dxdydz$ (рис. 7.2), размеры которого, однако, значительно превышают характерные размеры, которые имеют поры (расстояние между зданиями). Пусть коэффициент пористости или плотности застройки лабиринта равен *m*. Тогда объем воздуха в элементе $d\tau$ будет равняться $m \cdot d\tau$, а объем каркаса $(1-m) \cdot d\tau$.

Рассмотрим баланс сил, которые действуют на объем воздуха $m \cdot d\tau$. Очевидно, сила инерции равна $m\rho d\left(d\vec{V}^*/dt\right)d\tau$. Эта сила уравновешена действием сил давления $(-gradP)d\tau$ и массовых (объемных) сил тяжести $m \cdot \rho \cdot \vec{F}_g \cdot d\tau$, плавучести $m \cdot \rho \cdot \vec{F}_{пл} \cdot d\tau$, и сопротивления каркаса $m \cdot \rho \cdot \vec{R} \cdot d\tau$, где:

$\vec{F}_g = -grad(gz + const)$ – плотность сил тяжести; $\vec{F}_{пл} = \vec{g}(\beta \cdot \Delta T) = -g(\beta \cdot \Delta T) \cdot \vec{k}$ – плотность сил плавучести; $\vec{R}$ – отнесенная к единице массы воздуха сила сопротивления каркаса (плотность силы сопротивления); $g = 9{,}8$ (м/сек^2) – ускорение земного притяжения; $\Delta T = T - T_0$ – избыточная фильтрационная температура воздуха над подстилающей поверхностью [94]; β (град$^{-1}$) – коэффициент объемного термического расширения воздуха; $\vec{k}$ – орты оси *Oz*.

Следует отметить, что в теории фильтрации [27], кроме пересчитанных сил, учитывается также действие массовой силы $m \cdot \rho \cdot \vec{F}_a \cdot d\tau$, с плотностью

$$\vec{F}_a = -grad\left(\frac{1-m}{m} gz\right),$$

которая, согласно третьему закону Ньютона, совершает давление на жидкость в противодействие силе Архимеда. Она в свою очередь действует на частички грунта. Однако в условиях городского лабиринта мы не можем учитывать действие этой силы на воздух, поскольку она действует на подстилающую поверхность земли.

Баланс сил принимает вид:

$$m\rho\frac{dV^*}{dt}d\tau = -(gradp)d\tau - m\rho[grad(gz)]d\tau + m\rho\vec{R}d\tau - m\rho g(\beta\Delta T)d\tau\cdot\vec{k}\ ,$$

или

$$m\cdot\frac{dV^*}{dt} = -(grad\frac{p}{\rho}) - m[grad(gz)] + m\vec{R} - mg(\beta\Delta T)\cdot\vec{k} \qquad (7.88)$$

Это и есть векторное дифференциальное уравнение движения воздуха в порах городского лабиринта. Сводя это уравнение к форме Громека-Ламба [94], получим:

$$m\cdot\left[\frac{\partial\vec{V}^*}{\partial t} + grad(\frac{V^{*2}}{2} + \frac{p}{m\rho} + gz) + rot\vec{V}^*\times\vec{V}^*\right] = m\cdot\vec{R} - mg(\beta\Delta T)\cdot\vec{k}\ \cdot$$

Учитывая соотношение (7.82), окончательно получим:

$$m\frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + m^2g\cdot gradh_{нп} + rot\vec{V}\times\vec{V} = m^2\vec{R} - m^2g(\beta\Delta T)\cdot\vec{k}, \qquad (7.89)$$

где

$$h_{нп} = \frac{V^2}{2m^2g} + \frac{p-p_0}{m\gamma} + z\ ; \qquad (7.90)$$

$$\Delta T = T - T_0\ ;$$

$\gamma = \rho g$ – удельный вес воздуха; p_0 – давление при $z = 0$.

Величина $h_{нп}$ в гидромеханике [94] называется гидравлической высотой, а отдельные члены $h_{нп}$ соответственно: $V^2/2m^2g$ – скоростной высотой; $(p-p_0)/m\gamma$ – пьезометрической высотой; z – нивелирной высотой. Однако в теории фильтрации [27] величину $h_{нп}$ называют полным напором, который состоит соответственно из скоростного напора $v/2m^2g$ и пьезометрического напора $((p-p_0)/m\gamma + z)$. В связи с тем, что в абсолютном большинстве задач теории фильтрации скорость жидкости мала (десятые доли сантиметра за секунду), то скоростной напор обычно отбрасывается как малая величина, а качестве $h_{нп}$ рассматривается только пьезометрический напор. Однако при турбулентных течениях скорость значительно возрастает и скоростной напор принимает тот же порядок, что и пьезометрический. В условиях городского лабиринта движение воздушных масс существенно турбулентный и скоростной напор имеет решающее значение. В уравнении (7.89) неопределенным остается выражение для силы сопротивления $\vec{R}$. В теории

фильтрации [27] вводится понятие пьезометрического наклона или потери напора вдоль линии тока

$$I = -\frac{dh_{нп}}{\mathrm{dS}} = -\vec{S}^0 \cdot gradh_{нп} \ , \tag{7.91}$$

где $\vec{S}^0 = \vec{V}/\left|\vec{V}\right|$ – единичный орт касательной к линии тока, и устанавливается зависимость силы сопротивления от потери напора:

$$\vec{R} = -\frac{g}{m} \cdot I \cdot \vec{S}^0 \ . \tag{7.92}$$

Далее, так как значение скорости движения в порах грунтов малы, используется закон Дарси о линейную зависимости потери напора от скорости фильтрации:

$$I = A \cdot \vec{V} \cdot \vec{S}^0, \tag{7.93}$$

где A (сек/м) – эмпирический коэффициент, который зависит от размеров частичек грунта и вязкости жидкости, то-есть от числа Рейнольдса

$$\mathrm{Re} = \frac{\left|\vec{V}\right| l_{\text{гр}}}{\nu} \ ,$$

где $l_{\text{гр}}$ – характерный линейный размер частичек грунта.

Сила сопротивления (7.92) примет вид:

$$\vec{R} = -\frac{g}{m} A \cdot \vec{V} \ . \tag{7.94}$$

Но в городском лабиринте скорость движения воздушных масс значительно превышает скорость жидкости в порах грунтов, а характер течения существенно турбулентный, для него закон Дарси уже не выполняется, а имеет место зависимость [27]

$$I = BV^2, \tag{7.95}$$

где B (сек^2/м^2) – эмпирический коэффициент, который зависит от размеров частичек грунта и вязкости среды.

Для определения силы сопротивления каркаса в условиях городского лабиринта мы используем тот же самый прием, который используется в теории фильтрации для получения силы сопротивления (7.94). Допустим, что имеет место гипотетический случай, когда фильтрационное течение воздуха в городском лабиринте прямолинейно и равномерно, величина среднего ускорения $d\vec{V}^*/dt$

равна нулю и отсутствует сила плавучести ($\Delta T = 0$). Тогда из (7.88) имеем:

$$\vec{R} = g \cdot grad(\frac{p - p_0}{m\gamma} + z) \ .$$

Но, с другой стороны, согласно (7.90),

$$grad(\frac{p - p_0}{m\gamma} + z) = grad(h_{нп} - \frac{\mathrm{V}^2}{2m^2 g}) = gradh_{нп} \ ,$$

так как в условиях равномерного и прямолинейного течения

$$grad(\frac{\mathrm{V}^2}{2m^2 g}) = 0 \ ,$$

а сила сопротивления принимает вид:

$$\vec{R} = g \cdot gradh_{нп} \ .$$

Теперь, согласно (7.91) и (7.95), имеем:

$$gradh_{нп} = -I\vec{S}^0 = -BV^2 \cdot \frac{\vec{V}}{\left|\vec{V}\right|} = -B \cdot \left|\vec{V}\right| \cdot \vec{V} \ .$$

Тогда сила сопротивления принимает вид:

$$\vec{R} = -g \cdot B \cdot \left|\vec{V}\right| \cdot \vec{V} \ . \qquad (7.96)$$

Выражение для силы сопротивления каркаса (7.96), полученное для случая прямолинейного и равномерного течения воздуха в порах городского лабиринта, мы, по аналогии из теории фильтрации [27], будем считать верным для любых других случаев течения воздуха в городском лабиринте. Тогда уравнение движения (7.89) принимает вид:

$$m\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (m^2 g)gradh_{нп} + rot\vec{V} \times \vec{V} = -(m^2 g)\left[B\left|\vec{V}\right|\vec{V} + (\beta\Delta T)\vec{k}\right]. \qquad (7.97)$$

Для этого уравнения необходимо добавить уравнение неразрывности

$$div\vec{V} = 0, \qquad (7.98)$$

и уравнение, которое описывает распределение температуры в приземном слое атмосферы городского лабиринта. С этой целью рассмотрим полное изменение внутренней энергии воздуха в выделен-

ном объеме воздуха $md\tau$. Это изменение происходит за счет притока тепла в объем $md\tau$ снаружи путем теплопроводности, за счет действия внутренних источников (стоков) тепловой энергии и за счет поглощения части тепловой энергии воздуха объемом каркаса $(1-m)d\tau$. Суммируя, получим баланс тепла:

$$m\rho\frac{dU^*}{dt}d\tau = mdiv\left[(\lambda+\lambda^T)\nabla T^*\right]d\tau + m\dot{Q}^*d\tau - (1-m)\rho_1\frac{dU^*_1}{dt}d\tau, \qquad (7.99)$$

где: $U^* = C_pT^*$ – отнесенная к единице массы внутренняя энергия воздуха в порах лабиринта; λ, λ^T – молекулярный и турбулентный коэффициенты теплопроводности воздуха; соотетственно $\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial}{\partial z}\vec{k}$ – дифференциальный оператор Гамильтона; $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – орты декартовой системы координат $Oxyz$; $\dot{Q}^*$ (кДж/м^{3}сек) – отнесенная к единицы объема скорость прироста (уменьшения) тепла за счет работы внутренних источников (стоков); $U^*_1 = C_1T_1^*$ – отнесенная к единицы массы внутренняя энергия материала твердого каркаса; ρ_1C_1 – плотность и удельная теплоемкость материала каркаса.

Так как

$$\frac{dU^*}{dt} = C_p\left(\frac{\partial T^*}{\partial t} + \vec{V}^*gradT^*\right), \quad \frac{dU_1^*}{dt} = C_1\frac{\partial T_1^*}{\partial t},$$

то уравнение баланса тепла принимает вид:

$$m\rho C_p\left(\frac{\partial T^*}{\partial t} + \vec{V}^*gradT^*\right) = mdiv\left[(\lambda+\lambda^T)\nabla T^*\right] + m\dot{Q}^* - (1-m)\rho_1C_1\frac{\partial T^*_1}{\partial t}.$$

С учетом соотношения (7.80), (7.82), (7.83), уравнение баланса тепла в городском лабиринте принимает вид:

$$m\left[1+\left(\frac{\rho_1C_1}{\rho C_p}\right)\right]\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V}\cdot gradT = mdiv\left[\left(\frac{\nu}{\Pr} + \frac{\nu^T}{\Pr^T}\right)\nabla T\right] + \frac{m^2}{\rho C_p}\dot{Q}^*, \qquad (7.100)$$

где ν, ν^T – молекулярный и турбулентный кинематический коэффициент трения; $\Pr$, $\Pr^T$ – молекулярный и турбулентный критерии (числа) Прандтля.

Система уравнений (7.97) – (7.100) определяют фильтрационные поля скорости ветра и температуры в приземном слое атмосферы городского лабиринта.

Для полноты картины нам необходимо еще получить уравнение, которое описывает поле концентрации загрязняющих примесей в приземном слое атмосферы городского лабиринта. С этой целью рассмотрим полное изменение средней концентрации загрязняющих примесей в объеме воздуха $md\tau$. Это изменение происходит за счет диффузии загрязняющих примесей снаружи, за счет химической нейтрализации примесей а воздухе и за счет действия внутренних источников (стоков). Уравнение баланса имеет вид:

$$m\rho\frac{d\varphi^*}{dt}d\tau = mdiv\left[(D+D^T)\nabla\varphi^*\right]d\tau - m\rho\sigma\varphi^* d\tau + m\rho\dot{M}^* d\tau,$$

где: φ^* (кг/м^3) – средняя объемная концентрация загрязняющих примесей в порах лабиринта; D, D^T – молекулярный и турбулентный динамический коэффициенты диффузии; σ (сек$^{-1}$) – параметр нейтрализации примеси в атмосфере; $\dot{M}^*$ (кг/м^{3}сек) – отнесенная к единицы объема скорости прироста массы загрязняющих примесей за счет работы внутренних источников. Поскольку

$$\frac{d\varphi^*}{dt} = \frac{d\varphi^*}{dt} + \vec{V}^* grad\varphi^*,$$

то, принимая во внимание соотношение (7.80) и (7.85), получим уравнение для фильтрационного поля концентрации загрязняющих примесей в атмосфере городского лабиринта:

$$m\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \vec{V}grad\varphi = mdiv\left[(\nu_\varphi + \nu_\varphi{}^T)\nabla\varphi\right] - m\sigma\varphi + m^2\dot{M}^*, \qquad (7.101)$$

где ν_φ, $\nu_\varphi{}^T$ – молекулярный и турбулентный кинематический коэффициенты диффузии.

Система уравнений (7.97) – (7.101) полностью описывает фильтрационный процесс распространения загрязнений в приземном слое атмосферы городского лабиринта. Перед тем, как записать эту систему уравнений в проекциях на оси декартовой системы координат *Oxyz*, сделаем некоторые замечания относительно порядка величин, которые входят в уравнение.

1) Известно [27], что в задачах теории фильтрации, которые содержат **верхнюю свободную границу**, поверхность которой имеет совсем незначительный спад, то-есть абсолютные величины наклонов свободной поверхности малы, линии тока фильтрацион-

ного потока жидкости практически лежат в горизонтальной плоскости, то-есть:

$$\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k} \approx u\vec{i} + v\vec{j},$$

а компонента $w \sim \varepsilon$ – малая величина. Но городской лабиринт также имеет открытую верхнюю свободную границу

$$z = h(x, y, t),$$

наклон которой также можем читать малым, поскольку большинство задач распространения загрязнений в атмосфере ставится и решается в квазистатической постановке, когда термин изменения метеоусловий (скорости ветра, температуры, давления) намного больше чем время переноса загрязнений от источника к рецептору, и когда

$$z = h = const,$$

то-есть свободная верхняя граница параллельна подстилающей поверхности. Но тогда вектор-вихрь $\vec{\Omega} = rot\vec{V}$ в атмосфере городского лабиринта должен быть практически перпендикулярным к подстилающей поверхности $z = 0$, то-есть

$$\vec{\Omega} = \Omega_x\vec{i} + \Omega_y\vec{j} + \Omega_z\vec{k} \approx \Omega_z\vec{k} = (\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y})\vec{k},$$

и его компоненты Ω_x, Ω_y будут малыми:

$$\Omega_x = \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}\right) \sim \Omega_y = \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}\right) \sim \varepsilon.$$

Тогда вектор

$$\begin{aligned} rot\vec{V} \times \vec{V} = \vec{\Omega} \times \vec{V} = (w \cdot \Omega_y - v \cdot \Omega_z)\vec{i} + (u \cdot \Omega_z - w \cdot \Omega_x)\vec{j} + \\ + (v \cdot \Omega_x - u \cdot \Omega_y)\vec{k} \approx -v \cdot \Omega_z \cdot \vec{i} + u \cdot \Omega_z \cdot \vec{j} \end{aligned} \qquad (7.102)$$

практически лежит в горизонтальной плоскости. Кроме того малые значения величин Ω_x, Ω_y фактически означают, что вертикальные градиенты скорости ветра $\partial u/\partial z$, $\partial v/\partial z$ в приземном слое городского лабиринта также малы. Очевидно, что это является следствием активного влияния на поток ветра в городском лабиринте сил

сопротивления каркаса, направление действия которых также преимущественно горизонтально.

Но, с другой стороны, мы должны учитывать то обстоятельство, что городской лабиринт это все-таки не пласт водоносного грунта, а его атмосфера является нижней частью пограничного слоя атмосферы Земли [46, 103], для которого, как отмечалось ранее, в случае относительно равной и однородной подстилающей поверхности справедливо соотношение (7.87) о существенном превышении вертикальных градиентов скорости ветра над горизонтальными. В связи с этим вывод фильтрационной аналогии про малость величин $\partial u/\partial z, \partial v/\partial z$ в приземном слое атмосферы городского лабиринта вызывает **некоторое сомнение**, поскольку поля этих величин в городском лабиринте неоднородные. В действительности, если ветер дует вдоль улицы, которая с боков ограждена высотной застройкой, то вдоль этой улицы силы сопротивления каркаса отсутствуют и справедливо соотношение (7.87), а если ветер направлен поперек улицы, то силы сопротивления действуют и величины $\partial u/\partial z, \partial v/\partial z$ уменьшаются. **В среднем же**, если взять во внимание разнообразные направления улиц города и приблизительную равномерность распределения сил сопротивления каркаса в объеме городского лабиринта, то **по нашему мнению**, в приземном слое атмосферы городского лабиринта порядок величин вертикальных и горизонтальных градиентов скорости ветра будет приблизительно одинаковым, то-есть

$$\left\{\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z}\right\} \approx \left\{\frac{\partial u}{\partial x}; \frac{\partial u}{\partial y}; \frac{\partial v}{\partial x}; \frac{\partial v}{\partial y}\right\} \approx O(1). \qquad (7.103)$$

Что же касается вертикальной составляющей скорости ветра W, то она, как с точки зрения фильтрационной аналогии, так и с точки зрения теории пограничного слоя атмосферы [46, 103] считаются малой величиной и в уравнении (7.97) мы будем отбрасывать члены, которые содержат w, w^2, $\partial w/\partial t, \partial w/\partial x$, $\partial w/\partial y$, кроме члена $\partial w/\partial z$ в уравнении неразрывности (7.98) и членов $(w\partial T/\partial z)$, $(w\partial\varphi/\partial z)$ в уравнениях (7.100), (7.1017). Они имеют порядок единицы, поскольку поля температуры и концентрации примесей в атмосфере приземного слоя городского лабиринта в меньшей мере под-

даются влиянию характера застройки, чем поле скоростей ветра (силы сопротивления каркаса влияют на них лишь побочно).

Исходя со всего сказанного, соотношение (103) необходимо записать в виде:

$$rot\vec{V}\times\vec{V}=-v\cdot(\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial y})\vec{i}+u(\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial y})\vec{j}-(u\frac{\partial u}{\partial z}+v\cdot\frac{\partial v}{\partial z})\vec{k}\ . \qquad (105)$$

Следует сказать, что соотношения (7.104) справедливое только в приземном слое атмосферы городского лабиринта, при $0\le z\le h$, а в верхней части пограничного слоя атмосферы, при $z>h$, справедливо соотношение (7.102), поскольку там горизонтальные градиенты скорости ветра $\partial u/\partial x$; $\partial u/\partial y$; $\partial v/\partial x$; $\partial v/\partial y$ больше чем вертикальные $\partial u/\partial z$, $\partial v/\partial z$ [104, 38].

В уравнении переноса тепла (7.100) и загрязняющих примесей (7.101) присутствуют диффузионные члены:

$$m\cdot div\left[\left(\frac{\nu}{\Pr}+\frac{\nu^T}{\Pr}\right)\nabla T\right];\ m\cdot div\left[\nu_\varphi+\nu_\varphi^T\right].$$

В приземном слое атмосферы городского лабиринта диффузионное перенесение тепла и загрязняющих примесей имеет преимущественно вертикальный характер (по причине открытости верхней свободной границы). В горизонтальных направлениях, при наличии твердого каркаса, конвективный перенос тепла и загрязняющих примесей будет перевешивать диффузионный перенос. Тогда, приближенно можно считать:

$$m\cdot div\left[\left(\frac{\nu}{\Pr}+\frac{\nu^T}{\Pr}\right)\nabla T\right]\approx m\cdot\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\frac{\nu}{\Pr}+\frac{\nu^T}{\Pr}\right)\frac{\partial T}{\partial z}\right];$$
$$m\cdot div\left[\left(\nu_\varphi+\nu_\varphi^T\right)\nabla\varphi\right]\approx m\cdot\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\nu_\varphi+\nu_{\varphi z}^T\right)\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right]. \qquad (7.105)$$

Такая точка зрения согласуется и с концепцией пограничного слоя атмосферы над подстилающей поверхностью со сравнительно ровным рельефом [38, 104], где вертикальная составляющая диффузии значительно больше чем горизонтальная составляющая.

В уравнениях (7.100), (7.101) имеющиеся члены:

$$\frac{m^2}{\rho C_p}\dot{Q}^*;\ m^2\dot{M}^*,$$

которые учитывают приток (уменьшение) тепла и загрязняющих примесей за счет действия внутренних источников (стоков). Очевидно, что приток тепла и загрязнений от действия внутренних источников ни коим образом не зависит от характера застройки, то-есть от параметра m .В действительности, автомобиль выбрасывает одинаковое количество выхлопных газов независимо от того, движется он по улице большого города, или, с такой же скоростью, по загородной автотрассе. Таким образом:

$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{m^2}\ ;\ \dot{M}^* = \frac{\dot{M}}{m^2}\ , \tag{7.106}$$

где $\dot{Q}$ (кДж/м^{3}сек), $\dot{M}$ (кг/ м^{3}сек) – фильтрационные значения удельной скорости прироста тепла и загрязняющей примеси от работы внутренних источников.

Учитывая все выше сказанное и соотношения (7.104) – (7.106), системы уравнений (7.97) – (7.101) запишем в проекциях на оси декартовой системы координат $Oxyz$:

$$\begin{cases} m\dfrac{\partial u}{\partial t} + (m^2 g)\dfrac{\partial h_{нп}}{\partial x} - \nu(\dfrac{\partial v}{\partial x} - \dfrac{\partial u}{\partial y}) = -(m^2 g)\left[Bu\sqrt{u^2+v^2}\right]; \\ m\dfrac{\partial v}{\partial t} + (m^2 g)\dfrac{\partial h_{нп}}{\partial y} + u(\dfrac{\partial v}{\partial x} - \dfrac{\partial u}{\partial y}) = -(m^2 g)\left[Bv\sqrt{u^2+v^2}\right]; \\ (m^2 g)\dfrac{\partial h_{нп}}{\partial z} - \dfrac{\partial}{\partial z}(\dfrac{u^2+v^2}{2}) = -(m^2 g)[\beta\Delta T]; \\ \dfrac{\partial u}{\partial x} + \dfrac{\partial v}{\partial y} + \dfrac{\partial w}{\partial z} = 0; \\ m\left[1+\left(\dfrac{\rho_1 C_1}{\rho C_p}\right)\right]\dfrac{\partial T}{\partial t} + u\dfrac{\partial T}{\partial x} + v\dfrac{\partial T}{\partial y} + w\dfrac{\partial T}{\partial z} = m\dfrac{\partial}{\partial z}\left[\left(\dfrac{\nu}{\mathrm{Pr}} + \dfrac{\nu^T}{\mathrm{Pr}^T}\right)\dfrac{\partial T}{\partial z}\right] + \dfrac{\dot{Q}}{\rho C_p}; \\ m\dfrac{\partial \varphi}{\partial t} + u\dfrac{\partial \varphi}{\partial x} + v\dfrac{\partial \varphi}{\partial y} + (w - w_g)\dfrac{\partial \varphi}{\partial z} = m\dfrac{\partial}{\partial z}\left[\left(\nu_\varphi + \nu^T_{\varphi z}\right)\dfrac{\partial \varphi}{\partial z}\right] - m\sigma\varphi + \dot{M}, \end{cases} \tag{7.107}$$

где

$$h_{нп} = \frac{u^2+v^2}{2(m^2 g)} + \frac{p-p_0}{m\gamma} + z\ ,\ \gamma = \rho g$$

$$\Delta T = T - T_0(x,y,t)\ ;$$

$$\nu^T = k_1\left(\frac{z}{z_1}\right),\ \ k_1 = (0{,}1 \div 0{,}2)\ ;\ (\text{м}^2/\text{сек})$$

$$\nu_{\varphi z}^{T} = k_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^b, \; b = (0{,}8 \div 1{,}2) \, ;$$

w_g (м/сек) – скорость оседания тяжелых примесей (пыль).

Легко заметить, что, если выражение для $h_{нп}$ подставить в третье уравнение системы (7.107), получим уравнение относительно давления:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{p - p_0}{\rho} \right) = -mg\left[1 + (\beta \Delta T)\right]. \qquad (7.108)$$

<u>Начальные и граничные условия.</u>

Начальные условия.

В начальный момент времени t=0 должны быть заданы начальные поля всех искомых величин:

$$u = u^0(x, y, z); \; v = v^{(0)}(x, y, z); \; w = w^{(0)}(x, y, z);$$
$$h_{нп} = h_{нп}{}^{(0)}(x, y, z); \; T = T^{(0)}(x, y, z); \; \varphi = \varphi^{(0)}(x, y, z), \text{ при t=0.} \qquad (7.109)$$

Граничные условия.

По вертикальной координате z система уравнений (7.107) является нелинейной системой дифференциальных уравнений первого порядка для функций u, v, w, $h_{нп}$ и системой второго порядка для функций T, φ, а для горизонтальных координат – системой уравнений первого порядка для всех искомых функций, кроме w.

На подстилающей поверхности городского лабиринта z=0 имеем следующие граничные условия:

$$u = v = w = h_{нп} = 0; \; T = T_0(x, y, t); \; \varphi = \varphi_0(x, y, t) \text{ при z=0,} \qquad (7.110)$$

где функции $T_0(x, y, t)$, $\varphi_0(x, y, t)$ должны удовлетворять условиям теплового баланса и баланса вещества:

$$m\left[\rho_2 C_2 \left(a_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \right) - R_0 \right]\Bigg|_{z=0} = \rho C_p \left[\left(\frac{\nu}{\Pr} + \frac{\nu^T}{\Pr} \right) \frac{\partial T}{\partial z} \right]\Bigg|_{z=0}; \qquad (7.111)$$

$$\left(\lambda_\varphi - w_g\right)\varphi\Big|_{z=0} = \left(\nu_\varphi + \nu_{\varphi z}^{T}\right)\frac{\partial \varphi}{\partial z}\Bigg|_{z=0}. \qquad (7.112)$$

Здесь: $T_2(x, y, z, t)$ – поле температуры в поверхностных слоях грунта; ρ_2, C_2, $a_2 = \lambda_2 / \rho_2 C_2$ – плотность, удельная теплоемкость, коэффициент температуропроводности грунта; R^0 –

радиационный баланс подстилающей поверхности городского лабиринта (ккал/м^{2}сек); λ_φ (м/сек) – скорость поглощения подстилающей поверхностью загрязняющих примесей.

Отметим, что в городских условиях [46], легкие загрязняющие примеси обычно слабо взаимодействуют с поверхностной средой земли. Попав на нее, примеси не накапливаются, а с турбулентным течением воздуха опять поднимаются в атмосферу. Поэтому можно считать, что средний турбулентный поток легких $(w_g = 0)$ примесей возле поверхности земли малый и условия (7.112) принимает вид:

$$\left(\nu_\varphi + \nu_{\varphi z}^T\right)\frac{\partial \varphi}{\partial z}\bigg|_{z=0} \approx 0. \qquad (7.113)$$

Что же касается радиационного баланса R^0, то его определение в условиях города – задача сложная. Но в случае сравнительно ровной и однородной подстилающей поверхности радиационный баланс рассчитывается по формуле:

$$R_0 = I \cdot (1 - \overline{A}) - F\,, \qquad (7.114)$$

где I – суммарная коротковолновая прямая и рассеянная радиация; $\overline{A}$ – альбедо подстилающей поверхности; F – эффективное длинноволновое излучение поверхности.

На верхней границе приземного слоя атмосферы городского лабиринта $z = h(x, y, t)$ выполняются условия совпадения функций $T(x, y, z, t)$ и $\varphi(x, y, z, t)$ с соответственными функциями в верхней части пограничного слоя атмосферы при $z > h$:

$$\begin{gathered} T_h(x, y, h, t) = T_H(x, y, h, t)\,; \\ \varphi_h(x, y, h, t) = \varphi_H(x, y, h, t), \text{ при } z = h(x, y, t); \end{gathered} \qquad (7.115)$$

где индексы «h» и «H» обозначают соответствующие функции в приземном слое и выше, чем расположен приземный слой; динамические условия для давления:

$$p_h(x, y, h, t) = p_H(x, y, h, t), \text{ при } z = h(x, y, t) \qquad (7.116)$$

кинематические условия:

$$\vec{n} \cdot \vec{V}(x, y, h, t) = mD_n(x, y, h, t)\,, \qquad (7.117)$$

где $\vec{n}$ – нормаль к поверхности $z = h(x, y, t)$, а $D_n = -\dfrac{\dfrac{\partial h}{\partial t}}{\sqrt{1+\left(\dfrac{\partial h}{\partial x}\right)^2+\left(\dfrac{\partial h}{\partial y}\right)^2}}$ – скорость перемещения поверхности $h(x, y, t)$ в направлении нормали.

Во время записи граничных условий вдали от территории городского лабиринта, при $x^2 + y^2 \to \infty$, будем исходить из тех допущений, что там подстилающая поверхность сравнительно ровная и однородная, без существенных орографических и температурных отклонений. Тогда в бесконечности справедливы граничные условия гладкости:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial h_{нп}}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0;$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\partial h_{нп}}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0 \text{ , при } x^2 + y^2 \to \infty \text{ .} \tag{7.118}$$

Как уже отмечалось ранее, пограничным слоем атмосферы городского лабиринта мы будем называть верхнюю часть пограничного слоя атмосферы Земли $h \le z \le H$, которая находится над территорией лабиринта, а в ее границах четко проявляется влияние подстилающей поверхности лабиринта на распределение метеорологических величин. Согласно одному из определений пограничного слоя атмосферы [46], на высоте $z = H$ скорость ветра достигает скорости геострофического ветра, которая в свою очередь определяется горизонтальным градиентом атмосферного давления.

Если в приземном слое атмосферы Земли, до уровня $z = h$, над относительно ровной поверхностью остаются постоянными по высоте напряжения трения τ и поток тепла q (7.86) (который в случае равновесной стратификации атмосферы соответствует логарифмическому по высоте профилю как скорости ветра, так и температуры), то при $z > h$ под действием силы Кориолиса и переменном напряжении трения и потока тепла по высоте, профиль скорости ветра и температуры отличны от логарифмического. В соответствии с некоторыми моделями, и за пределами приземного слоя атмосферы, вертикальный коэффициент турбулентного обмена $\nu_{z\varphi}^{T} = k_1 (z/z_1)^b$ продолжает расти с ростом высоты z при неустойчи-

вых (конвективных) состояниях атмосферы. А при безразличном (равновесном) состоянии и инверсии он уменьшается. Понятно, что в общем случае нельзя предполагать, что $\nu_{z\varphi}^{T}$ по высоте бесконечно растет или уменьшается до нуля.

Вместе с тем, для расчета приземных концентраций загрязняющих примесей часто нет необходимости брать во внимание детальное изменение $\nu_{z\varphi}^{T}$ по высоте за пределами приземного слоя $z > h$. На основе этого достаточно приемлемой для многих задач является модель коэффициента турбулентного обмена, согласно которой $\nu_{z\varphi}^{T}$ растет по высоте в приземном слое $z \le h$, и **в среднем** остается постоянным в пограничном слое $z > h$:

$$\nu_{\varphi z}^{\mathrm{T}} = \begin{cases} k_1 \left(\dfrac{z}{z_1} \right)^b, & \textit{при } z \le h; \\ k_1 \left(\dfrac{h}{z_1} \right)^b, & \textit{при } z > h, \end{cases} \tag{7.119}$$

где $b = (0{,}8 \div 1{,}0)$ – для инверсии и равновесного состояния;
$b = (1{,}0 \div 1{,}2)$ – для неустойчивого состояния атмосферы.

Известно также, что при $z > h$ вертикальные градиенты скорости ветра $\partial u/\partial z$, $\partial v/\partial z$ умерено уменьшаются по высоте. Это дало возможность многим авторам [46] при решении практических задач распространить указанную идею на поле скоростей ветра:

$$u(z) = \begin{cases} u_1 \left(\dfrac{z}{z_1} \right)^n, & \text{при } z \le h; \\ u_1 \left(\dfrac{h}{z_1} \right)^n, & \text{при } z > h. \end{cases} \tag{7.120}$$

Исходя из всего вышесказанного, мы считаем, что математической моделью распространения загрязняющих примесей в пограничном слое атмосферы городского лабиринта может быть модель пограничного слоя атмосферы Земли [46, 103], с учетом (7.119), поскольку при $z > h$ силы сопротивления городского лабиринта отсутствуют ($m = 1$; $B = 0$), а влияние именно городского лабиринта на

характер течения воздуха при $z > h$ будет учтен через граничные условия при $z = h(x, y, t)$.

Имеем:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u}{\partial t} + u\dfrac{\partial u}{\partial x} + v\dfrac{\partial u}{\partial y} + w\dfrac{\partial u}{\partial z} = -\dfrac{\partial}{\partial x}\left(\dfrac{p}{\rho}\right) + \nu^T(h)\dfrac{\partial^2 u}{\partial z^2} + fv; \\ \dfrac{\partial v}{\partial t} + u\dfrac{\partial v}{\partial x} + v\dfrac{\partial v}{\partial y} + w\dfrac{\partial v}{\partial z} = -\dfrac{\partial}{\partial y}\left(\dfrac{p}{\rho}\right) + \nu^T(h)\dfrac{\partial^2 v}{\partial z^2} - fu; \\ \dfrac{\partial}{\partial z}\left(\dfrac{p}{\rho}\right) = -g\left[1 + (\beta\Delta T)\right]; \\ \dfrac{\partial u}{\partial x} + \dfrac{\partial v}{\partial y} + \dfrac{\partial w}{\partial z} = 0; \\ \dfrac{\partial T}{\partial t} + u\dfrac{\partial T}{\partial x} + v\dfrac{\partial T}{\partial y} + w\dfrac{\partial T}{\partial z} = \dfrac{\nu^T(h)}{\mathrm{Pr}^T}\cdot\dfrac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dfrac{\dot{Q}}{\rho C_p}; \\ \dfrac{\partial \varphi}{\partial t} + u\dfrac{\partial \varphi}{\partial x} + v\dfrac{\partial \varphi}{\partial y} + w\dfrac{\partial \varphi}{\partial z} = \nu^T_{\varphi z}(h)\dfrac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} - \sigma\varphi + \dot{M}, \end{cases} \tag{7.121}$$

где: $f = 2\omega_0 \cdot \sin\psi$ (сек$^{-1}$) – параметр Кориолиса, $\nu^T(h) = k_1\left(\dfrac{h}{z_1}\right)$, $\nu^T_{z\varphi}(h) = k_1\left(\dfrac{h}{z_1}\right)^P$, $\omega_0 = 2\pi/86164$, ψ – широта местности.

Начальные и граничные условия.

Рассмотрим **начальные условия.**

В начальный момент времени $t = 0$ должны быть заданы все начальные поля искомых величин:

$$\begin{gathered} u = u^{(0)}(x, y, z);\ v = v^{(0)}(x, y, z); \\ w = w^{(0)}(x, y, z);\ p = p^{(0)}(x, y, z); \\ T = T^{(0)}(x, y, z);\ \varphi = \varphi^{(0)}(x, y, z). \end{gathered} \tag{7.122}$$

Граничные условия.

По вертикальной координате z система уравнений (7.121) есть нелинейная система дифференциальных уравнений второго порядка для всех искомых функций, кроме давления и вертикальной ско-

рости w, а по горизонтальным – система уравнений первого порядка для всех искомых функций, кроме w.

На границе приземного и пограничных слоев выполняются условия совпадения функций:

$$\begin{gathered} u_h(x,y,h,t) = u_H(x,y,h,t);\ v_h(x,y,h,t) = v_H(x,y,h,t); \\ w_h(x,y,h,t) = w_H(x,y,h,t);\ P_h(x,y,h,t) = P_H(x,y,h,t); \\ T_h(x,y,h,t) = T_H(x,y,h,t);\ \varphi_h(x,y,h,t) = \varphi_H(x,y,h,t), \\ \text{при } z = h(x,y,t) \end{gathered} \tag{7.123}$$

На верхней границе пограничного слоя $z = H(x,y,t)$ выполняется условие совпадения искомых функций с соответственными функциями в зоне геострофического ветра при $z > H$:

$$\begin{gathered} u_H(x,y,H,t) = u_{гс}(x,y,H,t);\ v_H(x,y,H,t) = v_{гс}(x,y,H,t); \\ T_H(x,y,H,t) = T_{гс}(x,y,H,t);\ \frac{\partial \varphi}{\partial z} \to 0, \quad \text{при } z = H(x,y,t), \end{gathered} \tag{7.124}$$

где компоненты геострофического ветра $u_{гс}$, $u_{гс}$ и геострофическая температура $T_{гс}$ должны быть заданы. Кроме того, в общем случае, необходимо задавать при $z = H(x,y,t)$ кинематическое условие:

$$\vec{V} \cdot \vec{n} = -\frac{\dfrac{\partial H}{\partial t}}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{\partial H}{\partial x}\right)^2 + \left(\dfrac{\partial H}{\partial y}\right)^2}}, \tag{7.125}$$

где $\vec{n}$ – нормаль к поверхности $z = H(x,y,t)$.

Отметим, что задать функции $u_{ГС}(x,y,H,t)$; $v_{ГС}(x,y,H,t)$; $T_{ГС}(x,y,H,t)$ непросто, вследствие не всегда прогнозированного состояния атмосферы в зоне $z > H$, поэтому много авторов выполняют условие:

$$\frac{\partial u}{\partial z} \to 0;\ \frac{\partial v}{\partial z} \to 0, \text{ при } z \to H(x,y,t) \tag{7.126}$$

Вдали от территории городского лабиринта, при $x^2 + y^2 \to \infty$, выполняются граничные условия сглаживания:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u}{\partial x} = \dfrac{\partial v}{\partial x} = \dfrac{\partial w}{\partial x} = \dfrac{\partial p}{\partial x} = \dfrac{\partial T}{\partial x} = \dfrac{\partial \varphi}{\partial x} = 0\,; \\ \dfrac{\partial u}{\partial y} = \dfrac{\partial v}{\partial y} = \dfrac{\partial w}{\partial y} = \dfrac{\partial p}{\partial y} = \dfrac{\partial T}{\partial y} = \dfrac{\partial \varphi}{\partial y} = 0\,, \end{cases} \tag{7.127}$$

которые фактически означают, что в бесконечности искомые функции приближаются к своим фоновым значениям.

Системы нелинейных дифференциальных уравнений (7.107), (7.121) с начальными и граничными условиями (7.109) – (119), (7.122) – (7.127) представляют собой законченную математическую модель распространений загрязняющих примесей в атмосфере городского лабиринта. Следует отметить, что математическая модель была разработана для случая плоской подстилающей поверхности $z = 0$. Если же она орографически неоднородная и описывается уравнением:

$$z = F(x, y)\,,$$

то в системах уравнений (7.107), (7.121) и в граничных условиях необходимо перейти к новым переменным:

$$x' = x;\quad y' = y;\ z' = \frac{z - F(x, y)}{H - F(x, y)},\ \text{где}\ 0 \le z' \le 1$$

Коэффициент силы сопротивления городского лабиринта B (сек/м^2), который фигурирует в первых двух уравнениях системы (7.107), согласно теории фильтрации [27], должен быть определен экспериментально. Но, вполне понятно, что в отличии от грунтов, организовать и провести пробные экспериментальные испытания для городского лабиринта очень трудно. Однако эксперименты по определению силы сопротивления одного отдельно взятого здания при обтекании ее потоком ветра проводились и проводятся. Как пример, можно привести работу американских ученых [209], а также [8].

Возникает вопрос – можно ли, зная коэффициент силы сопротивления одного отдельно взятого здания, определить коэффициент силы сопротивления всего городского лабиринта? Приблизительно это можно сделать следующим способом. Пусть нам известна величина среднего коэффициента силы сопротивления C_{XD} одного отдельно взятого здания городского лабиринта при его обтекании по-

током ветра, отнесенная к скорости напора и **средней** величине площади вертикального миделя:

$$C_{XD} = \frac{\left|\Delta\vec{R}_D\right|}{\frac{1}{2}\rho V^2 S_{MD}},$$

где $\Delta\vec{R}_D$ – главный вектор силы сопротивления одного отдельно взятого здания городского лабиринта; $S_{MD} \approx l_{cp}h$ – средняя площадь вертикального миделя здания; l_{cp} – средний характерный горизонтальный размер здания.

Выделим элементарный объем $d\tau_h = dx \cdot dy \cdot h$ городского лабиринта (рис. 7.2). Тогда приблизительно можно считать, что главный вектор силы сопротивления выделенного объема $d\tau_h$ будет равняться:

$$\Delta\vec{R} \approx N \cdot \Delta\vec{R}_D,$$

где N – количество зданий в объеме $d\tau_h$. Очевидно, что количество зданий в объеме $d\tau_h$ будет равняться отношению объема его каркаса $(1-m)d\tau_h$ к среднему объему одного отдельно взятого здания $l_{cp}{}^2 h$, то-есть:

$$N = \frac{(1-m)d\tau_h}{l_{cp}{}^2 h}.$$

Тогда плотность силы сопротивления $\vec{R}$, равна отношению главного вектора $\Delta\vec{R}$ к массе воздуха в объеме $d\tau_h$, будет равна:

$$\vec{R} = \frac{\Delta\vec{R}}{m\rho d\tau_h} = \frac{N \cdot \Delta\vec{R}_D}{m\rho d\tau_h} = \frac{(1-m)}{m\rho \cdot l_{cp}{}^2 h}\Delta\vec{R}_D.$$

Учитывая, что

$$\Delta\vec{R}_D = -\frac{1}{2}\rho V^2 S_{MD} C_{XD}\vec{S}^0 = -\frac{1}{2}\rho V^2 l_{cp} h C_{XD}\vec{S}^0,$$

где $\vec{S}^0 = \vec{V}/\left|\vec{V}\right|$ – единичный орт касательной к линии тока, получим:

$$\vec{R} = -\frac{(1-m)V^2 C_{XD}}{2ml_{cp}}\vec{S}^0.$$

Но, с другой стороны, согласно (7.96)

$$\vec{R} = -gB\left|\vec{V}\right|\vec{V}\,.$$

Тогда имеем:

$$gB\left|\vec{V}\right|\vec{V} \approx \frac{(1-m)V^2 C_{XD}}{2ml_{cp}}\vec{S}^0\ ,$$

Если перемножить скалярно обе части этого равенства на вектор $\vec{S}^0$, получим приближенное выражение для определения коэффициента силы сопротивления городского лабиринта:

$$B \approx \frac{(1-m)}{2mgl_{cp}} C_{XD}. \tag{7.128}$$

7.4 Численные методы решения задачи переноса загрязнений в городской атмосфере

Как указывалось раньше, в работе [84], для расчета поля скоростей ветра в условиях городской атмосферы предлагается использовать потенциальную теорию и решать уравнение Лапласа. Там же, в [84], для численного интегрирования уравнения переноса загрязнений предложены эффективные неявные попеременно-треугольные разностные схемы (четырехшаговая и пятишаговая по времени).

При помощи уравнения неразрывности (7.39) преобразуем уравнение (7.41) к виду:

$$\begin{aligned}&\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \frac{\partial u\varphi}{\partial x} + \frac{\partial v\varphi}{\partial y} + \frac{\partial w\varphi}{\partial z} + \sigma\varphi = \\ &= \frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_x^T \frac{\partial\varphi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_y^T \frac{\partial\varphi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_z^T \frac{\partial\varphi}{\partial z}\right) + q^*\ .\end{aligned} \tag{7.129}$$

Для численного интегрирования уравнения (7.129) [84] предлагается пятишаговая (по времени) попеременно-треугольная разностная схема. Для примера, мы рассмотрим четырехшаговую (по времени) попеременно-треугольную разностную схему для численного интегрирования двумерного уравнения переноса загрязнения. Перенос загрязнения можно считать двумерным, если в направлении оси *Oy* рельеф городской территории однородный и вектор скорости ветра лежит в плоскости *Oxz*. Задача формулируется так: в

некоторой прямоугольной области $G=\{0\le x\le X,\,0\le z\le H\}$, что моделирует участок городской территории и содержит источник атмосферных загрязнений, необходимо найти решение системы уравнений

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\varphi}{\partial t}+\dfrac{\partial u\varphi}{\partial x}+\dfrac{\partial w\varphi}{\partial z}+\sigma\varphi=\dfrac{\partial}{\partial x}\left(\nu_x\dfrac{\partial\varphi}{\partial x}\right)+\\ +\dfrac{\partial}{\partial z}\left(\nu_z\dfrac{\partial\varphi}{\partial z}\right)+\sum\limits_{i=1}^{N}q_i(t)\cdot\delta(\vec{r}-\vec{r}_i(t)); & (7.130)\\ \dfrac{\partial^2\Phi}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2\Phi}{\partial y^2}=0,\ u=\dfrac{\partial\Phi}{\partial x},\ w=\dfrac{\partial\Phi}{\partial z}, & (7.131)\end{cases}$$

для промежутка времени $0\le t\le T$. Индекс «*T*» в обозначениях коэффициентов турбулентного обмена отброшено для простоты восприятия. Область *G* имеет вид (рис. 7.3):

Рис. 7.3 Расчетная область существования решения задачи (7.130), (7.131) в плоскости $y=const$

Форма земной поверхности городской и пригородной застройки в области *G* представлена кусочно-постоянной функцией вида $\{z=z_i=const$, для координаты *x*, которая принадлежит разностной границе (i,j) в области *G* (рис. 7.3). Начальные и граничные условия для системы уравнений (7.130), (185) следующие: условия (7.42), (7.43) – для концентрации загрязнений примеси; условия (7.76), (7.77) – для потенциала скорости (с учетом того, что координата *y* отсутствует).

Сначала построим абсолютно устойчивую неявную разностную схему для численного решения уравнения (7.130) в области *G*, для промежутка времени $0\le t\le T$, считая, что поле скоростей ветра u,w задано. Построим равномерную прямоугольную расчетную сетку, которая покрывает всю область *G*, и промежуток времени [0;

T], с шагами $\Delta x, \Delta z, \Delta t$. Неизвестные значения концентрации загрязняющей примеси φ будем определять на каждом слое по времени в центре разностной ячейки (i, j), а компоненты скорости ветра u, w – на сторонах решеток $(i,\ j+1/2), (i+1/2,\ j)$.

Производную по времени в уравнении (7.130)аппроксимируем разделенной разницей

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} \approx \frac{\varphi_{ij}^{n+1} - \varphi_{ij}^{n}}{\Delta t}, \tag{7.132}$$

где n – номер слоя по времени.

Выделим в конвективных производных составляющие однонаправленного переноса загрязнений в каждой расчетной границе и запишем их в виде:

$$\frac{\partial u\varphi}{\partial x} = \frac{\partial u^{+}\varphi}{\partial x} + \frac{\partial u^{-}\varphi}{\partial x}; \tag{7.133}$$

$$\frac{\partial w\varphi}{\partial z} = \frac{\partial w^{+}\varphi}{\partial z} + \frac{\partial w^{-}\varphi}{\partial z}; \tag{7.134}$$

где

$$u^{+} = \frac{1}{2}(u + |u|); u^{-} = \frac{1}{2}(u - |u|); w^{+} = \frac{1}{2}(w + |w|); w^{-} = \\ = \frac{1}{2}(w - |w|). \tag{7.135}$$

Индекс «+» означает, что поток загрязнения, который втекает в ячейку, направлен по оси координат, индекс «–» – в противоположном направлении. С учетом (7.135) аппроксимируем конвективные производные разделенными разностями на верхнем временном слое:

$$\frac{\partial u^{+}\varphi}{\partial x} \approx \frac{u^{+}_{i+1,j} \cdot \varphi^{n+1}_{i,j} - u^{+}_{i,j} \cdot \varphi^{n+1}_{i-1,j}}{\Delta x} = L^{+}_{x}\varphi^{n+1};$$

$$\frac{\partial u^{-}\varphi}{\partial x} \approx \frac{u^{-}_{i+1,j} \cdot \varphi^{n+1}_{i+1,j} - u^{-}_{i,j} \cdot \varphi^{n+1}_{i,j}}{\Delta x} = L^{-}_{x}\varphi^{n+1};$$

$$\frac{\partial w^{+}\varphi}{\partial z} \approx \frac{w^{+}_{i,j+1} \cdot \varphi^{n+1}_{i,j} - w^{+}_{i,j} \cdot \varphi^{n+1}_{i,j-1}}{\Delta z} = L^{+}_{z}\varphi^{n+1}; \qquad (7.136)$$

$$\frac{\partial w^{-}\varphi}{\partial z} \approx \frac{w^{-}_{i,j+1} \cdot \varphi^{n+1}_{i,j+1} - w^{-}_{i,j} \cdot \varphi^{n+1}_{i,j}}{\Delta z} = L^{-}_{z}\varphi^{n+1}.$$

Компоненты скорости u определяются на вертикальных гранях разностных решеток, а компоненты скорости w – на горизонтальных гранях. Индексы этих граней соответствуют индексам решеток, расположенных справа или выше относительно соответственной грани.

Вторые производные аппроксимируем следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_x \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right) \approx \tilde{\nu}_{2x} \cdot \frac{\varphi^{n+1}_{i+1,j} - \varphi^{n+1}_{i,j}}{\Delta x^2} - \tilde{\nu}_{1x} \cdot \frac{\varphi^{n+1}_{i,j} - \varphi^{n+1}_{i-1,j}}{\Delta x^2} =$$

$$= M^{-}_{xx}\varphi^{n+1} + M^{+}_{xx}\varphi^{n+1}; \qquad (7.137)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_z \frac{\partial \varphi}{\partial z}\right) \approx \tilde{\nu}_{2z} \cdot \frac{\varphi^{n+1}_{i,j+1} - \varphi^{n+1}_{i,j}}{\Delta z^2} - \tilde{\nu}_{1z} \cdot \frac{\varphi^{n+1}_{i,j} - \varphi^{n+1}_{i,j-1}}{\Delta z^2} =$$

$$= M^{-}_{zz}\varphi^{n+1} + M^{+}_{zz}\varphi^{n+1}.$$

Здесь в (7.136) и (7.137) L^{+}_{x}, L^{-}_{x}, L^{+}_{z}, L^{-}_{z}, M^{-}_{xx}, M^{+}_{xx}, M^{-}_{zz}, M^{+}_{zz} – условные обозначения разностных операторов; $\tilde{\nu}_{1x}, \tilde{\nu}_{2x}, \tilde{\nu}_{1z}, \tilde{\nu}_{2z}$ – разностные коэффициенты турбулентного обмена

$$\tilde{\nu}_{1x} = \frac{\nu_x}{1 + \dfrac{u^{+} \cdot \Delta x}{\nu_x}}; \quad \tilde{\nu}_{2x} = \frac{\nu_x}{1 - \dfrac{u^{-} \cdot \Delta x}{\nu_x}};$$

$$\tilde{\nu}_{1z} = \frac{\nu_z}{1 + \dfrac{w^{+} \cdot \Delta z}{\nu_z}}; \quad \tilde{\nu}_{2z} = \frac{\nu_z}{1 - \dfrac{w^{-} \cdot \Delta z}{\nu_z}}. \qquad (7.138)$$

С учетом приведенных выше обозначений запишем разностные аналоги уравнения (7.130) в виде:

$$\frac{\varphi_{i,j}^{n+1}-\varphi_{i,j}^{n}}{\Delta t}+L_x^{+}\varphi^{n+1}+L_x^{-}\varphi^{n+1}+L_z^{+}\varphi^{n+1}+L_z^{-}\varphi^{n+1}+\sigma\varphi^{n+1}=$$
$$=\left(M_{xx}^{+}\varphi^{n+1}+M_{xx}^{-}\varphi^{n+1}+M_{zz}^{+}\varphi^{n+1}+M_{zz}^{-}\varphi^{n+1}\right)+q_{i,j}\cdot\delta_{ij}. \qquad (7.139)$$

Здесь δ_{ij} – число «1» или «0» (в зависимости от того, расположен, или не расположен в разностной границе (i, j) источник загрязнения). Значение

$$q_{i,j}=\frac{q_k}{\Delta x\cdot\Delta z},$$

равняется интенсивности q_k (кг/сек), соответственного k-го источника, расположенного в разностной ячейке (i, j), разделенной на площадь этой ячейки. Шаблон разностного уравнения (7.139) приведено на рис. 7.4, отсюда видно, что на верхнем временном слое $t=t^{n+1}$ используются неизвестные значения функции φ в пяти точках разностной сетки.

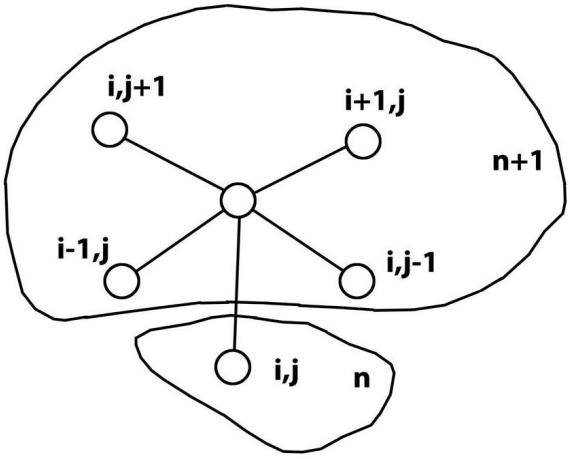


Рис. 7.4 Форма шаблона разностного уравнения (7.139)

В численных методах часто используется понятие расщепления единого сложного неявного разностного оператора на два более простых разностных оператора по направлениям x и y соответственно. Это позволяет создать эффективную схему вычисления сеточных функций. К примеру, можно использовать два шага по времени – $(n, n+1/2)$ и $(n+1/2, n+1)$.

В этом методе предлагается использовать четыре шага по времени $(n, n+1/4)$, $(n+1/4, n+1/2)$, $(n+1/2, n+3/4)$, $(n+3/4, n+1)$ и расщепить разностный оператор (7.139) на четыре разностных оператора так, чтоб на каждом шаге по времени учитывалось **только одно направление** переноса загрязнений, обусловленное (что оп-

ределяется) знаком при конвективной производной. В этом случае разностные уравнения имеют вид:

на первом шаге расщепления: $k = n + \frac{1}{4}; c = n$

$$\frac{\varphi_{ij}^{k} - \varphi_{ij}^{c}}{\Delta t} + \frac{1}{2}\left(L_x^{+}\varphi^{k} + L_z^{+}\varphi^{k}\right) + \frac{\sigma}{4}\varphi_{ij}^{k} = \\ = \frac{1}{4}\left(M_{xx}^{+}\varphi^{k} + M_{zz}^{+}\varphi^{k} + M_{xx}^{-}\varphi^{c} + M_{zz}^{-}\varphi^{c}\right) + \sum_{l=1}^{N}\frac{\overline{q}_l}{4}\delta_l; \tag{7.140}$$

на втором шаге расщепления: $k = n + \frac{1}{2}; c = n + \frac{1}{4}$

$$\frac{\varphi_{ij}^{k} - \varphi_{ij}^{c}}{\Delta t} + \frac{1}{2}\left(L_x^{-}\varphi^{k} + L_z^{-}\varphi^{k}\right) + \frac{\sigma}{4}\varphi_{ij}^{k} = \\ = \frac{1}{4}\left(M_{xx}^{-}\varphi^{k} + M_{zz}^{-}\varphi^{k} + M_{xx}^{+}\varphi^{c} + M_{zz}^{+}\varphi^{c}\right) + \sum_{l=1}^{N}\frac{\overline{q}_l}{4}\delta_l; \tag{7.141}$$

на третьем шаге расщепления: $k = n + \frac{3}{4}; c = n + \frac{1}{2}$

$$\frac{\varphi_{ij}^{k} - \varphi_{ij}^{c}}{\Delta t} + \frac{1}{2}\left(L_x^{+}\varphi^{k} + L_z^{-}\varphi^{k}\right) + \frac{\sigma}{4}\varphi_{ij}^{k} = \\ = \frac{1}{4}\left(M_{xx}^{+}\varphi^{k} + M_{zz}^{-}\varphi^{k} + M_{xx}^{-}\varphi^{c} + M_{zz}^{+}\varphi^{c}\right) + \sum_{l=1}^{N}\frac{\overline{q}_l}{4}\delta_l\ ; \tag{7.142}$$

на четвертом шаге расщепления: $k = n + 1; c = n + \frac{3}{4}$

$$\frac{\varphi_{ij}^{k} - \varphi_{ij}^{c}}{\Delta t} + \frac{1}{2}\left(L_x^{-}\varphi^{k} + L_z^{+}\varphi^{k}\right) + \frac{\sigma}{4}\varphi_{ij}^{k} = \\ = \frac{1}{4}\left(M_{xx}^{-}\varphi^{k} + M_{zz}^{+}\varphi^{k} + M_{xx}^{+}\varphi^{c} + M_{zz}^{-}\varphi^{c}\right) + \sum_{l=1}^{N}\frac{\overline{q}_l}{4}\delta_l. \tag{7.143}$$

В дискретном виде дельта-функция Дирака $\delta(x - x_i)$, $\delta(z - z_i)$ условно «размывается» на одну разностную ячейку так, чтоб сохранить суммарное количество q_i загрязняющего вещества, которое выбрасывается из всей площади разностной ячейки. В таком случае, в разностное уравнение входит значение $\overline{q}_l = q_i / \Delta x \cdot \Delta z$. Функция δ_l тождественно равна нулю во всех ячейках, кроме тех, где расположен источник выброса.

Необходимо отметить, что на каждом шаге расщепления приведенных выше разностных уравнений при аппроксимации других производных используется два временных слоя. На верхнем слое по времени вычисляется та часть разностных операторов, которая согласовывается с направлением разделенной разницы для конвективной производной. Вследствие односторонней аппроксимации конвективных производных, такой подход позволяет использовать значения неизвестной функции φ в трех разностных узлах на верхнем временном поясе для каждого шага расщепления. Форма шаблонов разностных уравнений (7.140) – (7.143) имеет вид (рис 7.5):

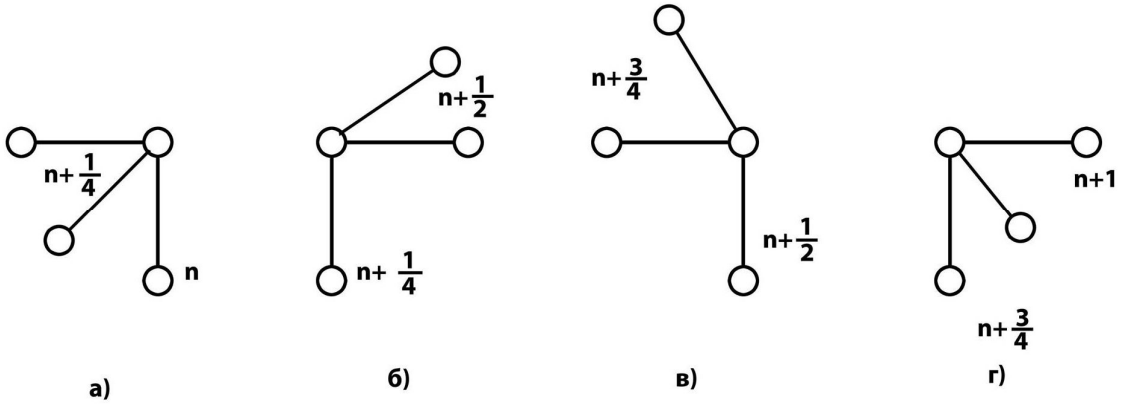


Рис. 7.5 Форма шаблонов разностных уравнений:
а) – (7.140); б) – (7.141); в) – (7.142); г) – (7.143)

Поскольку на каждом шаге расщепления шаблон разностных уравнений имеет треугольную форму на верхнем временном поясе, то для решения системы уравнений (7.140) – (7.143) нельзя применять метод прогонки, поскольку там требуется, чтоб шаблон был прямолинейный. Но в нашем случае неизвестные значения функции φ можно легко найти методом «бегущего счета», приводя систему линейных уравнений к треугольному виду путем извлечения Гаусса. На каждом шаге расщепления расчет начинается с определения угла расчетной области, и при этом учитывается только одно направление переноса загрязнений. Действительно, на первом шаге расщепления $n+1/4$ (7.140) учитываются только загрязнения, которые попадают снаружи сквозь стороны 1 и 4 разностной ячейки (рис. 7.6), а выходят из ячейки $(i,\ j)$ сквозь стороны 2 и 3. На втором шаге расщепления $n+1/2$, наоборот, учитываются загрязнения, которые вносятся в ту же самую ячейку сквозь стороны 2 и 3 и выходят сквозь стороны 1 и 4 и т.д.

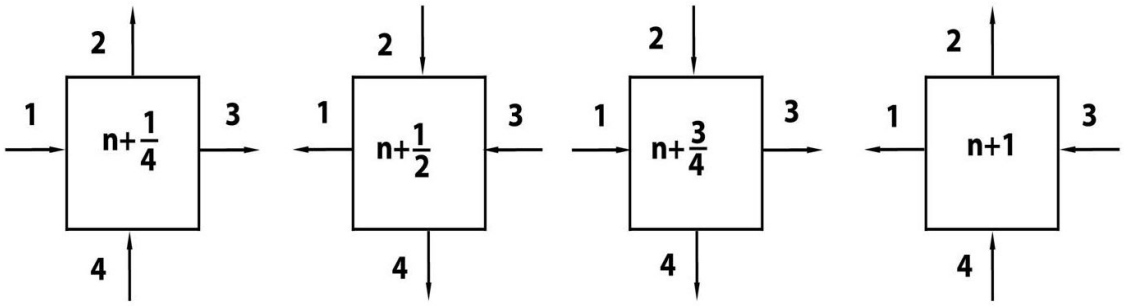


Рис. 7.6 Направление распространения загрязнений на каждом шаге расщепления

Построенная разностная схема (7.139), (7.140) – (7.143) представляет собой эффективный числовой алгоритм интегрирования исходного дифференциального уравнения (7.130) и абсолютно устойчива. Эту разностную схему можно сделать пятишаговой по времени, если к четырем чисто геометрических расщеплений, которые б учитывали изменение величины функции φ от действия иточников выбросов загрязнений

$$\frac{\overset{(5)}{\varphi}{}_{ij}^{n+1} - \overset{(5)}{\varphi}{}_{ij}^{n}}{\Delta t} = \sum_{l=1}^{N} \frac{q_l \cdot \delta_l}{\Delta x \cdot \Delta z}.$$

Можно показать, что существует аналогия, которая имеет место между численными итерационными процессами конечно-разностного решения стационарных задач и процессом численного конечно-разностного интегрирования нестационарных задач эволюционного типа с использованием, так называемого метода установления по времени (некоторое фиктивное время). Уравнение Лапласа (7.131), которое определяет потенциал скорости ветра в городе, при соответственных граничных условиях в области G – также есть стационарной задачей.

В [84] предложено конечно-разностный метод ее численного решения. Расчетная область G (рис 7.3) разбивается прямоугольной сеткой с шагом $\Delta x, \Delta z$, и в центрах разностных решеток (i, j) определяются значения потенциала скорости $\Phi_{i\,j}$. Для нахождения стационарного решения уравнения Лапласа (7.131) используется метод установления по фиктивной временной координате η, то-есть численно интегрируется нестационарное уравнение вида:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2}. \qquad (7.144)$$

При численном интегрировании (7.131) используется итерационный метод Гаусса-Зейделя, как вариант двушаговой по времени попеременно-треугольной разностной схемы определения решения уравнений (7.144).

На первом шаге расщепления разностное решение имеет вид

$$\frac{\Phi_{ij}^{\nu+\frac{1}{2}}-\Phi_{ij}^{\nu}}{\Delta\eta}=\left(\left(M_{xx}^{+}+M_{zz}^{+}\right)\Phi^{\nu+\frac{1}{2}}+\left(M_{xx}^{-}+M_{zz}^{-}\right)\Phi^{\nu}\right); \qquad (7.145)$$

на втором –

$$\frac{\Phi_{ij}^{\nu+1}-\Phi_{ij}^{\nu+\frac{1}{2}}}{\Delta\eta}=\left(\left(M_{xx}^{+}+M_{zz}^{+}\right)\Phi^{\nu+\frac{1}{2}}+\left(M_{xx}^{-}+M_{zz}^{-}\right)\Phi^{\nu+1}\right), \qquad (7.146)$$

где обозначено операторы разделенных разниц:

$$\begin{cases}\left(M_{xx}^{+}+M_{xx}^{-}\right)\Phi_{ij}=-\dfrac{\Phi_{ij}-\Phi_{i-1,j}}{\Delta x^2}+\dfrac{\Phi_{i+1,j}-\Phi_{ij}}{\Delta x^2};\\ \left(M_{zz}^{+}+M_{zz}^{-}\right)\Phi_{ij}=-\dfrac{\Phi_{ij}-\Phi_{i,j-1}}{\Delta z^2}+\dfrac{\Phi_{i,j+1}-\Phi_{ij}}{\Delta z^2},\end{cases} \qquad (7.147)$$

а ν - в данном случае номер итерации, которая соответствует номеру часового слоя фиктивного времени η. Шаблоны разностных схем (7.145), (7.147) имеют треугольную форму на верхнем треугольном слое (на первом шаге расщепления этот слой обозначается $\nu+1/2$, на втором шаге – $(\nu+1)$), что позволяет выяснить неизвестные значения потенциала скорости в трех точках из рекуррентных формул «бегущего счета». Индексы «+» и «-» соответствуют такому направлению потоков воздуха в расчетную ячейку (i,j), которые совпадают с направлениями осей координат или противоположны к ним, то-есть расщепление (7.145), (7.147) происходит по направлениям потоков воздуха в ячейку.

Реализация граничных условий непротекания (7.76) на гранях разностных решеток, которые ограничены твердой непроницаемой поверхностью земли, которая в условиях города имеет сложный рельеф (рис 7.3), сводится к заданию в соседних точках «фиктивных» значений потенциала скорости. Эти значения соответствуют условиям **зеркальной симметрии**, и идентифицировать грань ячейки, которая совпадает с непроницаемой поверхностью земли, помогают введенные маркеры. Так, если для соседней ячейки значение маркера равно 1, а для рассмотренной – 0, то грань, которая

разделяет эти ячейки, и является поверхностью земли, где следует использовать граничные условия непроницания или отражения.

По найденным значениям потенциала скорости в центре каждой разностной ячейки (i, j) на соответствующих гранях ячейки рассчитываются значения компоненты скорости движения воздуха (ветра):

$$u_{i+\frac{1}{2}, j} = \frac{\Phi_{i+1, j} - \Phi_{i, j}}{\Delta x};$$

$$w_{i, j+\frac{1}{2}} = \frac{\Phi_{i, j+1} - \Phi_{i, j}}{\Delta z},$$

которые в дальнейшем используются при расчетах переноса и рассевания загрязнения по разностной схеме (7.140) – (7.143).

7.5 Аналитические и приближенные методы

Как уже было отмечено ранее, процессы переноса и рассевания атмосферных загрязнений примесей в городских условиях очень сложные. В процессе их описания необходимо учитывать следующие факторы: большое количество источников выбросов (труб промышленных и энергетических предприятий, участков улиц с интенсивным движением); сложный рельеф поверхности, наличие высоких зданий и сооружений; переменность ветрового режима на протяжении отдельных месяцев и времени года; вероятность аномальных метеорологических условий, которые существенно влияют на интенсивность рассеивания примесей; разнородный характер подстилающей поверхности и т.п.

Очень сложно в рамках одной математической модели описать и учесть всю совокупность факторов и найти методы практической реализации такой модели. Численные конечно-разностные методы [84, 97], в принципе, позволяют учитывать любой рельеф и неоднородность подстилающей поверхности городской территории. Но в этом случае унифицируется и упрощается способ задания источников выбросов вследствие аппроксимации линейных и точечных источников на конечно-разностной сетке, что существенно ухудшает точность численных расчетов. Для моделирования задачи даже на современных компьютерах приходится задавать большие

размеры сетки (т.н. «грубая сетка»). Кроме того, вычисления необходимо проводить по всей сетке, даже если область распространения примесей от отдельных источников носит локальный характер. Следует также отметить, что сама процедура реализации разностной модели на компьютере требует немалых затрат компьютерного времени и высокой квалификации сотрудников, которые выполняют эту работу.

На практике, у специалистов по метеорологии и экологии очень часто возникает необходимость в проведении быстрых и оперативных оценочных расчетов с целью анализа и прогноза состояния атмосферных загрязнений на городской территории (например, для составления экологических атласов, или паспортов). Для этого очень полезными бывают упрощенные модели распространения атмосферных примесей и приближенные аналитические или полуэмпирические методы расчета концентрации загрязнений на большой территории. Они дают возможность учитывать с достаточной детализацией выбросы от сотен и тысяч линейных, точечных или плоскостных источников. Но такие модели (как правило) не учитывают рельеф и характер подстилающей поверхности. Отдельные попытки учесть эти факторы в рамках приближенных аналитических методов связаны, в основном, со специальными случаями (например, описание поверхности возвышенностей или балок, когда земной рельеф учитывается в предположении о потенциальном обтекании поверхности) [50].

Приближенных аналитических и полуаналитических методов решения задач турбулентной диффузии атмосферных загрязнений создано довольно много. Но всем им присуща одна характерная особенность – они в той или иной мере используют **гауссову модель** распространения примеси в атмосфере.

Обратимся к уравнению (7.41) и сделаем ряд допущений, которые позволили б упростить моделирование выбросов.

1) Будем считать, что все коэффициенты, которые входят в уравнения (7.41) – постоянны, то-есть: $u = const,\ v = const,\ w = const$ $\nu_x = \nu_y = \nu_z = const$ (индекс «T» для простоты отброшен), а сам процесс переноса загрязнения происходит в неограниченном движущемся пространстве, где в некоторый момент времени $t = t_0$, в точке $M_0(x_0, y_0, z_0)$ имеет место разовый точечный выброс известного

количества невесомого загрязнения Q. В этом случае (7.41) будет иметь вид:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t}+u\cdot\frac{\partial\varphi}{\partial x}+v\cdot\frac{\partial\varphi}{\partial y}+w\cdot\frac{\partial\varphi}{\partial z}+\sigma\cdot\varphi=\nu\cdot\left(\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}\right)+ \tag{7.148}$$
$$+Q\cdot\delta(x-x_0)\cdot\delta(y-y_0)\cdot\delta(z-z_0)\cdot\delta(t-t_0).$$

Это уравнение имеет точное аналитическое решение

$$\varphi(x,y,z,t,x_0,y_0,z_0,t_0,Q)=\frac{Q\cdot\theta(t-t_0)}{\left(2\sqrt{\pi\nu\cdot(t-t_0)}\right)^3}\cdot\exp(-\sigma\cdot(t-t_0))\cdot$$
$$\cdot\exp\left[\frac{(x-x_0-u\cdot(t-t_0))^2+(y-y_0-v\cdot(t-t_0))^2+(z-z_0-w\cdot(t-t_0))^2}{4\nu\cdot(t-t_0)}\right], \tag{7.149}$$

где введено обозначение функции Хэвисайда $\theta(\tau)$

$$\theta(\tau)=\begin{cases}0, \text{ при } \tau<0;\ \tau=0;\\ 1, \text{ при } \tau>0.\end{cases}$$

Если учитывать наличие земной поверхности, заданной в виде плоскости $z=0$, на которой ставятся граничные условия отсутствия диффузионного потока или поверхностного отражения, то-есть

$$\frac{\partial\varphi}{\partial z}\Big|_{z=0}=0,$$

то следует ввести фиктивный выброс зеркально расположенного относительно плоскости $z=0$ источника, а распространение загрязнения в этом случае рассчитывать по формуле

$$\varphi(x,y,z,t,x_0,y_0,z_0,t_0,Q)=\frac{Q\cdot\theta(t-t_0)}{\left(2\sqrt{\pi\nu\cdot(t-t_0)}\right)^3}\cdot\exp(-\sigma\cdot(t-t_0))\cdot$$
$$\cdot\left\{\begin{aligned}&\exp\left[\frac{(x-x_0-u\cdot(t-t_0))^2+(y-y_0-v\cdot(t-t_0))^2+(z-z_0-w\cdot(t-t_0))^2}{4\nu\cdot(t-t_0)}\right]+\\&+\exp\left[\frac{(x-x_0-u\cdot(t-t_0))^2+(y-y_0-v\cdot(t-t_0))^2+(z+z_0+w\cdot(t-t_0))^2}{4\nu\cdot(t-t_0)}\right]\end{aligned}\right\} \tag{7.150}$$

С помощью выражения (7.150) можно рассчитать концентрацию загрязнения для некоторых последовательных выбросов. Например, если известна последовательность точечных выбросов $(t_i, x_i, y_i, z_i, Q_i)$ для $i=1,2,3,...,N$, то распределение концентрации загрязнения в этом случае можно расчесать по формуле

$$\varphi_{\sum}(x,y,z,t)=\sum_{i=1}^{N}\varphi(x,y,z,t,x_i,y_i,z_i,t_i,Q_i). \tag{7.151}$$

Распределение концентрации загрязнения вида (7.149), (7.150) называется **гауссовой моделью** перенесения и рассеивания атмосферных загрязнений. Выражая коэффициент диффузии через соответственную дисперсию $\sigma_\nu^2 = 2\nu \cdot (t - t_0)$, получим (7.149) в виде:

$$\varphi(x, y, z, t, x_0, y_0, z_0, t_0, Q) = \frac{Q \cdot \theta(t - t_0)}{\left(\sqrt{2\pi}\right)^3 \sigma_\nu^3} \cdot \exp(-\sigma \cdot (t - t_0)) \cdot$$
$$\cdot \exp\left[\frac{(x - x_0 - u \cdot (t - t_0))^2 + (y - y_0 - v \cdot (t - t_0))^2 + (z - z_0 - w \cdot (t - t_0))^2}{2\sigma_\nu^2}\right], \tag{7.152}$$

– трехмерный нормальный закон распределения вероятности Гаусса.

2) Будем как и ранее считать скорость ветра постоянной и сориентируем ось Ox в направлении ветра, а коэффициенты турбулентного обмена – также постоянными, но не равными между собой. Тогда уравнение (7.148) принимает вид (при $v = w = 0$):

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \sigma \cdot \varphi = \nu_x \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \nu_y \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} +$$
$$+ \nu_z \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + Q \cdot \delta(x - x_0) \cdot \delta(y - y_0) \cdot \delta(z - z_0) \cdot \delta(t - t_0), \tag{7.153}$$

а решение (7.149) записывается так:

$$\varphi(x, y, z, t, x_0, y_0, z_0, t_0, Q) = \frac{Q \cdot \theta(t - t_0)}{\left(2\sqrt{\pi\nu \cdot (t - t_0)}\right)^3} \cdot \exp(-\sigma \cdot (t - t_0)) \cdot$$
$$\cdot \exp\left[\frac{(x - x_0 - u \cdot (t - t_0))^2}{4\nu_x \cdot (t - t_0)} + \frac{(y - y_0)^2}{4\nu_y \cdot (t - t_0)} + \frac{(z - z_0)^2}{4\nu_z \cdot (t - t_0)}\right] =$$
$$= \frac{Q \cdot \theta(t - t_0)}{\left(\sqrt{2\pi}\right)^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp(-\sigma \cdot (t - t_0)) \cdot \exp\left[\frac{(x - x_0 - u \cdot (t - t_0))^2}{2\sigma_x^2} + \right.$$
$$\left. + \frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z - z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right], \tag{7.154}$$

где $2\sigma_x^2 = 2\nu_x \cdot (t - t_0)$; $2\sigma_y^2 = 2\nu_y \cdot (t - t_0)$; $2\sigma_z^2 = 2\nu_z \cdot (t - t_0)$ – соответственно дисперсии в направлении осей Ox, Oy, Oz.

Решение (7.150) в этом случае имеет вид:

$$\varphi(x,y,z,t,x_0,y_0,z_0,t_0,Q)=\frac{Q\cdot\theta(t-t_0)}{\left(\sqrt{2\pi}\right)^3\sigma_x\sigma_y\sigma_z}\cdot\exp(-\sigma\cdot(t-t_0))\cdot$$

$$\cdot\left\{\exp\left[\frac{(x-x_0-u\cdot(t-t_0))^2}{2\sigma_x^2}+\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}+\frac{(z-z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right]\pm\right. \tag{7.155}$$

$$\left.\pm\exp\left[\frac{(x-x_0-u\cdot(t-t_0))^2}{2\sigma_x^2}+\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}+\frac{(z+z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right]\right\},$$

здесь знаки «$\pm$» означают соответственно полное отражение или полное поглощение примеси подстилающей поверхностью $z=0$.

Кроме предположений, сделанных ранее, сделаем также предположение о стационарности или квазистационарности процесса перенесения и рассеивания загрязняющей примеси в атмосфере. Предположим, что время перенесения от источника выброса к рецептору значительно меньше, чем время, за которое изменяется метеоусловия и параметры источника выбросов.

Будем также считать, что в неограниченном подвижном пространстве в некоторой точке $M_0(x_0,y_0,z_0)$ расположен постоянно действующий источник загрязнений интенсивностью q (кг/сек) (например, заводская труба), который выбрасывает весомую примесь (например, пыль). Тогда на относительно небольших расстояниях от источника выброса необходимо учитывать неравномерность распределения концентрации по высоте. Это может быть сделано в рамках трехмерной модели, и в этом случае уравнение (7.41) будет иметь вид:

$$u\frac{\partial\varphi}{\partial x}-w_g\frac{\partial\varphi}{\partial z}+\sigma\varphi=\nu_y\cdot\left(\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2}\right)+\nu_z\cdot\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}+ \tag{7.156}$$

$$+q\cdot\delta(x-x_0)\cdot\delta(y-y_0)\cdot\delta(z-z_0),$$

где $\nu_x=\nu_y$;а w_g – скорость оседания весомой примеси.

Точное аналитическое решение уравнения (7.156) имеет вид:

$$\varphi(x,y,z,x_0,y_0,z_0,q)=\frac{q}{8\pi\nu_y}\cdot e^{\left(\frac{u\cdot(x-x_0)}{2\nu_y}-\frac{w_g(z-z_0)}{2\nu_z}\right)}\times$$
$$\times\left[\frac{e^{-\beta\rho_1}}{\rho_1}\pm\frac{e^{-\beta\rho_2}}{\rho_2}\right], \tag{7.157}$$

где

$$\rho_{1,2}=\sqrt{(z\mp z_0)^2+\frac{\nu_z}{\nu_y}\cdot\left[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2\right]},$$

$$\beta=\sqrt{\frac{u^2+4\nu_y\cdot\sigma_1}{4\nu_y\cdot\nu_z}},\quad \sigma_1=\sigma+\frac{w_g^2}{4\nu_z}.$$

В формуле (7.157) знак «+» в квадратных скобках выбирается в случае полного отражения примеси от земной поверхности $\left(\frac{\partial\varphi}{\partial z}\Big|_{z=0}=0\right)$, знак «–» – в случае полного поглощения $\left(\varphi\big|_{z=0}=0\right)$. Если ввести при рассмотрении дисперсии распределение примеси по модели Гаусса, то

$$\sigma_x^2=\sigma_y^2=2\nu_y\frac{(x-x_0)}{u};\quad \sigma_z^2=2\nu_z\frac{(x-x_0)}{u}.$$

Перепишем формулу (7.157) в виде:

$$\varphi(x,y,z,x_0,y_0,z_0,q)=\frac{q\cdot(x-x_0)}{4\pi\sigma_y^2}\cdot e^{(x-x_0)\left(\frac{(x-x_0)}{\sigma_y^2}-\frac{w_g(z-z_0)}{u\cdot\sigma_z^2}\right)}\times$$
$$\times\left[\frac{e^{-\beta\rho_1}}{\rho_1}\pm\frac{e^{-\beta\rho_2}}{\rho_2}\right], \tag{7.158}$$

где

$$\rho_{1,2}=\sqrt{(z\mp z_0)^2+\frac{\sigma_z^2}{\sigma_y^2}\cdot\left[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2\right]},$$

$$\beta=\sqrt{\frac{(x-x_0)\cdot\left[(x-x_0)u+2\sigma_y^2\cdot\sigma_1\right]}{u\cdot\sigma_y^2\cdot\sigma_z^2}},\quad \sigma_1=\sigma+\frac{(x-x_0)\cdot w_g^2}{2u\cdot\sigma_z^2}.$$

При условии выполнения всех ранее принятых допущений сделаем еще одно – будем считать, что вклад от конвективного переноса рассмотренного загрязняющего вещества в направлении действия ветра (то-есть в направлении оси координат *Ox*), значительно превышает вклад от турбулентной диффузии в этом же направлении, и пренебрежем последним. Тогда уравнение (7.156) для легкой примеси $(w_g = 0)$ принимает вид:

$$u\frac{\partial\varphi}{\partial x} = \nu_y \cdot \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \nu_z \cdot \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} + \\ + q \cdot \delta(x - x_0) \cdot \delta(y - y_0) \cdot \delta(z - z_0), \tag{7.159}$$

если пренебречь влиянием физико-химических превращений $(\sigma = 0)$. Уравнение (7.159) описывает наиболее простой из всех возможных случаев рассеивания загрязняющей примеси в атмосфере, и имеет точное аналитическое решение:

(7.160)

или через дисперсии

$$\sigma_y^2 = \frac{2\nu_y \cdot (x - x_0)}{u}; \sigma_z^2 = \frac{2\nu_z \cdot (x - x_0)}{u},$$

имеем:

$$\varphi(x, y, z, x_0, y_0, z_0, q) = \frac{q}{2\pi \cdot u \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \times \\ \times \exp\left[-\frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2} - \frac{(z - z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right] \tag{7.161}$$

При выполнении на подстилающей поверхности $z = 0$ условия полного отражения примеси $\left(\frac{\partial\varphi}{\partial z}\Big|_{z=0} = 0\right)$, или полного ее поглощения $\left(\varphi\big|_{z=0} = 0\right)$ при помощи принципа «зеркального отображения», получим

$$\varphi(x, y, z, x_0, y_0, z_0, q) =$$

$$= \frac{q}{2\pi \cdot u \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \exp\left[-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right] \cdot \left\{\exp\left[-\frac{(z-z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right] \pm \right. \tag{7.162}$$

$$\left. \pm \exp\left[-\frac{(z+z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right]\right\},$$

где знак «+» соответствует полному отражению примеси, а знак «–» – ее полному поглощению.

Решения (7.160) – (7.162) называют решениями для **точечного источника**, который размещен на высоте $z = z_0$. Если мы имеем дело с **наземным точечным источником**, расположенным на подстилающей поверхности $z_0 = 0$, то решение имеет вид:

$$\varphi(x, y, z, x_0, y_0, q) = \frac{q}{2\pi \cdot u \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \times$$

$$\times \exp\left[-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right]. \tag{7.163}$$

Рассмотрим случай с существованием бесконечного **линейного источника**, который находится на прямой, параллельной оси Oy и проходит через точку (x_0, z_0). Распределение концентрации от такого источника не зависит от координаты y и характеризуется только положением в плоскости (x, z). Если q_l (кг/м·сек) – интенсивность линейного источника, то интегрируя (7.160) по координате y_0, и вводя новую независимую переменную

$$\alpha = \frac{y - y_0}{2\sqrt{\nu_y \cdot \frac{(x - x_0)}{u}}}, \quad dy_0 = 2\sqrt{\nu_y \cdot \frac{(x - x_0)}{u}} d\alpha,$$

получим:

$$\varphi_l(x,z,x_0,z_0,q_l)=\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{q_l}{4\pi\cdot(x-x_0)\cdot\sqrt{\nu_y\cdot\nu_z}}\times$$

$$\times\exp\left[-\frac{u}{4(x-x_0)}\left(\frac{(y-y_0)^2}{\nu_y}+\frac{(z-z_0)^2}{\nu_z}\right)\right]dy_0=$$

$$=\frac{q_l}{2\cdot\sqrt{\pi\cdot(x-x_0)\cdot u\cdot\nu_z}}\cdot\exp\left[-\frac{u}{4(x-x_0)}\cdot\frac{(z-z_0)^2}{\nu_z}\right]= \qquad (7.164)$$

.

$$=\frac{q_l}{\sqrt{2\pi}\cdot u\cdot\sigma_z}\cdot\exp\left[-\frac{(z-z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right].$$

Если бесконечный линейный источник (например, автомагистраль) параллелен оси Oy, и находятся на поверхности земли ($z_0=0$), то:

$$\varphi_l(x,z,x_0,q_l)=\frac{2q_l}{\sqrt{2\pi}\cdot u\cdot\sigma_z}\cdot\exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right]. \qquad (7.165)$$

.

Если **линейный наземный источник** конечной длины (например, улица города), находится в плоскости (x,y) и описывается уравнением $y_0=f(x_0)$, то с использованием (7.163) получим распределение концентрации примеси вдоль этого источника в виде:

$$\varphi_l(x,y,z,q_l)=\int_{x_1}^{x_2}\frac{q_l}{2\pi\cdot u\cdot\sigma_y\cdot\sigma_z}\times$$

$$\times\exp\left[-\left(\frac{(y-f(x_0))^2}{2\sigma_y^2}-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right)\right]dx_0\,, \qquad (7.166)$$

.

где x_1,x_2 – начальная и конечная координаты линейного источника на оси Ox.

Если мы имеем **плоскостной источник** интенсивностью q_s (кг/м^{2}сек), то распределение концентрации примеси от этого источника будет иметь вид:

$$\varphi_l(x,y,z,q_s)=\iint\limits_S \frac{q_s}{2\pi\cdot u\cdot\sigma_y\cdot\sigma_z}\cdot\exp\left[-\left(\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right)\right]dS, \qquad (7.167)$$

где S – область подстилающей поверхности, которая занята плоскостным источником.

Мы рассмотрели почти все известные на данное время аналитические решения уравнения переноса атмосферных загрязнений (7.41), полученные в результате определенных упрощающих допущений. Естественно, возникает вопрос – а в какой мере эти решения могут быть использованы для расчета переноса загрязнений в атмосфере большого города?

Прежде чем ответить на этот вопрос, отметим следующее. Известно, что, при достаточно однородной подстилающей поверхности, когда нет больших рельефных, температурных и влажностных неоднородностей (таких как горы, глубокие впадины, крупные водные массивы), то профиль скорости ветра над такой поверхностью практически не зависит от горизонтальных координат x, y и имеет вид [46]:

$$u(z)=u_1\cdot\left(l\,n\left(\frac{z}{z_0}\right)\Big/\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)\right) \qquad (7.168)$$

для равновесного адиабатического состояния атмосферы, а также

$$u(z)=u_1\cdot\left(\frac{z}{z_1}\right)^n \qquad (7.169)$$

– для неравновесных состояний атмосферы.

Здесь z_1 – некоторая высота над подстилающей поверхностью (обычно z_1=1 м); u_1 – скорость ветра на высоте $z=z_1$; z_0 – уровень шероховатости подстилающей поверхности (не путать с вертикальной координатой точечного источника в предыдущих формулах); n – показатель степени, величина которого характеризует температурную стратификацию атмосферы

$$n=\begin{cases}0{,}1\div 0{,}2 & \text{неустойчивое состояние;}\\ 0{,}2\div 0{,}3 & \text{равновесное состояние;}\\ 0{,}3\div 0{,}5 & \text{устойчивое состояние.}\end{cases} \qquad (7.170)$$

Кроме того, как уже отмечалось ранее, над однородной подстилающей поверхностью для коэффициентов турбулентной диффузии в приземном слое атмосферы $(z < h)$ имеют место зависимости

$$\nu_x = \nu_y = k_0 \cdot u(z), \quad \nu_z = k_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^p, \tag{7.171}$$

где в зависимости от состояния атмосферы

$k_0 = 0{,}1...1{,}0$ (м); $k_1 = (0{,}1 \div 0{,}2)$ (м^2/сек); $p = (0{,}8 \div 1{,}2)$.

Для моделирования процессов переноса на верхней границе пограничного слоя $(z > h)$ (в атмосфере над однородной подстилающей поверхностью), как свидетельствуют исследования [46], с принятой для практики точностью в расчетах можно принимать:

$$u = u_1 \cdot \left(\frac{h}{z_1} \right)^n = const; \; \nu_x \approx \nu_y \approx \nu_z = k_1 \cdot \left(\frac{h}{z_1} \right)^p = const; \tag{7.172}$$

Из сказанного стает понятно, что полученные выше точные аналитические решения уравнения (7.41), в допущениях про постоянный характер скорости ветра и коэффициентов турбулентной диффузии, в лучшем случае могут использоватся лишь для расчета концентрации атмосферных загрязнений вблизи верхней границы пограничного слоя атмосферы, и только над однородной поверхностью. Но городская застройка находится не в верхних слоях атмосферы, а в ее приземном слое, высотой $h = (50 \div 100)$м, и городская поверхность существенно неоднородна, ни с точки зрения рельефа, ни с точки зрения температуры. Эта неоднородность имеет существенное влияние на движение воздушных масс в приземном слое. Она влияет также и на характер движения в слоях, которые лежат над приземным слоем (при $(z > h)$). Компоненты скорости ветра на городской территории u, v, w в общем случае являются функциями и координат и времени, а коэффициент турбулентной диффузии, даже в виде (7.171) – также переменный.

Возникает вопрос, можно ли использовать решения (7.149) – (7.155), (7.157), (7.158), (7.160) – (7.167) для расчетов концентрации загрязнений в атмосфере города? Можно ответить утвердительно, если рассматривать эти расчеты **как приближенные, оценочные.** При этом возникает необходимость применения эмпирических зависимостей.

Какими могут быть эти эмпирические (полученные экспериментальным путем) зависимости? Прежде всего это касается таких параметров, как показатели дисперсии σ_y, σ_z.. В [50] приведено результаты исследований определения параметров σ_y, σ_z. **для местности, покрытой городскими застройками**:

$$\sigma_y = a_1 \cdot (x - x_0)^{b_1} \ , \sigma_z = a_2 \cdot (x - x_0)^{b_2} \ , \qquad (7.173)$$

где a_1, b_1, a_2, b_2 – эмпирические величины, приведены в таблице 7.1 в зависимости от устойчивости атмосферы:

Таблица 7.1. Параметры дисперсии для городской застройки

R_i	Класс устойчивости	a_1	b_1	a_2	b_2
<-0,01	Очень неустойчивый	1,46	0,71	0,01	1,54
<-0,01	Неустойчивый	1,52	0,69	0,04	1,17
-0,01	Равновесный	1,36	0,67	0,09	0,95
>0,1	Устойчивый	0,79	0,7	0,40	0,67

Здесь R_i – параметр Ричардсона, который характеризует состояние атмосферы. Что же касается компонент скорости u, v, w и коэффициентов турбулентной диффузии ν_x, ν_y, ν_z, которые входят в решение (7.149) – (7.155), (7.157), (7.158), (7.160) – (7.167), то при проведении приближенных оценочных расчетов их можно рассматривать как некоторые усредненные, эффективные значения. Процедура осреднения может происходить разными способами, как по пространственным координатам, так и по времени.

Как пример использования осредненных значений скорости ветра и коэффициентов турбулентной диффузии рассмотрим решение трехмерной нестационарной задачи переноса и диффузии весомой примеси массой M в полупространстве $z > 0$ после ее мгновенного выброса $(t = 0)$ точечным источником в точке с координатами $(x_0, y_0, z_0 = h_0)$:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial y} - w_g \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \sigma \cdot \varphi =$$
$$= \nu_x \cdot \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_z \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right), \qquad (7.174)$$

при начальных и граничных условиях

$$\varphi\big|_{t=0} = M \cdot \delta(x - x_0) \cdot \delta(y - y_0) \cdot \delta(z - h_0); \qquad (7.175)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0, \text{ при } x^2 + y^2 \to \infty; \qquad (7.176)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \alpha \cdot \varphi, \text{ при } z = 0; \ \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0, \text{ при } z \to \infty, \qquad (7.177)$$

$\alpha = \dfrac{\lambda}{\nu_z}$, ($\lambda$ – скорость поглощения примеси подстилающей поверхностью).

Скорость ветра и коэффициент турбулентной диффузии считаются переменными и определяются выражениями (7.169), (7.171). Приближенный метод решения задачи (7.174) – (7.177), основанный на объединении логранжевого и эйлерового подходов к решению и содержит два упрощающих допущения:

1) распределение концентрации в облаке пыли, которое рассеивается, в каждый момент времени описывается гауссовой моделью для мгновенного точечного источника;

2) средняя скорость частичек в облаке пыли и коэффициенты турбулентной диффузии изменяются по времени в зависимости от распределения концентрации примеси по высоте.

На основе второго допущения вводятся осредненные по времени и концентрации мгновенные скорости движения частиц примеси в облаке пыли по формулам:

$$u_l(t) = \frac{1}{\overline{\varphi}} \int_0^\infty u(z) \cdot \varphi(x, y, z, t) dz;$$

$$v_l(t) = \frac{1}{\overline{\varphi}} \int_0^\infty v(z) \cdot \varphi(x, y, z, t) dz; \qquad (7.178)$$

$$\overline{\varphi} = \int_0^\infty \varphi(x, y, z, t) dz.$$

Далее, если следовать лагранжевому подходу, находится центр пылевого облака и траектория его движения по формулам:

$$x_c(t) = x_0 + \int_0^t u_l(\tau) d\tau; \qquad (7.179)$$

$$y_c(t) = y_0 + \int_0^t v_l(\tau)d\tau;$$

$$z_c(t) = h_0 - w_g \cdot t.$$

По аналогии с (7.178) вводятся мгновенные значения коэффициентов турбулентного обмена, осредненные по высоте и по концентрации примеси

$$\nu_{x,l}(t) = \nu_{y,l}(t) = \frac{1}{\overline{\varphi}} \int_0^\infty \nu_x(z) \cdot \varphi(x, y, z, t)dz = k_0 \cdot u_l(t);$$

$$\nu_{z,l}(t) = \frac{1}{\overline{\varphi}} \int_0^\infty \nu_z(z) \cdot \varphi(x, y, z, t)dz. \qquad (7.180)$$

Если считать, что траектория движения центра пылевого облака (7.179) непрерывна, и в задаче (7.174) – (7.177) значения u, v, ν_x, ν_z приближенно заменить их осредненными значениями $u_l(t), v_l(t), \nu_{x,\,l}(t), \nu_{z,\,l}(t)$, то в таком виде задача будет иметь аналитическое решение в рамках гауссовой модели:

$$\varphi(x, y, z, t) = M \cdot e^{-\sigma_1 \cdot t} \cdot C_{xy}(x, y, t) \cdot C_z(z, t), \qquad (7.181)$$

где

$$C_{x,y}(x, y, t) = \frac{1}{4\pi \cdot \overline{\nu}_y(t)} \cdot \exp\left[-\frac{(x - x_c(t))^2}{4 \cdot \overline{\nu}_x(t)} - \frac{(y - y_c(t))^2}{4 \cdot \overline{\nu}_y(t)} \right];$$

$$C_z(z, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi \cdot \overline{\nu}_z(t)}} \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z - h_0 + w_g \cdot t)^2}{4 \cdot \overline{\nu}_z(t)} \right] + \exp\left[\frac{w_g \cdot h_0}{\overline{\nu}_z(t)} - \right.\right.$$

$$\left.\left. - \frac{(z + h_0 + w_g \cdot t)^2}{4 \cdot \overline{\nu}_z(t)} \right] \right\} - \alpha_1 \cdot \exp\left[\frac{w_g \cdot h_0}{\overline{\nu}_z(t)} - \frac{(z + h_0 + w_g \cdot t)^2}{4 \cdot \overline{\nu}_z(t)} \right] \cdot$$

$$\cdot \Phi\left[\frac{z + h_0 + \alpha_1 \overline{\nu}_z(t)}{2\sqrt{\overline{\nu}_z(t)}} \right]; \quad \Phi(\xi) = e^{\xi^2} \cdot erf(\xi); \quad \alpha_1 = \tilde{\alpha} + \frac{w_g}{2\overline{\nu}_z(t)};$$

$$\sigma_1 = \sigma + \frac{w_g^2}{4\overline{\nu}_z(t)}; \quad \tilde{\alpha} = \frac{\lambda}{\overline{\nu}_z(t)};$$

$$\bar{v}_x(t)=\bar{v}_y(t)=\int_0^t v_{x,l}(\tau)d\tau=k_0\int_0^t u_l(\tau)d\tau\,;\quad \bar{v}_z(t)=\int_0^t v_{z,l}(\tau)d\tau\,;$$

$erf(\xi)=\dfrac{2}{\sqrt{2\pi}}\int_0^{\xi}e^{-\alpha^2}d\alpha$ – интеграл вероятности Гаусса.

Чтоб применить решение (7.181) к расчету концентрации пыли **в атмосфере большого города** после мгновенного выброса пылевого облака точечным источником, необходимо значения $\bar{v}_y(t), \bar{v}_z(t)$ выразить через дисперсии рассеивания, которые с учетом (7.173) будут иметь вид:

$$\begin{cases}\bar{v}_y(t)=\dfrac{1}{2}\sigma_y^2(x,t)=\dfrac{1}{2}\left[a_1\cdot(x-x_c(t))^{b_1}\right]^2;\\ \bar{v}_z(t)=\dfrac{1}{2}\sigma_z^2(x,t)=\dfrac{1}{2}\left[a_2\cdot(x-x_c(t))^{b_2}\right]^2,\end{cases}\qquad(7.182)$$

где параметры a_1, b_1, a_2, b_2 приведены в таблице 7.1.

Границы интегрирования в выражениях (7.178), (7.180) при проведении практических расчетов выбираются конечными, такими, чтобы учесть реальный масштаб расчетной области.

7.6 Варианты упрощенных решений уравнения конвективной диффузии

7.6.1 Вводные замечания

Аналитическая теория решения уравнения (7.66) в общем виде при переменных значениях компонентов скорости и коэффициентов диффузии до сих пор не разработана. Имеющиеся в литературе решения посвящены некоторым частным задачам. Одной из наиболее распространенных в применении является так называемая гауссова модель миграции примеси, о которой говорилось ранее.

Сделаем следующие упрощения.

1. Будем считать процесс рассеивания примеси квазистационарным, что допустимо, когда время переноса от источника до рецептора существенно меньше времени изменения метеоусловий и параметров источника выбросов.

2. Полагаем скорость ветра постоянной и ориентируем ось Ox в направлении ветра.

3. Считаем, что конвективный перенос рассматриваемого вещества вместе с ветром значительно превышает перенос за счет турбулентной диффузии в этом направлении и пренебрегаем последним.

4. Коэффициенты диффузии принимаем постоянными.

Перечисленные допущения приводят уравнение (7.66) к такому виду

$$u\frac{\partial\varphi}{\partial x} = D_y\frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + D_z\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} + Q. \qquad (7.183)$$

Чаще всего при аналитическом решении данного уравнения в частных производных используют функцию гауссова распределения. Рассмотрим ее подробнее.

Функцию $f(x)$ называют нормально распределённой по оси x, если выполняется следующее соотношение

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \qquad (7.184)$$

где μ – задает положение максимального значения функции $f(x)$ на оси x (если $\mu = 0$, кривая симметрична относительно оси $x = 0$); σ – стандартное отклонение, определяющее расширение или сжатие колоколобразной кривой (Рис. 7.). Площадь под кривой всегда остается равной единице. Значение σ задает положение точек перегиба на боковых ветвях кривой. Если σ возрастает, максимальное значение $f(x)$ уменьшается. Примерно 68% площади под кривой находится в интервале $[-\sigma;\sigma]$, а в интервале $[-2\sigma;2\sigma]$ – около 95%.

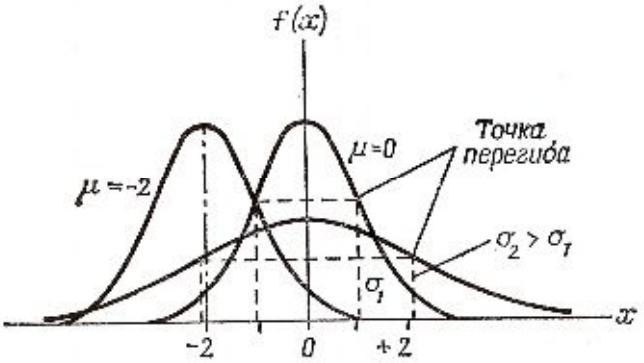


Рис. 7.7 Гауссово распределение для различных значений μ и σ

При рассмотрении задач рассеивания примесей в атмосфере необходимо учитывать, что диффузия происходит как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. Двойное гауссово распределение относительно координат y и z определяется простым перемножением двух гауссовых распределений по каждой из координатных осей:

$$f(y,z)=\frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z}\exp\left[-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y{}^2}-\frac{(z-\mu_z)^2}{2\sigma_z{}^2}\right]. \qquad (7.185)$$

Вернемся теперь к уравнению (7.183). Общее решение этого уравнения второго порядка в частных производных выглядит следующим образом

$$\varphi(x,y,z)=Kx^{-1}\exp\left[-\frac{u}{4x}\left(\frac{y^2}{D_y}+\frac{z^2}{D_z}\right)\right], \qquad (7.186)$$

где K – произвольная константа, значение которой определяется граничными условиями конкретной задачи. Одно из условий, состоит в том, что масса примеси, проходящей через любую вертикальную плоскость в направлении ветра от источника должна быть равна мощности источника Q. При этом мы предполагаем отсутствие каких-либо химических реакций нейтрализации, разложения или других механизмов удаления примеси из воздушного потока. Математически это условие можно записать следующим образом:

$$Q=\iint u\varphi\, dydz. \qquad (7.187)$$

Интегрирование по y обычно проводится в пределах от минус до плюс бесконечность, а пределы интегрирования по z зависят от конкретной физической задачи.

7.6.2 Точечный наземный источник

Для точечного наземного источника, расположенного в начале координат, интегрирование по z проводится в пределах от 0 до ∞. Подставим выражение для концентрации (7.186)в интеграл (7.187)

$$Q=\int_0^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}Kux^{-1}\exp\left[-\frac{u}{4x}\left(\frac{y^2}{D_y}+\frac{z^2}{D_z}\right)\right]dydz. \qquad (7.188)$$

Сделаем замену $y_1=y/\sqrt{D_y}$ и $z_1=z/\sqrt{D_z}$. Получим

$$Q = Kux^{-1}\sqrt{D_y D_z}\int_0^{+\infty}\exp\left(-\frac{uz_1^2}{4x}\right)dz\int_{-\infty}^{+\infty}\exp\left(-\frac{uy_1^2}{4x}\right)dx. \qquad (7.189)$$

Используем таблицы определенных интегралов и получим

$$\int_0^{+\infty}\exp(-a^2x^2)dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2a}. \qquad (7.190)$$

Значение того же интеграла в пределах от $-\infty$ до $+\infty$ будет вдвое больше, тогда

$$Q = Kux^{-1}\sqrt{D_y D_z}\sqrt{\frac{\pi x}{u}}\,2\sqrt{\frac{\pi x}{u}} = 2\pi K\sqrt{D_y D_z}, \qquad (7.191)$$

$$K = \frac{Q}{2\pi\sqrt{D_y D_z}}. \qquad (7.192)$$

Подставим (7.192) в (7.186)

$$\varphi(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi x\sqrt{D_y D_z}}\exp\left[-\frac{u}{4x}\left(\frac{y^2}{D_y}+\frac{z^2}{D_z}\right)\right]. \qquad (7.193)$$

Обозначим

$$\sigma_y{}^2 = \frac{2D_y x}{u}, \quad \sigma_z{}^2 = \frac{2D_z x}{u}. \qquad (7.194)$$

Тогда выражение для концентрации примеси, переносимой в направлении ветра от точечного наземного источника, имеет вид:

$$\varphi(x,y,z) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z u}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2}+\frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)\right]. \qquad (7.195)$$

7.6.3 Точечный источник на высоте h от поверхности земли

Для точечного источника, расположенного на высоте h от поверхности пределы интегрирования по z в формуле (7.187) можно взять от $-\infty$ до $+\infty$, поскольку основная часть примеси (исходя из гауссова распределения) будет находится между уровнем земли и высотой источника h. Тогда значение K будет в два раза меньше, чем для наземного источника:

$$K = \frac{Q}{4\pi\sqrt{D_y D_z}}. \qquad (7.196)$$

Подставим (7.196) в (7.187), учитывая расположение источника (делаем замену z на $z-h$):

$$\varphi(x,y,z)=\frac{Q}{4\pi x\sqrt{D_yD_z}}\exp\left[-\frac{u}{4x}\left(\frac{y^2}{D_y}+\frac{(z-h)^2}{D_z}\right)\right] \text{ или} \qquad (7.197)$$

$$\varphi(x,y,z)=\frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2}+\frac{(z-h)^2}{\sigma_z^2}\right)\right]. \qquad (7.198)$$

Если источник расположен в точке с координатами (x_0, y_0, z_0), то выражение принимает вид

$$\varphi(x,y,z)=\frac{Q}{4\pi(x-x_0)\sqrt{D_yD_z}}\exp\left[-\frac{(y-y_0)^2}{4(x-x_0)D_y/u}-\frac{(z-z_0)^2}{4(x-x_0)D_z/u}\right], \qquad (7.199)$$

$$\varphi(x,y,z)=\frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u}\exp\left[-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}-\frac{(z-z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right]. \qquad (7.200)$$

Формулы (7.197), (7.198) описывают случай, когда примесь достигнув поверхности земли в дальнейшем движении больше не участвует. Однако для газообразных загрязнителей это предположение несправедливо.

Будем полагать, что газообразное вещество отражается от поверхности земли и диффундирует обратно в атмосферу (это соответствует граничному условию отражения (7.72)). Введем дополнительно мнимый источник, полностью идентичный действительному и расположенный зеркально относительно уровня земли (Рис. 7.8).

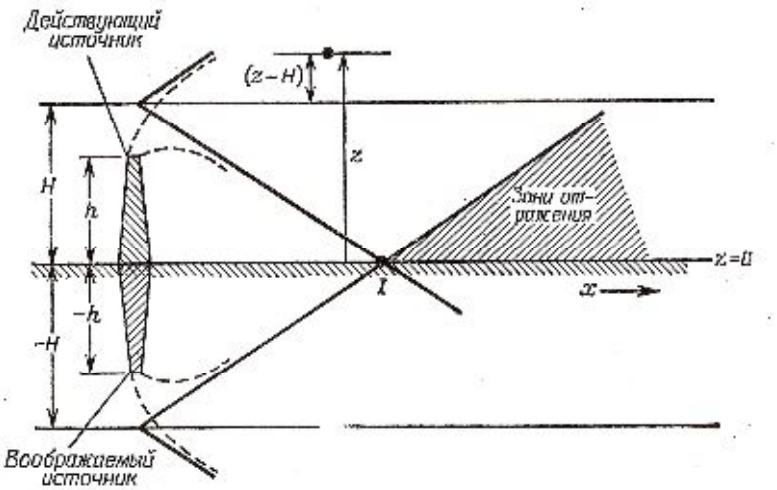


Рис. 7.8 Моделирование отражения газообразной примеси от поверхности земли

Рассеяние примеси от действительного и мнимого источников определяется суперпозицией двух кривых гауссового типа, одной с центром на высоте h и другой – на высоте $-h$ (Рис. 7.9).

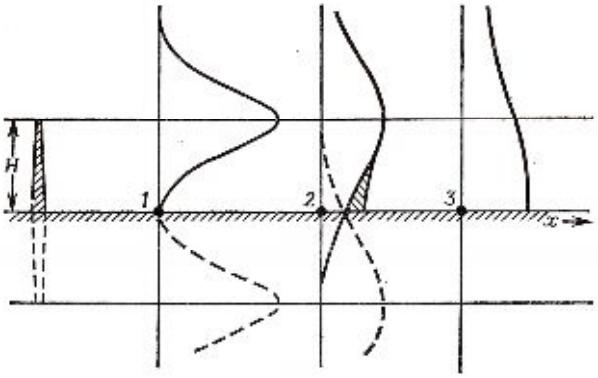


Рис. 7.9 Профили концентрации загрязнителя с учетом отражения

В результате начиная с некоторого расстояния x получаем несимметричный профиль распределения концентрации по высоте z, что эквивалентно сумме двух выражений для концентрации:

$$\varphi(x,y,z)=\frac{Q}{4\pi x\sqrt{D_yD_z}}\exp\left(-\frac{y^2}{4xD_y/u}\right)\left[\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{4xD_z/u}\right)+\exp\left(-\frac{(z+h)^2}{4xD_z/u}\right)\right] \qquad (7.201)$$

или

$$\varphi(x,y,z)=\frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u}\exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right)\left[\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right)+\exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right] \qquad (7.202)$$

Если на подстилающей поверхности ставится условие поглощения (7.73), то выражения для концентрации принимают вид:

$$\varphi(x,y,z)=\frac{Q}{4\pi x\sqrt{D_yD_z}}\exp\left(-\frac{y^2}{4xD_y/u}\right)\left[\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{4xD_z/u}\right)-\exp\left(-\frac{(z+h)^2}{4xD_z/u}\right)\right] \qquad (7.203)$$

или

$$\varphi(x,y,z)=\frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u}\exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right)\left[\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right)-\exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right]. \qquad (7.204)$$

Если источник выбросов не точечный, а распределенный с начальным распределением концентрации

$$\varphi(y,z)=\frac{Q}{2\pi\sigma_0^2 u}\exp\left(\frac{y^2+(z-h)^2}{2\sigma_0^2}\right). \qquad (7.205)$$

где $\sigma_0=\sqrt{\sigma_{0y}^2+\sigma_{0z}^2}$, то распределение концентрации в этом случае описывается следующим выражением

$$\varphi(x,y,z)=\frac{Q\left[1\pm\exp\left(-2h^2/\sigma_0^2\right)\right]^{-1}}{2\pi\sigma_y\sigma_z u}\exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right)\cdot\left[\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right)\pm\exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right], \qquad (7.206)$$

$$\sigma_y^2=\sigma_0^2+2D_yx/u, \qquad \sigma_z^2=\sigma_0^2+2D_zx/u. \qquad (7.207)$$

Знак “+” в квадратных скобках соответствует граничному условию отражения, а “–” – условию поглощения примеси.

7.6.4 Линейные источники

Рассмотрим случай бесконечного линейного источника, расположенного на прямой параллельной оси y и проходящей через точку (x_0, z_0). Распределение концентрации от такого источника не будет зависеть от координаты y и характеризуется лишь своими изменениями в плоскости (x, z). Таким образом мы получаем двумерную задачу.

Обозначим через q количество вещества, поступающего в окружающую среду за одну секунду с единицы длины источника (кг/м·с). Решение для линейного источника интенсивности q наиболее просто получается путем интегрирования вдоль линии приподнятых точечных источников интенсивностью qdy_0:

$$\varphi(x,z)=\int_{-\infty}^{\infty}\frac{q}{4\pi x\sqrt{D_yD_z}}\exp\left[-\frac{u}{4x}\left(\frac{(y-y_0)^2}{D_y}+\frac{(z-z_0)^2}{D_z}\right)\right]dy_0. \qquad (7.208)$$

Введем новую переменную $\dfrac{y_0 - y}{2\sqrt{D_y \dfrac{x}{u}}} = \alpha$, тогда $dy_0 = 2\sqrt{D_y \dfrac{x}{u}} d\alpha$.

Воспользуемся уже приведенным табличным интегралом (7.190) и получим искомую формулу.

$$\varphi(x,z) = \frac{q}{2\sqrt{\pi x u D_z}} \exp\left[-\frac{u}{4x}\frac{(z-z_0)^2}{D_z}\right] \text{ или} \tag{7.209}$$

$$\varphi(x,y,z) = \frac{q}{\sqrt{2\pi u \sigma_z}} \exp\left[-\frac{(z-z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right]. \tag{7.210}$$

Если источник расположен на уровне земли (например, если речь идет об автомагистрали), то необходимо интегрировать выражение для наземного источника (7.190) и получим:

$$\varphi(x,z) = \frac{q}{\sqrt{\pi x u D_z}} \exp\left[-\frac{u}{4x}\frac{z^2}{D_z}\right] \text{ или} \tag{7.211}$$

$$\varphi(x,y,z) = \frac{\sqrt{2}q}{\sqrt{\pi} u \sigma_z} \exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right]. \tag{7.212}$$

В случае, когда скорость ветра направлена под углом ψ к источнику вместо значения скорости ветра можно использовать ее проекцию $u \sin\psi$ [12].

Если нельзя пренебречь влиянием концов, а длина источника равна $2b$, тогда

$$\varphi(x,y,z) = \frac{Q}{\left(\pi C_x u x^{1-\frac{n}{2}}\right)^{\frac{1}{2}}} \exp\left(\frac{-z^2}{C_x^2 x^{2-n}}\right) \cdot \left[erf\left(\frac{b-y}{C_y x^{1-\frac{n}{2}}}\right) + erf\left(\frac{b+y}{C_y x^{1-\frac{n}{2}}}\right)\right] \tag{7.213}$$

Здесь erf – функция ошибок, $n \le 1$ – эмпирический коэффициент, зависит от профиля скорости ветра и от стратификации атмосферы (он предложен Сеттоном, см., например, [38])

$$C_i = \sigma_i \sqrt{\frac{2}{(ut)^{2-n}}} \tag{7.214}$$

σ_i – дисперсия в соответствующем направлении; $t = x/u$ – время.

Предположим, что линейный наземный источник параллелен оси y и концы его имеют координаты y_1 и y_2 ($y_1 < y_2$). Тогда концентрация вдоль оси x на уровне земли может быть получено из виражения (7.213).

7.6.5 Нестационарная диффузия от точечного источника

Случай нестационарной трехмерной диффузии пассивной примеси от точечного мгновенного источника, выбросившего Q грамм вещества в безграничную среду, движущуюся с постоянной скоростью u в направлении оси x описывается уравнением:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} + u\frac{\partial\varphi}{\partial x} = D_x\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + D_y\frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + D_z\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} \qquad (7.215)$$

Если источник расположен в точке с координатами (x_0, y_0, z_0), то решение уравнения (7.215) запишется в форме

$$\varphi(x,y,z) = \frac{Q}{(4\pi t)^{3/2}\sqrt{D_x D_y D_z}}\exp\left[-\frac{(x-ut-x_0)^2}{4D_x t} - \frac{(y-y_0)^2}{4D_y t} - \frac{(z-z_0)^2}{4D_z t}\right]. \qquad (7.216)$$

Выражая коэффициенты диффузии через соответствующие дисперсии $\sigma_i = 2D_i t$ получим:

$$\varphi(x,y,z) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z}\exp\left[-\frac{(x-ut-x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2} - \frac{(z-z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right]. \qquad (7.217)$$

Для полуограниченной среды, если источник расположен в точке (0, 0, h) имеем:

$$\varphi(x,y,z) = \frac{Q}{(4\pi t)^{3/2}\sqrt{D_x D_y D_z}}\exp\left(-\frac{(x-ut)^2}{4D_x t} - \frac{y^2}{4D_y t}\right)\times$$

$$\times\left[\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{4D_z t}\right) \pm \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{4D_z t}\right)\right] \qquad (7.218)$$

$$\varphi(x,y,z) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z}\exp\left(-\frac{(x-ut)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\times$$

$$\times\left[\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right)\pm\exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right]$$

В выражениях (7.218) знак плюс в квадратных скобках соответствует условию отражения на подстилающей поверхности, а знак минус – условию поглощения.

7.6.6 Диффузия неконсервативной примеси

При расчете диффузии радиоактивной или химически активной примеси для математического описания явлений физико-химических превращений в исходное уравнение вводится специальное слагаемое $\lambda\varphi$, где $\lambda \geq 0$ – скорость физико-химической трансформации примеси (с$^{-1}$). Тогда вид уравнения нестационарной диффузии будет следующим:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t}+u\frac{\partial\varphi}{\partial x}+\lambda\varphi=D_y\frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2}+D_z\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}. \qquad (7.219)$$

Будем искать решение этого уравнения в виде:

$$\varphi(x,y,z,t)=\tilde{\varphi}(x,y,z,t)e^{-\lambda t}. \qquad (7.220)$$

Тогда после подстановки (7.220) в (7.219) получаем уравнение нестационарной диффузии для консервативной примеси:

$$\frac{\partial\tilde{\varphi}}{\partial t}+u\frac{\partial\tilde{\varphi}}{\partial x}=D_y\frac{\partial^2\tilde{\varphi}}{\partial y^2}+D_z\frac{\partial^2\tilde{\varphi}}{\partial z^2}. \qquad (7.221)$$

Уменьшение концентрации примеси в воздухе за счет вымывания осадками в виде дождя или снега описывается аналогично – введением параметра вымывания Λ, зависящего от размера капель и частиц, их растворимости в воде. Таким образом, концентрация радиоактивной и неконсервативной примеси определяется выражением:

$$\varphi(x,y,z,t)=\tilde{\varphi}(x,y,z,t)e^{-(\lambda+\Lambda)t}. \qquad (7.222)$$

где $\tilde{\varphi}(x,y,z,t)$ есть решение для обычной пассивной примеси.

7.6.7 Залповый выброс загрязнений в атмосферу

В случае аварии или при отдельных технологических операциях в воздушную среду города может быть выброшен определенный объём газоаэрозолей. Образовавшееся облако, или так называемый «клуб», уносится в направлении ветра.

В точке с координатами (x=0, y=0) на высоте h в момент времени $t_0 = 0$ происходит выброс весомой примеси (пыли) массой M_0. Туча переносится ветром, оседая на поверхность земли. Ось Ox совпадает с направлением ветра (Рис. 7.10). При условиях постоянства параметров атмосферы процесс нестационарного переноса может быть описан уравнениям (7.66) с постоянными коэффициентами. Траектория центра облака показана точками A_1, A_2, A_3. В общей массе пыли содержатся частички разного веса и скорости оседания. Обозначим через p_1 долю легких частичек со скоростью оседания w_1, p_2 – долю средних частичек со скоростью оседания w_2, p_3 – долю тяжелых частичек со скоростью оседания w_3; при этом $p_1 + p_2 + p_3 = 1$. Пыль не подвергается физико-химическим преобразованиям, поэтому скорость её распада равняется нулю ($\sigma = 0$). Скорость поглощения пыли поверхностью земли λ также принята равной нулю.

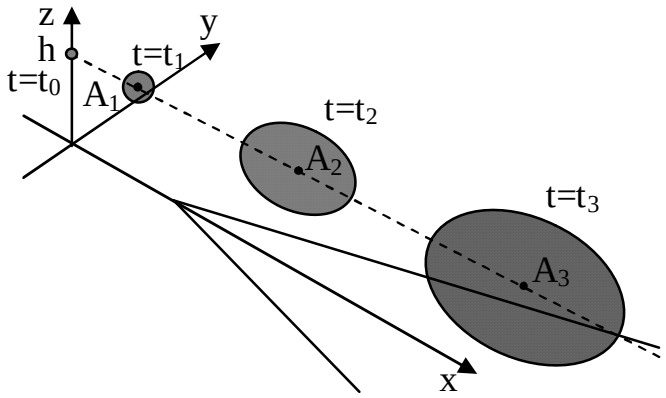


Рис. 7.10 Схема рассеивания и осаждения облака весомой примеси после мгновенного выброса

Распределение концентрации примеси над поверхностью земли после выброса пыли массой M_0 в точке (0,0,h) может быть описан формулой

$$\varphi(x, y, z, t) = M_0\, \varphi_x(x,t)\, \varphi_y(y,t)\, \varphi_z(z,t), \qquad (7.223)$$

$$\varphi_x(x,t)=\frac{1}{2\sqrt{\pi D_x t}}\exp\left[-\frac{(x-ut)^2}{4D_x t}\right], \tag{7.224}$$

$$\varphi_x(x,t)=\frac{1}{2\sqrt{\pi D_y t}}\exp\left[-\frac{y^2}{4D_y t}\right], \tag{7.225}$$

$$\varphi_x(x,t)=\frac{1}{2\sqrt{\pi D_z t}}\exp\left[-\frac{w_s(z-h)^2}{2D_z}\right]\left\{\exp\left[-\frac{(z-h)^2}{4D_z t}\right]+\exp\left[-\frac{(z+h)^2}{4D_z t}\right]-\right.$$
$$\left.-\alpha\sqrt{\pi D_z t}\exp\left[-\frac{(z+h)^2}{4D_z t}\right]\Phi\left(\frac{z+h+\alpha D_z t}{2\sqrt{\pi D_z t}}\right)\right\}, \tag{7.226}$$

где $\Phi(\xi)=e^{\xi^2}erfc(\xi)$, $\alpha=w_s/2D_z$, w_s – скорость оседания частичек пыли. При $\xi>5$ для $\Phi(\xi)$ удобнее воспользоваться приближением $\Phi(\xi)\approx(1-1/2\xi^2)/(\sqrt{\pi}\xi)$, полученным на основе асимптотического разложения функции $erf(\xi)$ при больших значениях аргумента.

Для разнородной пыли, состоящей из n фракций, получим

$$\varphi_\Sigma(x,y,z,t)=\sum_{i=1}^{n}p_i\varphi_i(x,y,z,t,w_i). \tag{7.227}$$

Где p_i – доля частичек пыли со скоростью осаждения w_i, φ_i – их концентрация.

Масса примеси M_t, осевшая за период времени на протяжении t после момента выброса на поверхность земли в точке (x,y), определяется по формуле

$$M_t(x,y,t)=\sum_{i=1}^{n}w_{g_i}p_i\int_0^t\varphi_i(x,y,z,t,w_{g_i})dt. \tag{7.228}$$

7.7 Некоторые прикладные задачи по расчету загрязнения городской воздушной среды

7.7.1 Анализ загрязнения городской атмосферы от сложной сети автомагистралей

Территорию современных крупных городов пересекают автомобильные магистрали, общее число которых может превышать несколько тысяч. Каждая из автомагистралей имеет свои характерные особенности, а именно: характер движущегося транспорта и интенсивность этого движения, геометрические характеристики уличного каньона, крутизна возможных подъёмов и спусков, наличие древесных насаждений на разделительном бульваре или на обочинах, наличие регулируемых перекрестков или площадей с круговым движением, ориентация по отношению к выбранной системе координат и т.п. Каждая из этих особенностей оказывает влияние на концентрацию загрязнений как вдоль самой магистрали, так и на определённом удалении от неё. Классическая задача об изолированной магистрали, как линейном источнике, существенно усложняется. В работе [20] приводится методика расчета в которой учитывается большинство из названных факторов.

Влияние вредных выбросов транспорта на окружающую среду во многих аспектах достаточно опасно. Прежде всего, они поступают в атмосферу преимущественно в жилой зоне города на уровне прямого восприятия пешеходами. Удаление выбросов из уличного каньона (Рис. 7.11), образованного рядами домов по бокам автотрассы, происходит менее интенсивно, чем в случае выбросов через высотную дымовую трубу. Наличие приземных источников выбросов на территории, где есть возвышенности и низменные участки, приводит к образованию застойных зон в оврагах, балках, прибрежных низинах, особенно в периоды малой интенсивности ветра и во время штилей. Для приземных источников более опасны так называемые низкие температурные инверсии, т.е. явления, при которых в атмосферном слое на небольшой высоте (30-50 м) температура выше, чем в нижнем слое. К числу опасных явлений следует отнести физико-химические превращения в загрязненном воздухе с влиянием активного солнечного излучения, особенно в летний период. Они приводят к образованию так называемого фотохимического смога лос-анджелесского типа. В приземном пласте на авто-

трассе создается заметный дефицит кислорода: на сжигание 1 кг бензина в карбюраторных двигателях нужно около 200 л кислорода. Вредными также являются некоторые физические факторы, в первую очередь, шум, вибрация, нарушение видимости и др.

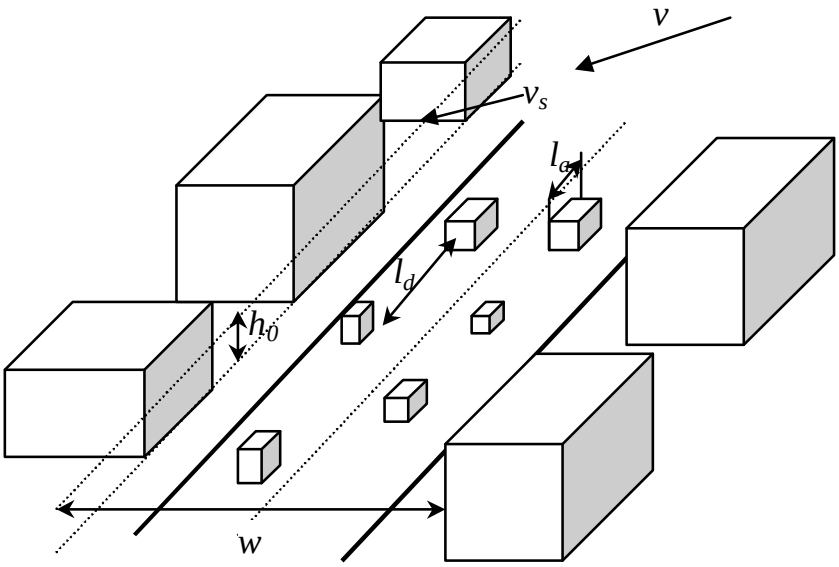


Рис. 7.11 Схема движения в уличном каньоне

Предлагаемая методика базируется на следующих предположениях.

1. Автотрассы аппроксимируются отрезками разной длины и ориентации, для каждого из которых задаются интенсивность выбросов и геометрические характеристики.

2. Совокупность коротких улиц и переулков с неактивным движением транспорта учитывается как площадной источник.

3. Большие регулируемые перекрестки считаются точечными источниками, поскольку на каждом из них находятся одновременно с включенными двигателями несколько автомобилей, которые двигались в разных направлениях.

4. Ветровой поток и концентрация вредных примесей в пределах уличного каньона и за его пределами рассматривается отдельно. Для каждого участка автотрассы задаются размеры каньона с учетом ширины улицы, высоты домов, плотности застройки, наличия больших зеленых насаждений, на разделительной полосе и на противоположной от стороне улицы.

5. Количество вредных примесей q, поступающих в атмосферу от движущихся или стоящих автомобилей, определяется в едини-

цах массы на единицу объема газа при так называемых нормальных условиях. Для автомобилей на перекрестках задается их суммарный выброс M_p (мг/м^3), для линейных источников – массовый выброс на единицу длины в единицу времени M_l (мг/м·с). При движении разных видов транспорта целесообразно использовать «пробеговый» выброс M (мг/авт·м). При движении смешанного потока (то есть легкового и грузового транспорта) средняя величина выбросов на один автомобиль $M_{ср}$ определяется следующим образом:

$$M_{ср} = M_л + j(M_г - M_л). \qquad (7.229)$$

Здесь $M_л$, $M_г$ – выбросы легкового и грузового транспорта соответственно, j – доля грузового транспорта на трассе ($0 \le j \le 1$).

6. Топография местности учитывается умножением M на коэффициент интенсивности выбросов ε. При движении по горизонтальному участку ε=1, при движении на подъеме ε=1,1 – 1,2, при движении на спуске ε=0,7-0,9. Параметр ε выбирается эмпирическим путем в зависимости от крутизны подъема (спуска). При встречном движении (подъем-спуск) суммарное значение ε будет близко к единице.

7. Интенсивность движения на трассах задается или как число автомобилей, которые проходят через данную точку трассы в 1 час, т.е. N авт/час, или как плотность движения на дороге (число автомобилей на единицу длины дороги), т.е. P авт/м. При переходе от одного параметра к другому используются такие характеристики, как средняя скорость движения транспортного потока V_a, рядность движения в одном направлении, наличие прямого и встречного движений, средняя дистанция между автомобилями l_d, средняя длина автомобиля l_a. Двигаясь со скоростью V_a, автомобили появляются в фиксированной точке дороги каждые t_1 секунд, причем $t_1=(l_a+l_d)/V_a$. Если, например, V_a=9 м/с, l_a=5 м, l_d=20 м, t_1=2,8 с, то данную точку трассы пересекает N=3600/2,8=1285 автомобилей за час. На одном километре трассы находится $P=1000/(l_a+l_d)$ автомобилей. В нашем случае P=40 авт/км, или 0.04 авт/м.

8. Вследствие того, что в уличном каньоне при поперечном ветре образуется застойная зона, там может происходить накопление примеси. В этом случае параметры задачи становятся зависимыми от времени, и ее следует решать для разных промежутков времени, учитывая то, что интенсивность движения меняется на протяжении суток.

Концентрация вредной примеси φ_S в пределах участка уличного каньона (Рис. 7.11) длиной L с использованием допущения о стационарности процесса рассчитывается на основе балансового соотношения

$$\frac{qV}{h_0 w} - v_S \varphi_S S_0 - \lambda V C_S = 0 \qquad (7.230)$$

где q – интенсивность выбросов, мг/(м·с); h_0 – высота слоя перемешивания выбросов в пределах улицы; w – ее ширина; $V=h_0 w$ – объем слоя перемешивания в пределах уличного каньона; v_s – средняя скорость воздушных течений в просветах между домами; S_0 – площадь просветов между домами до высоты h_0; λ – скорость распада примеси. Высота слоя перемешивания выбросов h_0 зависит от скорости ветра, метеоусловий и обычно для наземных источников на расстояниях к 10 – 20 м (ширина улиц) не превышает нескольких метров. Скорость v_s определяется на основании скорости ветра с учетом площади просветов между домами. Исходя из соотношения (7.230), концентрация примеси в пределах улицы рассчитывается по формуле

$$\varphi_s = \frac{qV}{h_0 w\left(v_s S_0 + \lambda V\right)} \qquad (7.231)$$

Уравнение переноса для линейного источника можно упростить, осреднив концентрацию по высоте приземного слоя h. В этом случае оно примет вид:

$$D\left(\frac{\partial^2 \varphi_S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_S}{\partial y^2}\right) - u\frac{\partial \varphi_S}{\partial x} - v\frac{\partial \varphi_S}{\partial y} - \sigma_1 \varphi_S = 0, \qquad (7.232)$$

где $\varphi_S = \frac{1}{h}\int_0^h \varphi(x, y, z)dz, \qquad \sigma_1 = \sigma + \frac{w^2}{4D_{z,s}},$

$D_{z,s}$ – среднее значение D_z в слое перемешивания. Высота этого слоя h может увеличиться по мере удаления от автотрассы через вертикальное перемешивание, с другой стороны, это компенсируется уменьшением объёма воздуха в приземном слое за счет домов и сооружений. Поэтому можно принять $h \approx h_0$, хотя этот параметр можно уточнить при наличии информации о характере застройки отдаленной от автотрассы.

Для линейного источника, произвольно ориентированного к направлению ветра применим преобразование координат (Рис. 7.12)

$$\begin{cases} \xi(x,y,\theta) = (x - x_1)\cos\theta_s + (y - y_1)\sin\theta_s, \\ \eta(x,y,\theta) = -(x - x_1)\sin\theta_s + (y - y_1)\cos\theta_s. \end{cases} \tag{7.233}$$

На границе $\xi > 0$ задается условие

$$\varphi(0,\eta) = \begin{cases} \varphi_0, & \eta_1 < \eta < \eta_2, \\ 0, & \eta < \eta_1 \ \vee \ \eta > \eta_2. \end{cases} \tag{7.234}$$

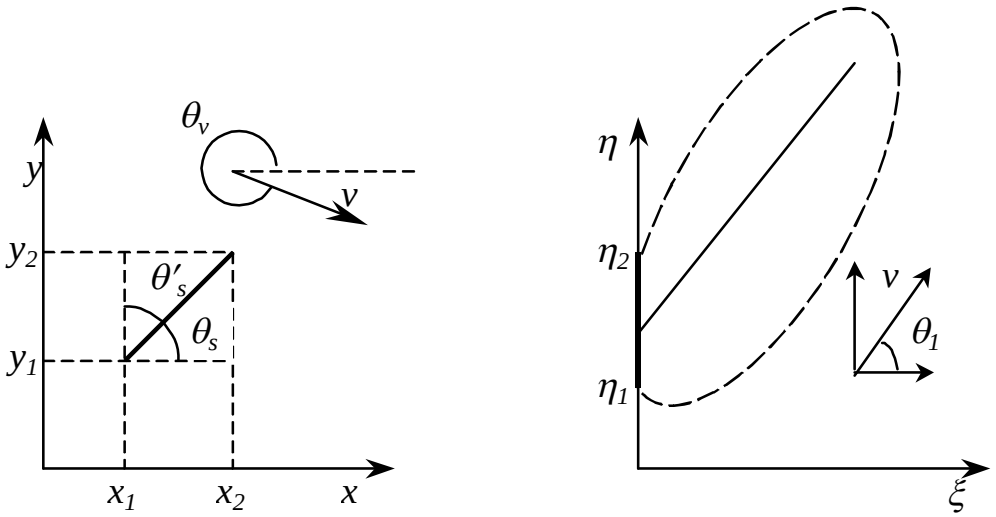


Рис. 7.12 Преобразование координат для линейного источника

Направление ветра в системе координат (ξ, η) определяется углом $\theta_1 = \theta_s' + \theta_v$, где $\theta_s' = \pi / 2 - \theta_v$.

Аналитическое решение уравнения (7.232) при условии (7.234) и без учёта диффузного переноса вдоль направления ветра имеет вид

$$\varphi(\xi,\eta) = \varphi_0 e^{-\sigma_1 x / V_\xi} \left\{ \mathrm{erf}\left(\frac{\eta - \eta_2 - \rho\xi}{2\sqrt{D\xi}} \right) - \mathrm{erf}\left(\frac{\eta - \eta_1 - \rho\xi}{2\sqrt{D\xi}} \right) \right\} \tag{7.235}$$

где v_ξ, v_η – компоненты скорости в системе координат (ξ, η), $\rho = v_\eta / v_\xi$.

Если ветер направлен вдоль улицы ($\theta_s = \theta_v$, $y_1 = y_2 = y_0$), то необходимо проинтегрировать функцию точечного источника

$$G(x,\zeta,y-y_0)=\frac{1}{\sqrt{4\pi D(x-\zeta)}}\exp\left(-\frac{\sigma_1}{v_x}(x-\zeta)-\frac{(y-y_0)^2}{4D(x-\zeta)}\right) \qquad (7.236)$$

на отрезке $\zeta\in\ [0,x_0]$, $x_0=x_2-x_1$. Тогда с учетом интенсивности источника для $x>x_0$

$$\varphi(x,y)=\frac{q}{\sqrt{4sD}\,v_x h}\left\{e^{y\sqrt{\frac{s}{D}}}\left(\operatorname{erf}\frac{\sqrt{sD}x+y}{2\sqrt{Dx}}-\operatorname{erf}\frac{\sqrt{sD}(x-x_0)+y}{2\sqrt{D(x-x_0)}}\right)+\right.$$
$$\left.+e^{-y\sqrt{\frac{s}{D}}}\left(\operatorname{erf}\frac{\sqrt{sD}x-y}{2\sqrt{Dx}}-\operatorname{erf}\frac{\sqrt{sD}(x-x_0)-y}{2\sqrt{D(x-x_0)}}\right)\right\}, \qquad (7.237)$$

для $x<x_0$

$$\varphi(x,y)=\frac{1}{\sqrt{4sD}}\left\{e^{y\sqrt{\frac{s}{D}}}\operatorname{erf}\frac{\sqrt{sD}x+y}{2\sqrt{Dx}}+e^{-y\sqrt{\frac{s}{D}}}\operatorname{erf}\frac{\sqrt{sD}x-y}{2\sqrt{Dx}}\right\} \qquad (7.238)$$

где $s=\sigma_1/v_x$.

В качестве примера была рассчитана концентрация вредных примесей от автомобильных выбросов на участке территории города, изображенном на рис. 7.13. Жирная кривая показывает береговую линию, отрезки – отдельные улицы с наиболее интенсивным движением. Доля грузового транспорта j=0.1. Концентрация определялась в долях суммарной (максимальной разовой) ПДК по таким компонентам, как CO, N_xO_y, C_nH_m. Плотность движения автомобилей по основным магистралям изменялась от 4 до 50 авт/км. Рассчитанные по изложенной методике удельные выбросы рассмотренных компонентов составляют, например, при P=40 авт/км: q_{CO}=8,4 мг/(м·с); q_{NxOy}=0,033 мг/(м·с); q_{CnHm}=0,037 мг/(м·с). При вычислениях учитывались наиболее значимые перекрестки, для которых концентрация рассчитывалась по схеме точечного источника.

Расчеты показывают, что при заданном направлении ветра максимальные концентрации сосредоточенны на участках территории, расположенных в направлении ветра в прибрежной части с высокой интенсивностью движения. При увеличении скорости ветра происходит снижение концентрации вследствие более интенсивного рассеяния.

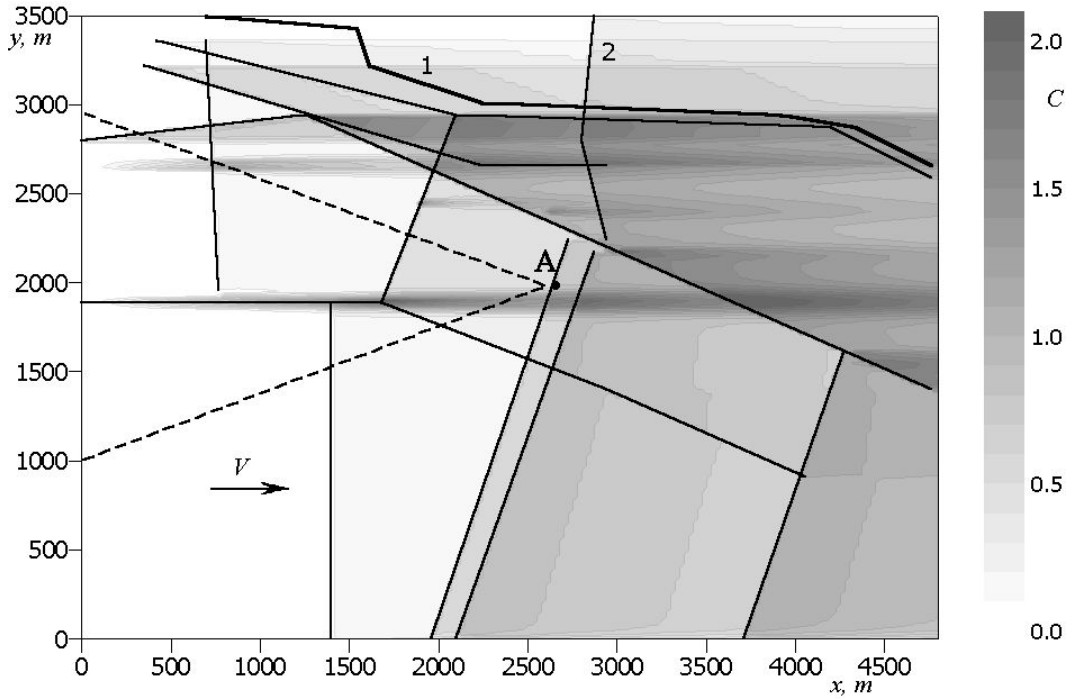


Рис. 7.13 Распределение концентрации примесей на части территории города, рассчитанный при скорости ветра v=3 м/с;
1 – береговая линия, 2 – мост через реку

7.7.2 Метод локализации для расчета концентрации

Как уже было отмечено, городская территория отличается высокой плотностью и разнообразием источников вредных выбросов. В пункте 7.46 данного раздела приведены соотношения для каждого из отдельных источников соответствующего типа. Классическая схема расчета распространения загрязнений предполагает использование такой последовательности: фиксируется определённый источник с заданным выбросом, затем рассчитывается трасса, покрываемая загрязнённой газовой струёй (при наличии ветра), или загрязняемый участок территории вокруг источника, формирующийся при штиле.

При наличии множества плотно размещенных источников такой подход не является рациональным, поскольку при этом нужно учитывать взаимное наложение газовых струй с различной концентрацией и составом вредных ингредиентов. Более рациональным является вариант, когда концентрация полютантов рассчитывается в одном фиксированном пункте на территории города. Выбор такого пункта называемого рецептором, может быть произвольным, или же обусловлен практическими соображениями. Это может быть, к

примеру, лечебное учреждение, учебное заведение, торговый центр и т.п. Такой подход называют методом локализации, основы которого заложены в работе [16].

Основу метода составляют такие процедуры.

1. На географической карте города строится фиксированная декартовая система координат x, y, в которой начало и ориентация осей выбираются из удобства размещения всей его территории в заданном прямоугольнике. Понятно, что в этом случае направление осей легко привязать к направлению меридиан и параллелей.

2. На этой же карте строится локальная и привязанная к данному моменту времени система координат с началом в точке размещения рецептора и осью x', направленной против ветра. Ось z' в этой системе направлена вертикально вверх, а ось y' вдоль поверхности земли, образуя при этом правую систему координат.

3. Производится идентификация всех источников загрязнения воздуха на городской территории (точечных, площадных, линейных). При этом группа из дымовых труб, расположенных компактно на территории одного промышленного предприятия, задаётся в виде одного точечного источника с суммарным выбросом. Небольшие площадные источники могут быть приближенно заменены на точечные, размещенные в центре площадки.

Идентификация точечных источников предусматривает обозначение типа источников (*ZOS*), его координаты (x, y, z), химическую формулу вещества (напр. SO_2) и массовую интенсивность выброса Q (кг/с). Таким образом, идентификационный код сосредоточенного источника имеет вид:

ZOS(4000; 500; 30) – SO2(0,5).

Координаты x, y, здесь соответственно равняются 4000 м и 500 м, высота трубы и начального подъема $Z = H + {}_{\Delta}H = 30$ м (H – высота дымовой трубы, ${}_{\Delta}H$ – начальный подъем).

Высота начального подъема зависит от температуры и других параметров струи, которая вытекает из трубы, а также от скорости ветра и состояния атмосферы. Массовая интенсивность выброса в данном случае Q=0,5 кг/с.

Линейные источники задаются в виде отрезков прямых линий с координатами точек начала и конца рис. 7.14.

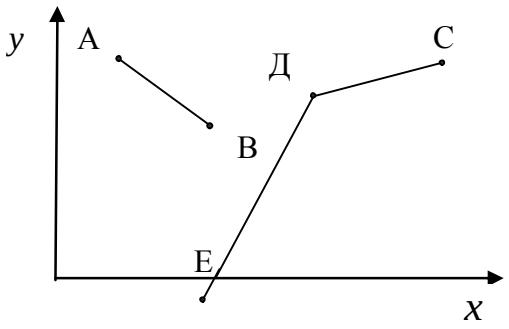


Рис. 7.14 Линейные источники
(автомагистрали)

Если улица, или дорога изменяет направление (точка Д), тогда линейный источник разбивается на отдельные отрезки СД и ДЕ.

В случае, когда дорога выходит за пределы города, координаты точки выхода выбираются на прямоугольном контуре, который ограничивает город (точка Е). Известно, что при заданных координатах концов отрезка прямой линии можно записать ее уравнение и определить углы наклона к каждой из осей, или к вектору скорости ветра. Идентификация источников типа LIN включает координаты двух точек (концы отрезка), интенсивность выбросов q (мг/м с), которая зависит от типа автомобилей, скорости их движения, наклона дороги (подъем или спуск) и т.п., а также химическую формулу загрязняющего вещества. Таким образом, имеем код источника

LIN (500; 3000; 0) - (800; 6000; 0) - CO (10)

В этом случае точки концов отрезка будут: $x_н$=500, $y_н$=3000, $z_н$=0; $x_к$=800; $y_к$=6000; $z_к$=0. Индекс “н” - начало отрезка, индекс “к” - его конец. Началом отрезка считается точка с меньшей координатой x. Кроме того, здесь обозначена интенсивность выброса окисла углерода CO, равная 10 (мг/м·с).

В системе координат x, y производится идентификация основных элементов подстилающей поверхности: группы компактной застройки, растительные массивы, водоёмы, возвышенности, низменные участки, овраги и т.д. Площадные элементы задаются в виде простых фигур (прямоугольник, эллипс) с заданным центром, а также продольным и поперечным размерами. Вытянутые в длину элементы (река, овраг, горная гряда и т.п.) задаются в виде ломанных линий,проложенных вдоль русла реки или гряды с указанием поперечного размера элемента (его ширина), а также высоты (гря-

да), или глубины (овраг). Возвышенности (холмы) задаются формой в плане и их высотой над поверхностью отсчёта.

4. Строится зона влияния (Рис. 7.15) в виде кругового сектора с центром в точке рецептора, осью симметрии, совпадающей с осью x' локальной системы координат и полу углом раствора β, определяемом по формуле

$$tg\beta = \frac{2\sigma_L}{L} \tag{7.239}$$

где L – расстояние вдоль оси x' до наиболее удаленного источника, а σ_L – боковая дисперсия на этой длине. Можно заметить, что зона влияния – это участок территории города, где расположены все источники (в том числе и линейные), от которых загрязнения попадают в начало координат, т.е. к рецептору. Возмущения от линейного источника (автомагистрали) попадают к рецептору из единственной точки – места пересечения этой магистрали с осью x'. Интенсивность выбросов в этой точке q (мг/м·с) следует умножить на $\sin\theta$, где θ – острый угол между вектором скорости ветра и магистралью.

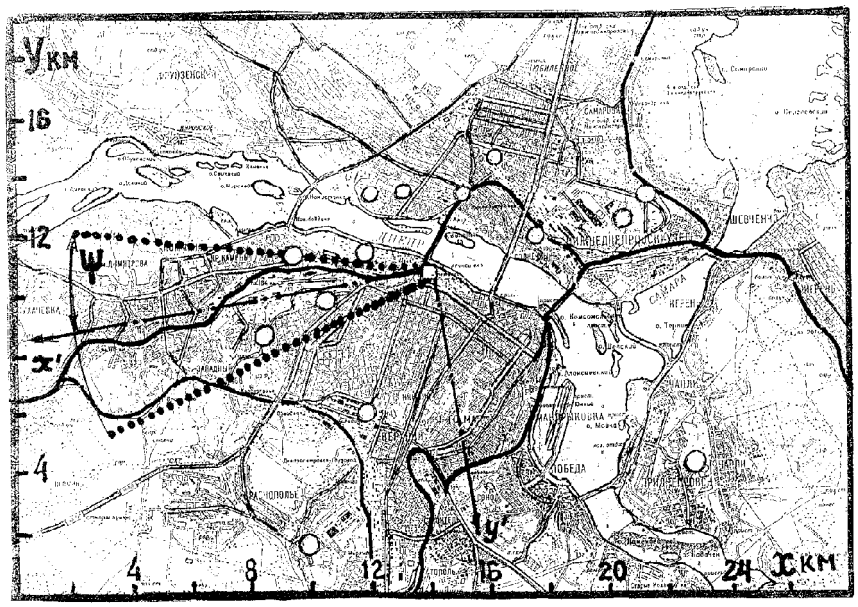


Рис. 7.15 Построение зоны влияния на примере г. Днепропетровска

5. При расчете концентрации какого-либо вредного ингредиента, поступающего от источника, учитываются возможные потери (т.е. поглощение) его при прохождении через определённые эле-

менты подстилающей поверхности, которые привязаны к системе координат x, y.

6. Направление ветра, устойчивость атмосферы, величины боковой и вертикальной дисперсии, а также наличие осадков, тумана и других явлений фиксируется в заданный расчетный момент (т.е. в реальном времени). Эти метеоусловия учитываются в процессе расчета.

7. В точке рецептора суммируются отдельные ингредиенты, поступившие от всех источников, находящихся в зоне влияния.

8. Производится расчет потока и концентрации загрязнений в окрестности локального объекта, находящегося в точке рецептора (это может быть отдельное здание, сооружение и т.п.). С использованием метода локализации могут быть рассчитаны концентрации газообразных и пылевых загрязнений в различных точках города.

7.7.3 Расчет локальных течений загрязнённого воздуха в окрестности отдельных городских объектов

Рассмотрим следующие характерные городские объекты: уличный каньон; площадь или крупный регулируемый перекресток; растительный массив, водные объекты (река, озеро); участок плотной высотной застройки; орографические объекты; возвышенность типа холма или гряды, ложбина или овраг; уступ с определённым углом наклона; отдельные крупные здания или сооружения.

Типичный уличный каньон представлен на рис. 7.11. Для расчета концентрации вредных веществ в воздушной среде внутри каньона воспользуемся простыми приближенными соотношениями, основанными на принципе баланса масс [20]. Источниками выбросов являются движущимися внутри этого каньона автомобили.

Приведенные ранее выражения можно несколько упростить и записать

$$\varphi = \frac{\overline{Q}}{u_n h_1 A} \tag{7.240}$$

Здесь $\overline{Q}$ $\left(\frac{мг}{м \cdot с}\right)$ – суммарный массовый приток выбросов, поступающих от автомобилей, находящихся одновременно на единице длины автотрассы l_1 (в данном случае $l_1 = 1м$); $h_1(м)$ – средняя высота строений по обе стороны улицы; u_n – нормальная к средней

линии улицы компонента скорости ветра $u_n = u\sin\theta$, причем θ – острый угол между $\vec{u}$ и этой средней линией; A – коэффициент, определяющий долю незаполненной строениями площади в боковых стенках каньона, обычно $A = 0.3 \div 0.5$.

В уличный каньон могут также поступать загрязнения, принесенные извне. Рассмотрим случай, когда нормальная к оси каньона компонента скорости u_n существенно превышает её продольную составляющую u_τ.

Воздушные потоки в пределах уличного каньона рассматривали отдельные авторы на основе теоретического анализа, или же на принципах экспериментального моделирования [186, 188, 195, 196, 202, 204, 205, 206, 207]

В целом, следует отметить, что реальные локальные течения значительно сложнее, чем те, которые рассматриваются в упрощенных моделях. К примеру, довольно трудно учесть дополнительную турбулизацию потока в каньоне за счет движения скоростного транспорта. Непросто моделировать миграцию загрязнений при отсутствии ветра – в этих случаях превалирует диффузия в неподвижной среде. При движении автомобилей происходит выброс горячего газа, который поднимается (всплывает) наверх. Благодаря разности температур это может привести к тому, что концентрация загрязнений на уровне верхних этажей при отсутствии ветра может быть выше, чем на уровне пешеходов. Всё это говорит о том, что именно процессы в уличном каньоне, где реализуется высокая концентрация вредных газов, формируется высокая запыленность и большая шумовая нагрузка, возникает дефицит кислорода, требуют дальнейшего серьёзного анализа.

Концентрацию загрязнений на крупном перекрестке, или на площади, где движутся или стоят с работающими двигателями N автомобилей, предлагается рассчитывать по формуле

$$\varphi = \frac{\overline{\overline{Q}} \cdot l}{u\ h_1 A} \tag{7.241}$$

В данном случае $\overline{\overline{Q}}\left(\frac{мг}{м^2 \cdot с}\right)$ – суммарный выброс от N автомобилей, приходящихся на единицу площади, т.е. $\overline{\overline{Q}} = \frac{Nq}{l^2}$, причем

$q\left(\frac{мг}{с}\right)$ – выброс от одного автомобиля, $l\,(м)$ – линейный размер площади (перекрёстка), $h_1(м)$ – средняя высота зданий обрамляющих её, A – имеет тот же смысл, что и в формуле (7.240), однако в этом случае $A = 0.8 \div 1.0$.

По приведенной формуле приближенно определяется концентрация загрязнений на площади от внутренних источников. Определенная часть загрязнений может поступать вместе с ветровым потоком от внешних источников, находящихся в зоне влияния. В качестве примера рассмотрим анализ концентрации окиси углерода (CO) на площади Островского в городе Днепропетровске при разных метеоусловиях. В этом примере учтены внутренние и внешние источники.

Будем считать, что площадь имеет квадратную форму со сторонами l=75 м. Размер площади S_0=5625 кв.м. Рассмотрим случай, когда на площади одновременно находятся 20 автомобилей с работающими двигателями. Осреднённые выбросы карбюраторного двигателя автомобиля характеризуются данными, приведенными ранее. Так для окиси углерода имеем: q_{CO}=752г/ч=210мг/с. Концентрация загрязняющих веществ в атмосфере над заданным пунктом определяется наличием выбросов непосредственно в пределах данного пункта и выбросами, поступающими от источников, которые расположены в зоне влияния. Такими источниками являются дымовые трубы промышленных энергетических предприятий и автомобили, которые двигаются по улицам города. Интенсивность выбросов сосредоточенных источников будем определять по данным, приведенным на рис. 7.15, где показано расположение всех источников на географической карте города. При этом координаты задаются в декартовой системе x, y. Основные сосредоточенные источники в этой системе имеют такие координаты в метрах (первая координата – x, вторая координата – y).

1	(8800; 9000)	2	(9500; 11500);
3	(10700; 10000)	4	(11900; 11600);
5	(12000; 13800	6	(12300; 6300);
7	(13200; 13800	8	(15300; 13600);
9	(16300; 15150	10	(17800; 12300);
11	(20500; 12800	12	(21900; 13400);
13	(22700; 4800).		

Для линейных источников выбросов точка влияния находится на сечении основной линии дороги и оси x' (направление ветра). При этом интенсивность выбросов в этой точке определяется количеством автомобилей на единице длины. Осреднённо считается, что на 1 км находится 40 автомобилей или 0,04 авт/м при однородном движении. Погонные выбросы одного автомобиля при скорости 9 м/с (приближенно 32 км/час) составляют $\overline{q}$ =23.3мг/м·с. Поскольку на 1 м имеем 0,04 автомобилей то $\overline{q} = 0{,}04\overline{q}_1 = 0{,}932$ мг/м·с. Если магистраль имеет N рядов, тогда $\overline{q} = 0{,}932 \cdot N$ мг/м·с. На участке подъема эту величину нужно помножить на коэффициенты k =1,2÷1,5 (в зависимости от крутизны подъема). Кроме того, необходимо принять во внимание острый угол γ между центральной линией магистрали и вектором скорости ветра. Тогда

$$\overline{q} = 0{,}932 \cdot N \sin\theta \qquad (7.242)$$

Формулы для расчета концентрации выбросов от источников, которые находятся в пределах пункта исследования, выбросов на магистралях и выбросов сосредоточенных источников были приведены раньше. Будем считать, что скорость ветра изменяется в пределах V = 1,5÷7,0 м/с, высота слоя перемешивания изменяется в пределах h_0 = 10÷50 м, а уровень устойчивости атмосферы отвечает категории Д (теплое время года, утро, малооблачно, осадки отсутствуют). Вектор скорости ветра направлен под углом 10° к оси *x*.

Результаты расчета подаются на рис.7.10 где $\overline{\varphi} = \varphi/\varphi_1$, где φ_1 – предельно допустимая концентрация *CO*. Здесь принято ПДК=1мг/м^3.

Результаты расчета показывают, что основной переменный фактор, влияющий на результат – это комбинация метеорологических данных. С уменьшением скорости ветра и толщины слоя перемешивания уровень загрязнений возрастает и может превысить ПДК.

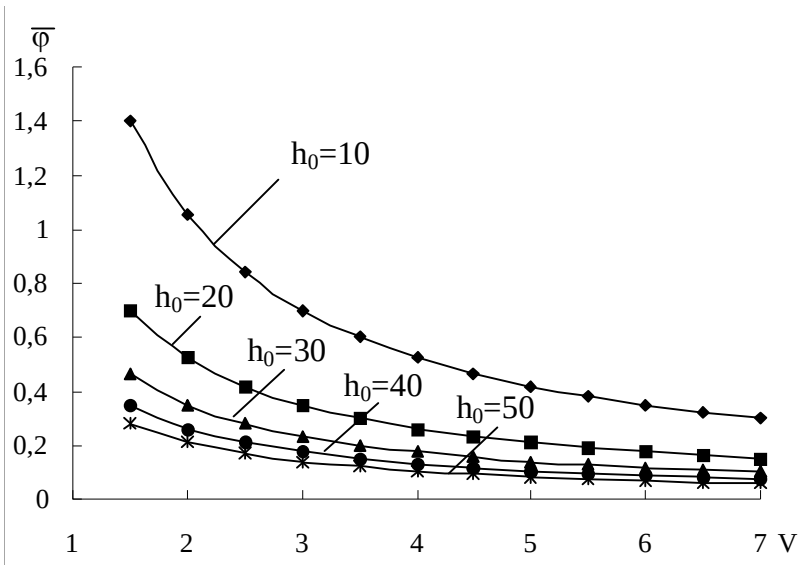


Рис. 7.16 Относительная концентрация $\overline{\varphi}$
при различных метеорологических условиях

Выбранный пункт (площадь им. Островского) относится к наиболее загрязненным с точки зрения состояния воздушной среды, что в принципе, подтверждается данными экспериментальных измерений.

В качестве другого примера рассчитана концентрация окиси углерода *CO* в двух характерных пунктах В и Д с координатами $x_B = 22308$м, $y_B = 5330$м и $x_Д = 17134$м, $y_Д = 7410$м на территории г. Днепропетровска. Координаты рецептора выбраны таким образом, чтобы в зону влияния попадала Приднепровская теплоэлектростанция, как наиболее мощный загрязнитель воздушной среды города (с выбросом ~70 тыс.т. в год). Направление ветра выбрано под углом $\eta_B = 351°$ для точки *B* и под углом $\eta_Д = 147°$ для точки *Д* (в обоих случаях это угол между осью Ox и $\vec{u}$, отсчитанный против часовой стрелки). В зону влияния попадают также активные автомагистрали. Результаты расчета относительной концентрации *CO* $\overline{\varphi}_{co}$ представлены на рис. 7.17 для пунктов *B* и *Д* соответственно.

$$\overline{\varphi}_{co} = \frac{\varphi_{co}}{\varphi_{ПДК}} \qquad (7.243)$$

Здесь $\varphi_{ПДК}$ – предельно допустимая концентрация, суточное значение ПДК для CO равно 1(мг/м^3).

Концентрация рассчитана для различных скоростей ветра ($u = 2 \div 10$ м/с) и толщин слоя смешения h_0 (50,70,100м).

Полученные данные показывают степень возрастания концентрации по мере уменьшения скорости ветра и толщины слоя смешения h_0. Видно также сочетание значений u и h_0, при которых концентрация *CO* начинает превышать допустимые значения. Отметим что пункт *Д* расположен на другом берегу Днепра по отношению к ТЭС. Частичное поглощение *CO* на водной поверхности шириной ~1000 *м* существенно сокращает значения $\overline{\varphi}_{co}$ в этом пункте.

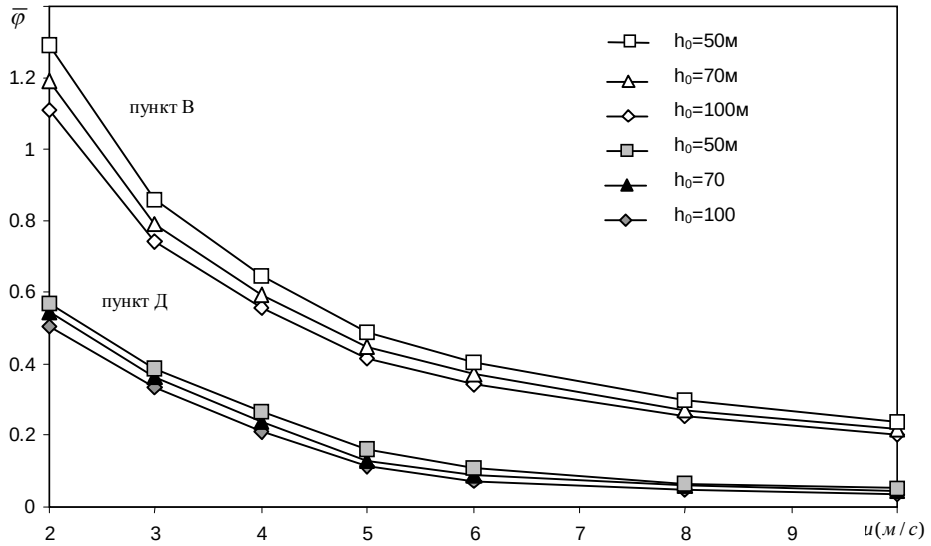


Рис. 7.27. Относительная концентрация окиси углерода в пунктах В и Д при различных метеоусловиях

Проведены также расчеты для концентрации и интенсивности осаждения пылевых загрязнений в двух пунктах города. Пункт *A* с координатами x_A=18122м, y_A=16354м, расположен на ул. Богдана Хмельницкого. Пункт *B* с координатами x_B=17446м, y_B=11362м – на ул. Фучика, на территории городской детской больницы, вблизи парка им. Шевченко. Направление ветра (угол между осью x и вектором скорости ветра, отсчитанный против часовой стрелки) γ_A=107° (южный ветер), а γ_B=251° (северный) задается таким образом, чтобы в первую очередь учесть пылевые загрязнения, поступающие от Нижнеднепровского трубопрокатного завода (в дальнейшем источника I-1, имеющий координаты x=18616м, y=15028м). При этом, в зону влияния, построенную для пункта А, попадает также Приднепровская ТЭС (источник I-2), но в силу большей удаленности (11193 *м*) её вклад на порядок меньше.

На рис. 7.18, рис.7.19 приведены результаты расчета рассеяния мелкодисперсной пыли, выбрасываемой в процессе выплавки

стали в мартеновской печи. Осредненное (за время плавки) значение содержания пыли в отходящих продуктах сгорания взято из [14]: 5г/м^3 при удельной интенсивности кислородной продувки 10 м^3/т·ч. Количество отходящих продуктов сгорания 100 тыс.м^3/ч.

При небольшой скорости ветра u=2м/с концентрация пыли у поверхности земли на расстоянии менее 1500м превышает предельно допустимое значение (ПДК)

$$\varphi_{ПДК}=0{,}5\text{мг/м}^3 \qquad (7.244)$$

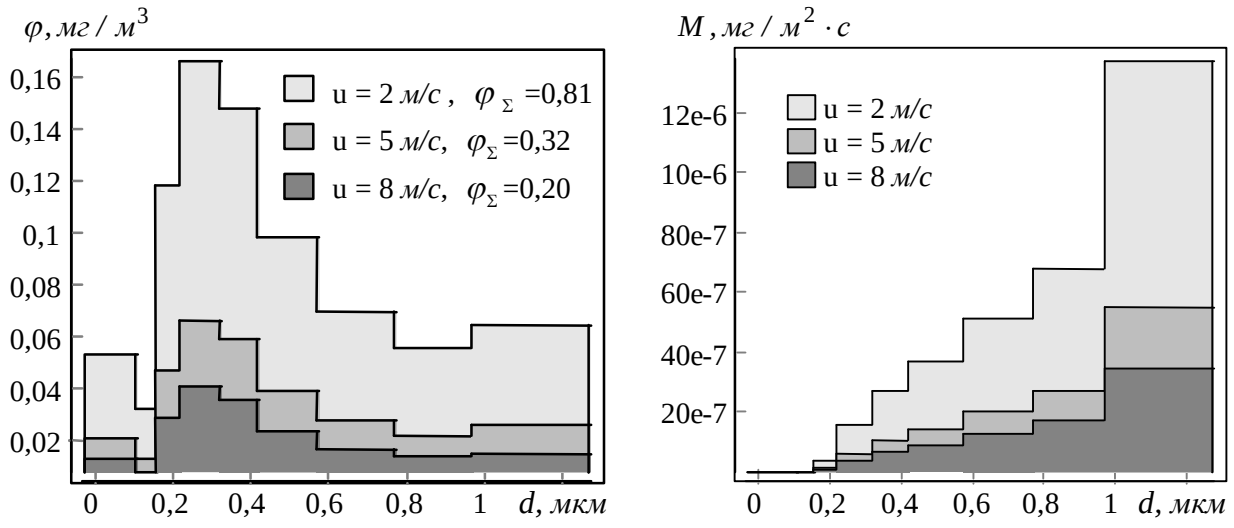


Рис. 7.38 Величина концентрации и интенсивности осаждения частиц пыли, рассчитанная для каждой фракции в пункте *A* (на расстоянии 1415м от источника) для различных значений скорости ветра

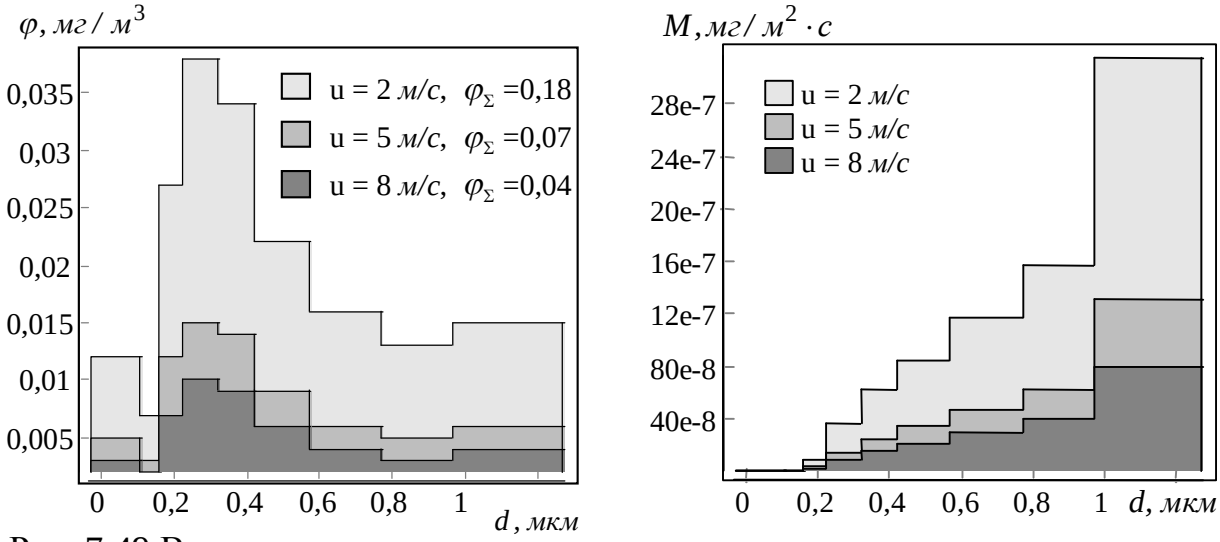


Рис. 7.49 Величина концентрации и интенсивности осаждения частиц пыли, расчитанная для каждой фракции в пункте *B* (на расстоянии 3848м от источника) для различных значений скорости ветра

С увеличением значений u происходит снижение концентрации вследствие более интенсивного рассеяния примесей. Необходимо отметить, что при сложении значений концентрации пыли, поступающей от названного источника со средним по городу фоновым значением, определяемым другими источниками [166] $\varphi_ф$=0,2мг/м^3 наблюдается превышение ПДК уже для среднегодовой скорости ветра u =4,9м/с.

На рис. 7.20 приведены результаты расчета для пункта *A* массы пыли M (мг/м^2), осевшей в течение года. Интенсивность выбросов пыли

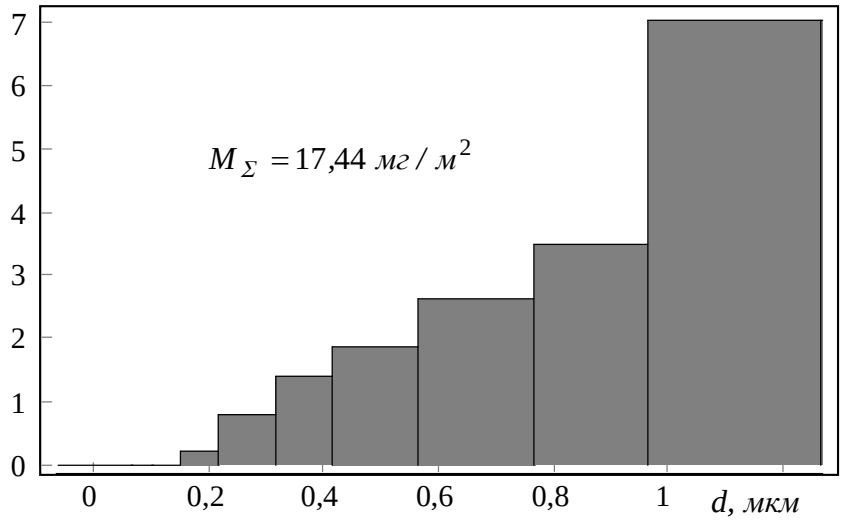


Рис. 7.20 Масса пыли, поступающей в течение года от источника I-1 и оседающей в пункте *A* на 1 м^2

определялась исходя из данных об общей массе годового выброса трубопрокатного завода [166]. При этом для каждого месяца задавалась частота повторений ветра данного направления и его среднемесячная скорость.

На рис. 7.21 приведены результаты расчета нестационарной задачи рассеивания пылевого облака, образовавшегося в процессе плавки в момент наиболее интенсивного выброса пыли.

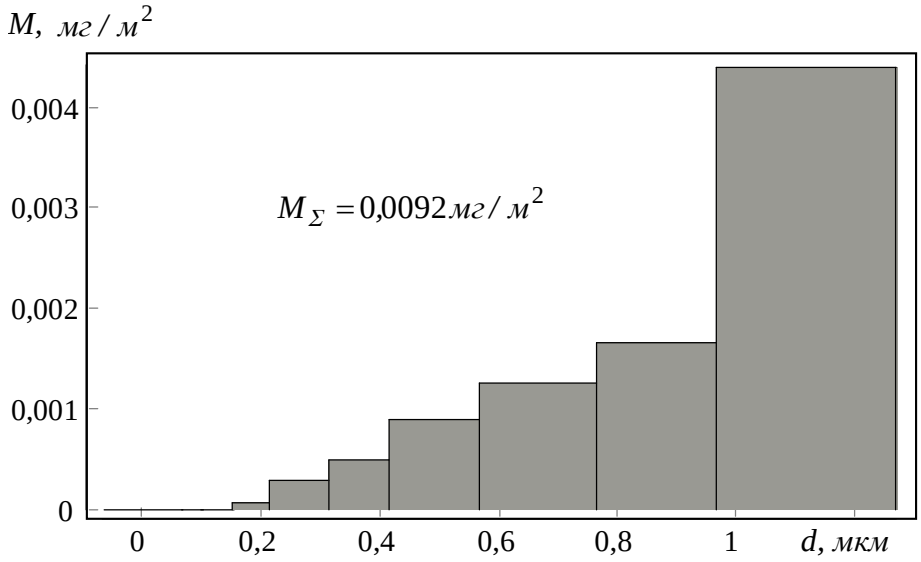


Рис. 7.25 Масса пыли, выпавшей в пункте *A* на 1 м2 в результате прохождения пылевого облака от источника I-1 (Q=167кг, σ_0=20м)

На основании проведенных для пыли расчетов можно сделать вывод, что концентрация пылевых выбросов в жилых районах, расположенных близко к предприятию, превышает ПДК при средних значениях скорости ветра. Учитывая большое количество промышленных предприятий, расположенных на территории города, проблему контроля уровня загрязнения воздуха следует считать чрезвычайно актуальной. Предлагаемая методика может быть частью системы компьютерного мониторинга экологической ситуации на территории большого города.

Рассмотрим случаи расчета концентрации загрязнений при движении около отдельных особенностей рельефа.

Вдоль трассы перемещения газоаэрозоля от источника в направлении ветра, на подстилающей поверхности могут встречаться различные особенности (холм, ложбина, овраг, уступ, растительный массив, водная поверхность). Кроме того, может происходить убывание концентрации за счет химических реакций, радиоактив-

ного распада, вымывания осадками, гравитационного осаждения и т.п.

Одним из наиболее приемлемых методов учета рельефа является коррекция дисперсий σ_y, σ_z, так как они интегрально учитывают эффекты неровности поверхности. В литературе имеются данные по учету характера поверхности при определении дисперсии. Важным является также значение т.н. “параметра шероховатости” z_0 (высота над поверхностью, на которой скорость равна 0). Например, для городских строений $z_0 \approx 100$ см, для растительных массивов $z_0 \approx 20 \div 100$ см. Одним из методов учета влияния на распространение загрязнений около двумерных (гряда, овраг) или трехмерных (холм, ложбина) препятствий, является введение в рассмотрение функций $z_1 = f_1(x)$ и $z_2 = f_2(x, y)$.

В этом случае в выражение типа (7.200) необходимо подставить вместо координаты z значения $f_1(x)$ или $f_2(x, y)$. Понятно, что $f_1(x)$ геометрически представляется выпуклой или вогнутой линией, а $f_2(x, y)$ – выпуклость или впадину трехмерного характера (например, полу-эллипсоид).

В расчётах с использованием предлагаемой здесь методики используются и другие варианты учёта орографии. Многие из них приведены в цитируемой ранее работе [50].

Растительный массив, находящийся на пути распространения загрязненного воздуха, частично поглощает вредные вещества. Подобные препятствия иногда называют полупрозрачными объектами. То же можно сказать и об участках плотной высотной застройки. В обоих случаях, учёт убывания концентраций предлагается вести путём умножения правой части выражения для φ, например, (7.247), (7.248) и т.д., на соответствующую функцию убывания типа

$$F_i = \exp(-\lambda t) = \exp\left(-\lambda \frac{x}{u}\right) \qquad (7.245)$$

Число множителей определяется количеством эфектов убывания, для каждого из которых следует подставить соответствующее значение λ_i. Интенсивность радиоактивного распада нуклидов известна достаточно хорошо. К сожалению, для других явлений множители λ_i определяются в основном эмпирическим путем. Так для

вымывания примесей во время осадков такие данные приведены в [50].

В формулах (7.247), (7.248) рассматриваются два крайних случая – полное поглощение, или отражение газоаэрозоля от подстилающей поверхности. Промежуточным вариантом может быть частичное поглощение, к примеру, на водной поверхности или в растительном массиве, описываемое выражением (7.245). При этом для водной поверхности удобно использовать время перемещения t, а для растительного массива – его линейный размер x. После прохождения каждой из особенностей, на поверхности задается новое гауссово распределение для φ с заданной начальной дисперсией $\sigma_0 = \sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_z^2}$. В этом случае используются формулы

$$\varphi(y,z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_0^2 u}\exp\left(\frac{y^2 + (z-h)^2}{2\sigma_0^2}\right) \tag{7.246}$$

Такая потребность возникает, когда струя прошла через какую-либо особенность (например, растительный массив) и её параметры изменились. В таком случае для приподнятого источника в сносящем потоке имеем

$$\varphi(x,y,z) = \frac{Q\left[1 \pm \exp\left(-2h^2/\sigma_0^2\right)\right]^{-1}}{2\pi\sigma_y\sigma_z u}\exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right)\cdot\left[\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \pm \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right] \tag{7.247}$$

В этом выражении

$$\sigma_y^2 = \sigma_0^2 + \sigma_{y1}^2, \qquad \sigma_z^2 = \sigma_0^2 + \sigma_{z1}^2. \tag{7.248}$$

Здесь σ_{y1}^2 и σ_{z1}^2 вычислены на расстоянии x от начального сечения.

Запишем выражение для линейного источника бесконечной длины, приподнятого над поверхностью земли на высоту h

$$\varphi(x,z) = \frac{Q\left[1 \pm \exp\left(-2h^2/\sigma_0^2\right)\right]^{-1}}{\sqrt{2\pi}\sigma_z u}\left[\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \pm \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right] \tag{7.249}$$

Здесь двойные знаки имеют смысл отмеченный ранее, а именно, знак “+” соответствует полному отражению, а знак “–” – поглощению.

$$\sigma_z = \sigma_0 + \sigma_{z1} \tag{7.250}$$

Дисперсия σ_{z1} определяется на расстоянии x от начального сечения. Уравнение (7.249) записано для случая, когда в плоскости $x = const$, где расположен линейный источник, поток уже имеет форму струи с гауссовым распределением

$$\varphi(x,z) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\sigma_0 u} \exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_0^2} \right) \qquad (7.251)$$

Если же он представляет собой бесконечно тонкую струю типа дельта-функции от z, тогда $\sigma_0 = 0$. Для наземного источника полагают $h = 0$, а концентрация на поверхности земли определяется при $z = 0$.

Рассмотрим приближённую методику построения поля воздушного потока в границах искусственных и природных углублений типа глубоких балок и уличных каньонов, характерных для территорий некоторых больших городов. При этом принимается приближённая схема течения, использующая как эмпирические так и теоретические соотношения. Это, в конечном счете, приводит задачу к решению обыкновенного дифференциального уравнения, описывающего форму разделяющей линии в течении и позволяет строить на этой основе поле скоростей. Полученные результаты могут быть использованы при расчёте распространения техногенных загрязнений в атмосферном воздухе больших городов, для анализа условий жизнедеятельности городского населения и других потребностей.

Известно, что городские территории обладают целым рядом особенностей, отличающих их от сельской местности. Сюда можно отнести температурные аномалии, характер ветрового потока и локальной воздушной циркуляции, уровень влажности атмосферы, высокую удельную (приходящуюся на единицу площади) концентрацию различных источников вредных выбросов и т.п. В отдельных городах к этому следует добавить особую структуру подстилающей поверхности: сложный рельеф, т.е. чередование возвышенных и низменных участков территории, наличие крутых оврагов, а также характер застройки, когда высотные здания, плотно расположенные по обе стороны улицы, образуют глубокие своеобразные каньоны.

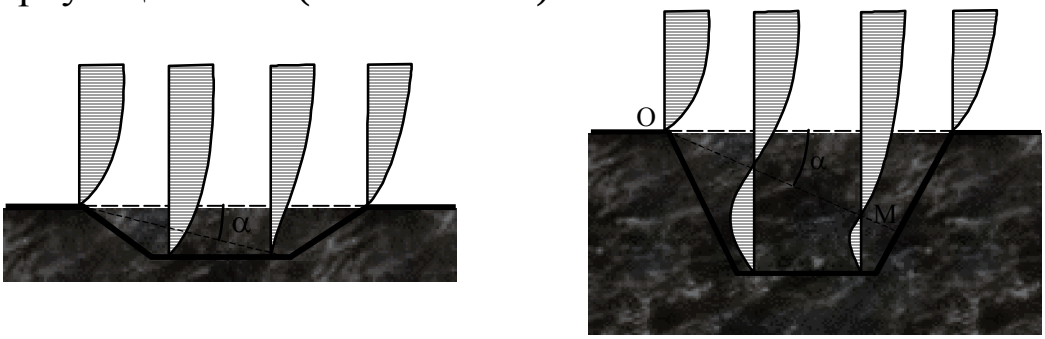
Так, например, территория города Днепропетровска (который, как известно, включен в состав экологически депрессивных рай-

онов Украины) обладает подобными характеристиками рельефа. На этой территории расположены семь оврагов (балок), открывающихся в долину реки Днепр. Длина балок достигает 3 – 5 км, ширина днища лежит в пределах 0,06 – 0,35 км, а крутизна склонов достигает 25° – 55°. Одна часть территории города расположена на возвышенном правом берегу Днепра, а другая часть – пониженная и относится к долинно-речному ландшафту. Территория города рассекается руслами Днепра и Самары.

Отсюда следует, что корректная постановка задач о распространении газоаэрозолей над подобной территорией требует учета названных характеристик.

В уличных каньонах реализуется течения подобные тем, которые возникают в глубоких оврагах. Анализ этих течений позволяет оценивать уровень комфортности жильцов зданий, образующих такой каньон и степень опасности, возникающей при распространении вредных примесей.

Рассмотрим сначала случай поперечного обтекания. Отметим, что подобные задачи рассматривались многими авторами, но с другой целью, а именно для анализа проветривания глубоких карьеров, возникающих при открытом способе добычи полезных ископаемых [105, 166]. При поперечном ветровом потоке в русле оврага или в каньоне могут быть реализованы две схемы течения – прямоточная и рециркуляционная. (Рис. 7.22622).



а б

Рис. 7.226 Схемы поперечного течения в овраге:
а) прямоточная; б) рециркуляционная

Установлено, что прямоточная схема реализуется, когда угол откоса подветренного борта оврага (карьера) меньше или равен углу расширения свободной турбулентной струи α ($\alpha \approx 15° – 20°$), а рециркуляционная, – когда этот угол превышает α. При второй схеме образуется застойная зона, что существенно ухудшает усло-

вия естественного проветривания. Кроме геометрических параметров сечения оврага, характер течения во многом зависит от метеоусловий, т.е. скорости ветра, степени устойчивости атмосферы и других характеристик. Рассмотрим подробнее рециркуляционную схему, поскольку реализация её в глубоких оврагах и уличных каньонах более вероятна. Будем для общности принимать во внимание, что у борта оврага могут размещаться строения высотою h_0. Расчетная схема течения изображена на рис. 7.23. Циркуляционная зона отделена от внешнего течения разделяющей линией ОМ. Течение рассматривается в декартовой системе координат *Oxyz* с началом в точке пересечения контура дна с горизонтом подстилающей поверхности на подветренной стороне. Ось *Oz* направлена вертикально вверх, а ось *Ox* образует правую систему. С определенной степенью приближения поток можно считать двумерным, т.е. не зависящим от координаты *y*.

На рис. 7.23 использованы следующие обозначения: L – ширина балки; H_{0max} – её максимальная глубина; (предполагается, что $L \sim H_{0max}$); h_0 – средняя высота зданий вблизи подветренного борта оврага; $z = \mu(x)$ и $z = H_0(x)$ – уравнения разделяющей линии тока и контура дна оврага соответственно; U_∞ – вектор скорости набегающего ветрового потока.

В данной системе координат горизонтальная компонента скорости $u(x,z)$ меняет направление на разделяющей линии. Вертикальная компонента скорости $w(x,z)$ возникает в результате торможения потока у наветренного борта оврага.

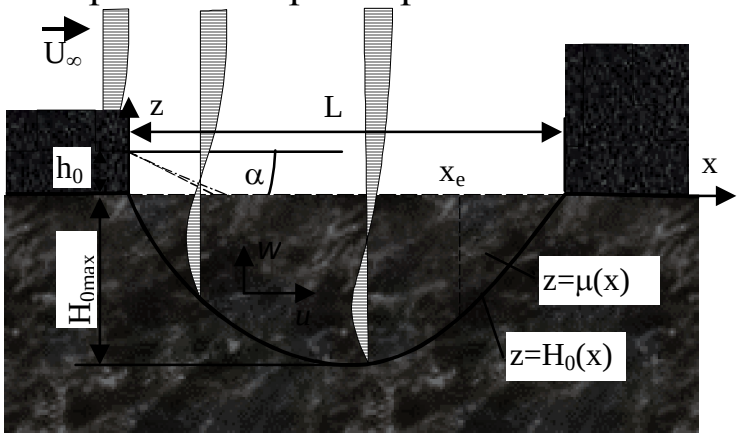


Рис. 7.23 Схема движения воздуха в глубоком овраге

Профиль скорости ветра в приземном слое будем задавать степенной зависимостью.

$$u(z)=\begin{cases}\bar{u}_1\left(\dfrac{z}{z_1}\right)^m, & \text{при } 0\le z\le H_1,\\ \bar{u}_1\left(\dfrac{H_1}{z_1}\right)^m, & \text{при } z>H_1.\end{cases} \tag{7.252}$$

В формуле (7.252) $\bar{u}_1$ – скорость ветра на небольшом расстоянии z_1 от горизонта подстилающей поверхности (обычно z_1 = 1м); H_1 – высота приземного слоя атмосферы (H_1 ~ 50 – 100м). Показатель степени m зависит от степени устойчивости атмосферы, при этом m = 0,1 – 0,2 для неустойчивого, и m = 0,2 – 0,3 для её устойчивого состояния. В случае прямоточной схемы функцию *u(x,z)* представим в виде

$$u(x,z)=\bar{u}_1\left(\frac{z-H_0(x)}{z_1-H_0(x)}\right)^m. \tag{7.253}$$

Для рециркуляционной схемы имеем две области с разными зависимостями для компоненты скорости *u(x,z)*

$$u(x,z)=\begin{cases}\bar{u}_1\left[\left(\dfrac{z-H_0(x)}{z_1-H_0(x)}\right)^m-\left(\dfrac{\mu(x)-H_0(x)}{z_1-H_0(x)}\right)^m\right], & \text{при } z>\mu(x),\\ A(x)\left[z-\mu(x)\right]\cdot\left[z-H_0(x)\right], & \text{при } H_0(x)\le\end{cases} \tag{7.254}$$

Здесь функция *A(x)* определяется из условия гладкого сопряжения профилей скорости при $z = \mu(x)$

$$A(x)=\frac{m\bar{u}_1}{\left[\mu(x)-H_0(x)\right]^2}\left(\frac{\mu(x)-H_0(x)}{z_1-H_0(x)}\right)^m. \tag{7.255}$$

В выражениях (7.254) и всюду дальше координата x изменяется в промежутке $0\le x\le x_e$ (Рис. 7.23), где значение x_e определяется как абсцисса точки пересечения разделяющей линии с профилем балки.

Введем новые переменные ξ и θ в виде

$$\xi = \frac{z - H_0(x)}{H_1 - H_0(x)}, \quad (0 \le \xi \le 1). \tag{7.256}$$

$$\theta(x) = \frac{\mu(x) - H_0(x)}{H_1 - H_0(x)}$$

Здесь $\theta(x)$ даёт уравнение разделяющей линии в безразмерном представлении.

В конечном счете выражение (7.56) принимает вид

$$u(x,\xi) = \beta \begin{cases} \dfrac{\xi^m - \theta^m(x)}{m}, & \text{при } \xi > \theta(x), \\ \dfrac{\xi\left(\xi - \theta(x)\right)}{\theta^{2-m}(x)}, & \text{при } 0 \le \xi \le \theta(x), \end{cases} \tag{7.257}$$

в котором использовано эмпирическое соотношение, применяемое для глубоких карьеров [96]

$$\beta = 0{,}635 m \bar{u}_1 \left(\frac{H_1}{z_1} \right)^m. \tag{7.258}$$

Для определения вертикальной составляющей $w(x,z)$ воспользуемся уравнением неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{7.259}$$

при граничном условии

$$w\big|_{z=H_0(x)} = 0. \tag{7.260}$$

Из равенств (7.259), (7.260) следует

$$w(x,z) = -\int_{H_0(x)}^{z} \frac{\partial u}{\partial x} dz. \tag{7.261}$$

В безразмерных переменных значение w получим в виде

$$w(x,\xi)=\begin{cases} w\big|_{\theta}+\beta\dfrac{(H_1-H_0)\theta'(\xi-\theta)}{\theta^{1-m}}+ \\ +\beta H_0'\left(\dfrac{\xi^m}{m}-\dfrac{\xi^{m+1}}{m+1}+\dfrac{\theta^{m+1}}{m+1}-\dfrac{\theta^m}{m}\right), & \text{при } \theta(x)<\xi\le 1, \\ \beta\left[H_1-H_0(x)\right]\dfrac{\xi\vartheta(x,\xi)}{\theta^{3-m}(x)}, & \text{при } 0\le\xi\le\theta(x). \end{cases} \tag{7.262}$$

В соотношении (7.262) обозначено

$$\vartheta(x,\xi)=\left(\frac{2-m}{3}\xi-\frac{1-m}{2}\theta\right)\xi\theta'+\left[\left(1+\frac{\theta}{2}\right)\xi-\frac{2}{3}\xi^2-\theta\right]\theta\frac{H_0'}{H_1-H_0}, \tag{7.263}$$

$$w\big|_{\theta}=\beta\left(H_1-H_0\right)\theta^{m+1}\lambda(x), \tag{7.264}$$

$$\lambda(x)=\frac{m+1}{2}\frac{\theta'}{\theta}-\frac{1}{6}\frac{H_0'}{H_1-H_0}. \tag{7.265}$$

В обозначениях (7.263) – (7.265) $\theta'=\dfrac{d\theta}{dx}$, $H_0'=\dfrac{dH}{dx}$, а функция $w\big|_{\theta}$ выражает вертикальную компоненту скорости на разделяющей линии.

Таким образом, получено приближенное представление для поля скоростей в поперечном сечении глубокого оврага при условии, если будет известна форма разделяющей линии тока $z = \mu(x)$ или $\xi=\theta(x)$. Для её определения воспользуемся некоторыми физическими предположениями об изменении характера вихревых потоков по мере удаления от подстилающей поверхности.

Известно, что в приземном слое основную роль в процессах вихреобразования выполняет мелкомасштабная турбулентность. Вертикальные градиенты гидродинамических и физических величин в этом слое превышают горизонтальные градиенты. С увеличением высоты вертикальное перемешивание уменьшается, а процессы диффузии выравниваются уступая место крупномасштабным вихрям. Можно предположить, что при $z\to H_1$ мелкомасштабная завихренность стремится к нулю.

$$\Omega\big|_{z=H_1}=\frac{\partial u}{\partial z}-\frac{\partial w}{\partial x}\to 0,\ \text{при}\ z\to H_1. \tag{7.266}$$

С использованием замены переменных соотношение (7.266) можно выразить приближенным равенством

$$\frac{1}{H_1 - H_0}\frac{\partial u}{\partial \xi} - \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \text{ при } \xi = 1. \tag{7.267}$$

Принимая во внимание (7.257), (7.262), после несложных преобразований получим из (7.267) уравнение

$$\theta\theta'' - [a(\theta) - m]\theta'^2 - 2\frac{H_0^{'}\theta\theta'}{H_1 - H_0} + \frac{a(\theta)\theta^{2-m}}{H_1 - H_0}\left(H_0^{''}b(\theta) - \frac{1}{H_1 - H_0}\right) = 0\cdot \tag{7.268}$$

В уравнении (7.268) обозначено

$$a(\theta) = \frac{1}{1 - (5-m)\theta/6},$$
$$b(\theta) = \frac{1}{m(m+1)} - \frac{\theta^m}{m} + \frac{(5-m)\theta^{m+1}}{6(1+m)}. \tag{7.269}$$

Нелинейное уравнение (7.268) можно проинтегрировать лишь численными методами при соответствующих начальных условиях.

Для решения уравнения (7.268) в квадратурах предположим, что $\theta(x)$ есть величина первого порядка малости, т.е.

$$|\theta(x)| = \left|\frac{\mu(x) - H_0(x)}{H_1 - H_0(x)}\right| << 1. \tag{7.270}$$

Тогда пренебрегая в уравнении (7.268) и в начальных условиях членами более высокого порядка малости, получим

$$\theta'' - \frac{2H_0^{'}(x)}{H_1 - H_0(x)}\theta' - (1-m)\frac{\theta'^2}{\theta} - \frac{H_0^{''}(x)}{[H_1 - H_0(x)]}\frac{\theta}{m(m+1)} = 0. \tag{7.271}$$

при начальных условиях

$$\theta(0) = \frac{h_0 - H_0(0)}{H_1 - H_0(x)},$$
$$\theta'(0) = -\frac{tg\alpha + H_0'(0)}{H_1 - H_0(x)}. \tag{7.272}$$

Уравнение (7.271) решается в квадратурах для отдельных случаев. Первый из них относится к течению внутри уличного каньона. На рис. 7.23 это соответствует $H_0(x) \equiv 0$, при этом высота левого борта каньона равна h_0. В таком допущении уравнение (7.271) преобразуется к виду

$$\theta'' - (1-m)\theta'^2 / \theta = 0 \tag{7.273}$$

с начальными условиями

$$\theta(0) = h_0 / H_1,$$
$$\theta'(0) = -tg\alpha / H_1. \tag{7.274}$$

Из (7.273) легко получить общее решение

$$\theta(x) = \left[m(C_1 x + C_2)\right]^{1/m}. \tag{7.275}$$

Константы интегрирования в (7.275) согласно с начальными условиями (7.274) определяются как

$$C_1 = -\frac{tg\alpha}{H_1}\left(\frac{H_1}{h_0}\right)^{1-m} \quad C_2 = \frac{1}{m}\left(\frac{h_0}{H_1}\right)^{m}. \tag{7.276}$$

Зная форму разделяющей линии тока в виде (7.275) можно определить поле скоростей в каньоне из уравнения (7.257) и (7.262).

Для случая, когда $H_0(x) \neq 0$ можно воспользоваться экспериментальными данными, согласно которым разделяющая линия хорошо аппроксимируется степенной зависимостью. Другими словами в полученном ранее выражении (7.275), коэффициенты C_1 и C_2 следует согласовать с начальными условиями (7.272). Тогда

$$\theta(x) \approx \left[\frac{\delta - \beta x}{\delta^{1-m}}\right]^{\frac{1}{m}}, \tag{7.277}$$

где

$$\delta = \frac{h_0 - H_0(0)}{H_1 - H_0(0)}, \quad \beta = m\frac{tg\alpha + H_0'(0)}{H_1 - H_0(0)}.$$

Таким образом, получена совокупность замкнутых выражений для определения формы разделяющей линии тока и поля потока в оврагах и уличных каньонах для случаев прямоточного и рециркуляционного течений.

Ниже, в качестве примера, рассмотрено течение внутри уличного каньона (Рис. 7.23724). Здесь показана форма разделяющей линии для различных значений показателя степени m, характеризующего состояние атмосферы. Расчеты проведены с применением простой зависимости (7.275). Все геометрические размеры каньона отнесены к высоте зданий расположенных с подветренной стороны.

Несмотря на значительные упрощения, предпринятые в изложенной выше методике, представленные результаты качественно согласуются с экспериментальными данными известными для глубоких карьеров [105].

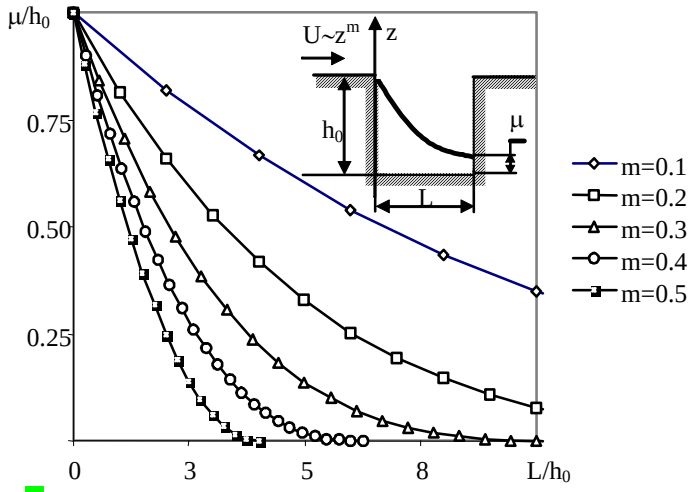


Рис. 7.237 Форма разделяющей лини для уличного каньона и при различном состоянии атмосферы

Представленная зависимость замечательна тем, что позволяет быстро оценить часть нижних этажей зданий улицы, которые оказывается в условиях плохого естественного проветривания. Зная форму разделяющей линии тока и значения скоростей во всей исследуемой области можно определить концентрацию приходящих извне загрязнений. Для этой цели можно предположить, что вдоль каждой линии тока концентрация вредных веществ изменяется в соответствии с известным законом Гаусса.

Полученные результаты могут быть использованы для расчета распространения атмосферных загрязнений в окрестности различных городских объектов, для оценки комфортности проживания людей в зданиях, образующих уличный каньон, для оценки влияния вновь возводимых высотных зданий и сооружений на локальную воздушную циркуляцию (что можно использовать в архитектурной практике), а также для других целей.

7.8 Численный расчет обтекания типовых городских объектов

Анализ взаимодействия ветрового потока и строительного объекта представляет собой не простую задачу для одного, двух и весьма сложную – для микрорайона с десятками различно располо-

женных зданий. Изучается кинематика воздушных потоков приземной области, рассматриваются задачи в области строительной аэродинамики. Найденные решения должны обеспечивать оптимальную воздушную среду для человека в больших и малых городах, микрорайонах и других застройках. В [36; 115] приведены результаты многочисленных испытаний моделей различных зданий и городских застроек; установлены критерии, описывающие геометрию изучаемых строений, с помощью которых вычисляются их аэродинамические характеристики. Существующие типы зданий представляют собой плохо обтекаемые тела, угловатости которых и зазоры между ними являются причиной интенсивных вихреобразований. Разработку методики для численного расчета обтекания простых форм сооружений, численные результаты которой подтверждаются экспериментальными данными, можно рассматривать как базу для решения задач обтекания тел более сложных форм. Параллелепипед рассматривается как прототип многочисленной серии зданий. Классифицируя его геометрические формы, выделяют основные три группы, применяемые в строительстве: длина значительно больше высоты; высота преобладает над горизонтальными размерами; кубы. Часто встречаются здания линейного типа, для изучения которых используется вертикальная плоскость симметрии тела при решении плоских задач рис. 7.25. В [119] разработана численная методика нестационарного отрывного обтекания тел с изломами, которая базируется на методе дискретных вихрей [37, 38, 63]. На примере расчета обтекания двух высотных сооружений с различной величиной зазора между ними проведен анализ структуры вихревого потока около них.

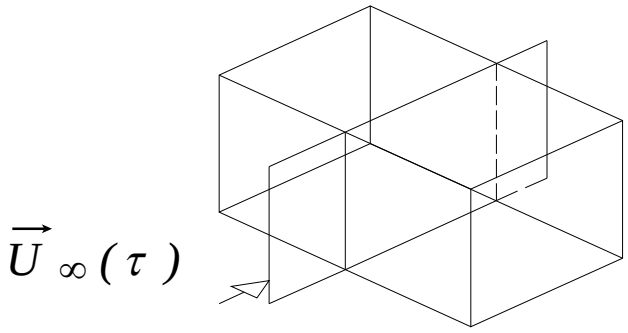


Рис.7.25 Форма зданий линейного типа

В настоящей работе численно получены линии тока для развитого вихревого течения при наличии двух зданий в потоке. Правильность полученных результатов подтверждается аналитическими расчетами и приведенными экспериментальными данными [115].

Формулировка задачи. Решается задача об отрывном нестационарном обтекании двух зданий линейного типа. Длина и высота первого – ℓ_1, h_1, второго – ℓ_2, h_2, расстояние между ними – $\Delta\ell$. Поток движется с постоянной скоростью $\vec{U}_\infty$ вдоль положительной оси Ox по закону (7.278). Параметры ℓ_1, ℓ_2, $\Delta\ell$ изменяются в зависимости от варианта расположения зданий. Система координат, схема разбиения поверхности тел на дискретные вихри и контрольные точки, показаны на рис.7.26. За характерный размер принята величина $\ell = h_1$, где h_1 – высота первого здания; за характерную скорость – значение скорости движения тел $\vec{U}_\infty(\tau)$

$$U_\infty(\tau) = \begin{cases} 0, \tau < 0 \\ 1, \tau \geq 0 \end{cases} . \qquad (7.278)$$

где τ – безразмерное время, которое в случае закона (7.278) определяется, как $\tau = U \cdot t / \ell$; $U_\infty(\tau)$ – безразмерная скорость набегающего потока; $\Delta\tau \approx 1/n$ – безразмерный шаг по времени; n – число присоединенных вихрей, которыми моделируется тело.

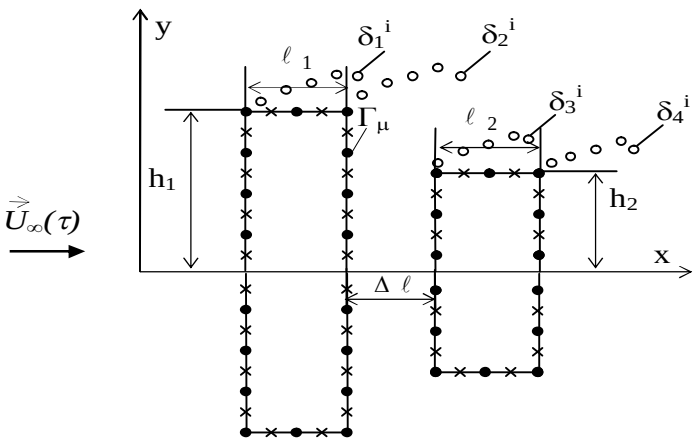


Рис.7.26 Моделирование поверхности телсистемой дискретных вихрей (•) и контрольных точек (×)

Для моделирования отрывного обтекания рассматриваемых тел у поверхности земли используется основная и зеркально отображенная вихревые системы [37, 63]. Каждая из них состоит из присоединенных дискретных вихрей Γ_μ, циркуляции которых равны по величине и противоположны по знаку, и свободных δ_1^i, δ_2^i, δ_3^i, δ_4^i пелен, сходящих с изломов поверхности. Движение свободных вихрей обеих вихревых систем во времени происходит симметрично. При таком разбиении на линии симметрии вихревых систем автоматически в любой момент времени выполняется условие непротекания, что равносильно присутствию здесь поверхности земли.

Схема разбиения поверхностей включает: n контрольных точек, где выполняется граничное условие непротекания и n дискретных вихрей. Первые располагаются на линиях ν, а вторые – на линиях μ между контрольными точками рис.7.20.

Циркуляции присоединенных вихрей Γ_μ на k-ом шаге по времени определялись из решения системы линейных алгебраических уравнений (7.279), которая выражает собой условие непротекания поверхности и условие бесциркуляционного обтекания [37, 119].

$$\sum_{\nu=0}^{n}\left[\sum_{\mu=0}^{n}\Gamma_\mu(a_{\nu\mu}-a'_{\nu\mu})=-\cos(\vec{U}_\infty,\vec{n})_\nu-\sum_{kk=1}^{4}\sum_{i=1}^{k}\delta_{kk\ i}(a_{kk\ i}-a'_{kk\ i})_\nu)\right], \qquad (7.279)$$

Известные значения циркуляций присоединенных дискретных вихрей Γ_μ в местах излома поверхности определяют циркуляции

свободных вихрей δ_1^i, δ_2^i, δ_3^i, δ_4^i в расчетный момент времени τ, $i=1,\ldots,k$.

Новое положение свободных вихрей определяется по методу Эйлера [37], соотношениями:

$$\begin{cases} x_{kk\ i}^{\tau+1} = x_{kk\ i}^{\tau} + \left[\sum\limits_{\mu=0}^{\mathrm{n}} (\mathrm{V_x} - V_x')_{i\,\mu} + \sum\limits_{j=0}^{\mathrm{k}} (\mathrm{V_x} - V_x')_{i\,j} + U(\tau) \right] \cdot \Delta t, \\ y_{kk\ i}^{\tau+1} = y_{kk\ i}^{\tau} + \left[\sum\limits_{\mu=0}^{\mathrm{n}} (\mathrm{V_y} - V_y')_{i\,\mu} + \sum\limits_{j=0}^{\mathrm{k}} (\mathrm{V_y} - V_y')_{i\,j} \right] \cdot \Delta t; \ \ \mathrm{i} = 1,\ldots,\mathrm{k};\ \mathrm{kk} = 1,\ldots,4; \end{cases} \tag{7.280}$$

,

где $(V_x)_{i\mu}, (V_x')_{i\mu}$, $(V_x)_{ij}, (V_x')_{ij}$, $(V_y)_{i\mu}, (V_y')_{i\mu}$, $(V_y)_{ij}, (V_y')_{ij}$ – эти компоненты скорости можно найти из соотношений (7.283).

Получив развитый вихревой поток при $\tau > 100 \cdot \Delta t$, можно построить линии тока [150] около рассматриваемых тел (7.281).

$$\frac{dx}{V_x} = \frac{dy}{V_y}, \tag{7.281}$$

где V_x, V_y – компоненты скорости в рассматриваемой точки плоскости i от всей вихревой системы: присоединенных вихрей основной и зеркально отображенной системы первого и второго тела μ_1, μ_2; свободных вихрей, сходящих с острых кромок, обоих тел δ_1, δ_1', δ_2, δ_2', δ_3, δ_3', δ_4, δ_4'.

$$\begin{cases} (V_x)_i = (V_{x\mu_1})_i + (V_{x\mu_2})_i + (V_{x\delta_1} + V_{x\delta_1'})_i + (V_{x\delta_2} + V_{x\delta_2'})_i + \\ \qquad + (V_{x\delta_3} + V_{x\delta_3'})_i + (V_{x\delta_4} + V_{x\delta_4'})_i; \\ (V_y)_i = (V_{y\mu_1})_i + (V_{y\mu_2})_i + (V_{y\delta_1} + V_{y\delta_1'})_i + (V_{y\delta_2} + V_{y\delta_2'})_i + \\ \qquad + (V_{y\delta_3} + V_{y\delta_3'})_i + (V_{y\delta_4} + V_{y\delta_4'})_i. \end{cases} \tag{7.282}$$

Компоненты скорости из формулы (7.282) вычисляются по формулам Био-Савара [37],

$$\begin{cases} V_{xik} = -\dfrac{1}{2\pi} \dfrac{y_k - y_i}{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2}; \\ V_{yik} = \dfrac{1}{2\pi} \dfrac{y_k - y_i}{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2}. \end{cases} \tag{7.283}$$

Полученные результаты. На рис.7.27 представлена картина линий тока при отрывном обтекании двух тел, одинаковой высоты $h_1 = h_2 = 1$ и ширины $\ell_1 = \ell_2 = 1$ на расстоянии $\Delta\ell = 2$. Если за начало построения линии тока выбрать точку плоскости, расположенную в наветренной стороны первого здания, соизмеримо с его высотой, то они имеют правильный эллиптический характер, с положительной кривизной. Линии тока увеличивают кривизну над вторым зданием, так как интенсивность вихревого потока увеличивается за счет проникновения свободных вихрей от первого тела в вихревую пелену от второго тела. Если начальную точку расчета выбирать в той же области, но ниже высоты сооружений, то кривизна линий тока уменьшается и становится противоположно направленной.

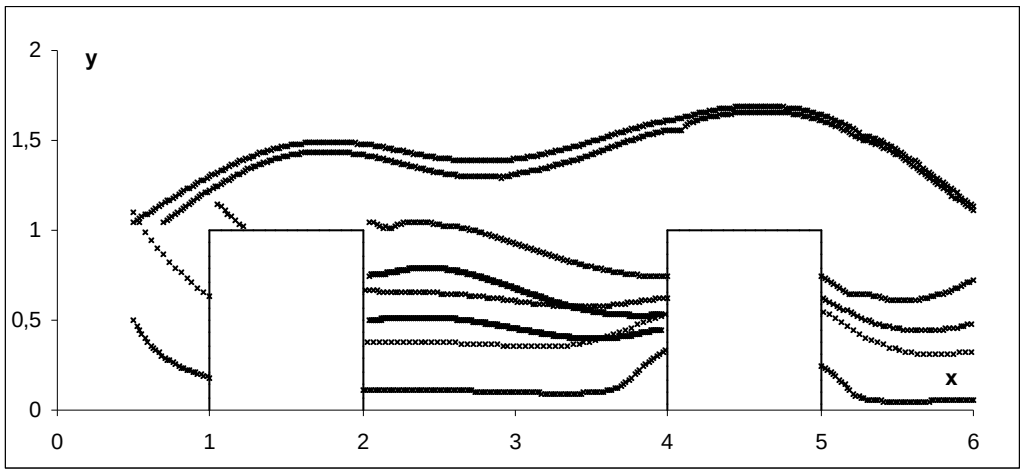


Рис.7.27 Линии тока для сооружений одинаковой высоты и ширины h1=h2=1, l1=l2=1, τ=150Δt

Согласно [119] рассматривалось обтекание сооружений различной высоты, например, $h_1 = 1$, $h_2 = 1/2$, шириной $\ell_1 = \ell_2 = 1$ на достаточном расстоянии друг от друга $\Delta\ell = 3$, при развитом вихревом течении τ>100Δt. Для такого случая обтекания построены линии тока рис. 7.28.

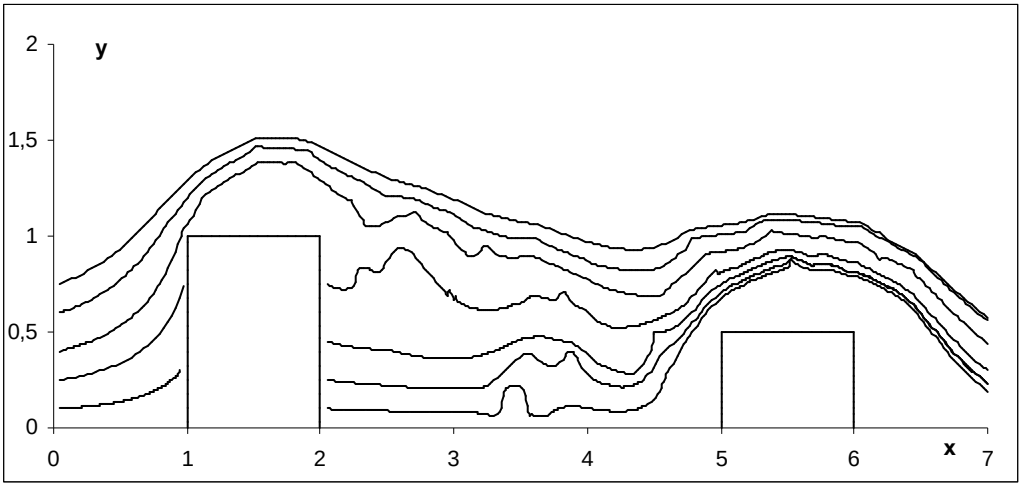


Рис.7.28 Линии тока для сооружений заданной высоты и ширины: h_1=1, h_2=1/2, l_1=l_2=1, Δl=3, τ=150Δt

С наветренной стороны первого здания в несжимаемой среде они представляют собой гиперболы, над зданием эти линии приобретают эллиптическую форму с большим радиусом кривизны, но менее правильную, чем в предыдущем случае. В зазоре между телами линии тока имеют неправильную форму, изгибаясь в местах, где образуются вихревые сгустки, объединяющие свободные вихри пелен, сходящих с острых кромок первого сооружения. Так как вихревой поток хорошо циркулирует в зазоре [119], то и линии тока плавно приобретают эллиптическую форму над вторым телом, проходя очень близко, друг над другом, как бы огибая тот вихрь, который образуется над его поверхностью.

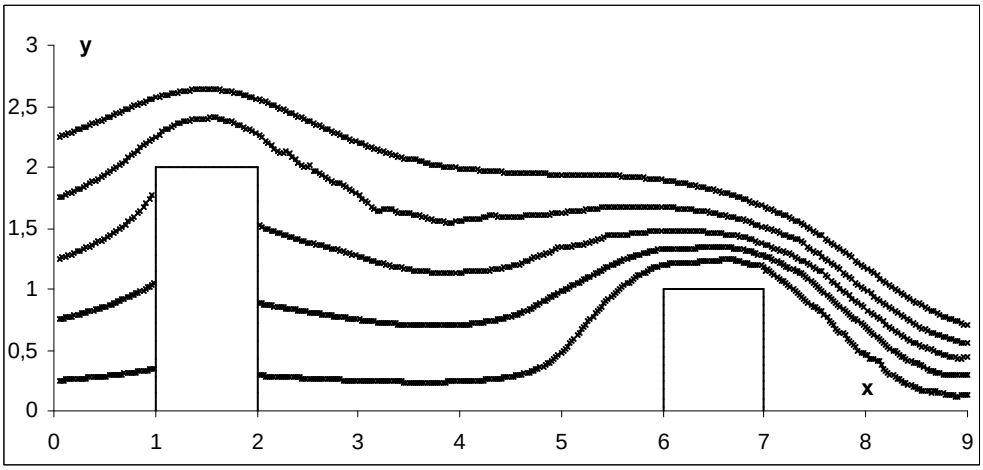


Рис.7.29 Линии тока для сооружений заданной высоты и ширины: h_1=2, h_2=1, l_1=l_2=1, Δl=4, τ=150Δt

На основании расчетов, проведенных в [119] следует, что если увеличить высоту зданий вдвое $h_1 = 2$, $h_2 = 1$ и зазор между ними $\Delta\ell = 4$ рис.7.29, то вихревые соединения в зазоре будут иметь растянутую форму, без крупных скоплений, поэтому и линии тока имеют правильную непрерывную форму. В этом случае над вторым телом не наблюдается образования крупного вихря и линии тока, соответственно, проходят ближе к его поверхности.

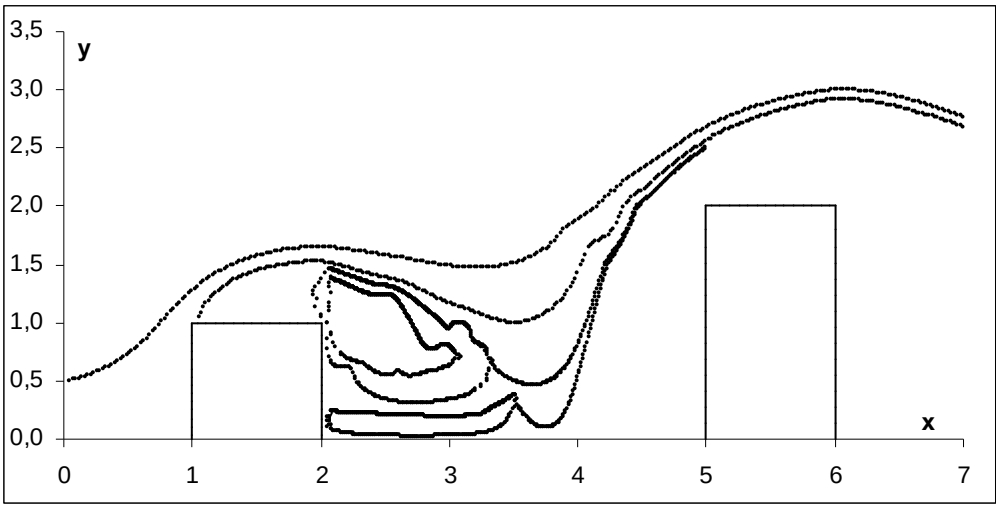


Рис. 7.30 Линии тока для сооружений заданной высоты и ширины: h1=1, h2=2, l1=l2=1, Δl=3, τ=150Δt

На рис.7.30 представлены линии тока при отрывном обтекании двух тел разной высоты $h_1 = 1$, $h_2 = 2$, шириной $\ell_1 = \ell_2 = 1$ с зазором между ними $\Delta\ell = 3$ при развитом вихревом течении τ>100Δt. Так как вихревые пелены, сходящие с изломов первого здания, интенсивно взаимодействуют в зазоре, образуя мощный вихревой поток, то линии тока в этой области стремятся приобрести замкнутую форму, что говорит о возможности возникновения завихрений большой интенсивности. Огибая второе тело, линии тока приобретают правильную форму, так как вихревой поток выносит за пределы высоты здания вихревые соединения. Вероятно, если рассматривать вредные примеси в воздухе, то они, несомненно, успеют распространиться и загрязнить воздушные потоки, циркулирующие в зазоре, прежде чем будут выброшены из него.

Выводы. В данной работе исследовался характер обтекания совокупности зданий линейного типа. Это позволяет сделать следующие выводы: данный тип зданий представляет собой плохо обтекаемые тела, угловатости которых и зазоры между ними являются причиной интенсивных вихреобразований; интенсивность вихрей в

области зазора изменяется в зависимости от геометрии сооружений и расстояния между ними. Методика численного расчета нестационарного отрывного обтекания тел с изломами, которая основывается на методе дискретных вихрей, применима для исследования структуры вихревого потока около двух или нескольких сооружений различных размеров. Она позволяет построить картину линий тока около рассматриваемых объектов, форма которых объясняется особенностями их обтекания.

8 ПУТИ И МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИТЕЛЕЙ БОЛЬШИХ ГОРОДОВ

Прогресс технологии одаривает нас всё более совершенными средствами для движения вспять.

Олдос Хаксли

Никакая деятельность не может быть прочна, если она не имеет основы в личном интересе.

Л.Н. Толстой

Имея в виду какое-либо предприятие, помысли, точно ли оно тебе удастся.

Козьма Прутков

8.1 Технологические средства контроля вредных выбросов

Обеспечение экологически безопасного состояния воздушной среды больших городов связано с осуществлением целого ряда регулирующих мероприятий, основными из которых являются:

1) совершенствование производственных технологий в направлении уменьшения выбросов;
2) замена топлива в процессах сжигания;
3) снижение объёма выпускаемой продукции;
4) декретивное снижение выбросов при наступлении критических ситуаций;
5) перемещение вредных производств за пределы города;
6) закрытие вредных производств.

Понятно, что первое из названных мероприятий можно считать основным, поскольку все последующие связаны с уменьшением выпуска материального продукта и не всегда это экономически обосновано. Поэтому есть смысл более подробно пересмотреть именно эту процедуру.

Рассмотрим вначале способы контроля выброса твердых частиц.

Размеры выбрасываемых в атмосферу частиц лежат в пределах четырех порядков, а именно от 0,001 до 500мкм. При этом основной вклад в массу аэрозольного вещества вносят частицы с размерами от 0,1 до 10мкм. Поведение частиц в газовом потоке существенно зависит от их размеров и массы, а это, в свою очередь, оп-

ределяет способы их контроля. Частицы можно условно считать шарообразными и тогда их размер характеризуется диаметром d. При 1мкм$\leq d \leq$20мкм частицы имеют тенденцию следовать потоку газа-носителя или оседать с очень малой скоростью. При d>20мкм происходит быстрое оседание в окрестности источника выбросов. Чем крупнее частица, тем легче она улавливается в системе очистки отходящих газов. Считается маловероятным, чтобы один тип пылеулавливающих устройств был эффективен для удаления всех частиц во всем диапазоне их размеров. Обобщенные показатели эффективности улавливания свидетельствуют о том, что устройства очистки выбросов улавливают только до 8% частиц с диаметром d<0,5мкм. В то же время, для частиц со средним диаметром $d \approx$6,0мкм эффективность улавливания составляет более 80%, а для частиц с диаметром $d \approx$10мкм – более 95%. С точки зрения экономической безопасности проблема состоит в том, что именно мелкие частицы в диапазоне размеров до $d \approx$1мкм наиболее вредны для здоровья, поскольку имеют способность проникать в легкие при вдыхании. В то же время более крупные оседают на слизистой оболочке носоглотки и причиняют меньше вреда. Другими словами, с точки зрения охраны здоровья не столь важно общее снижение содержания пыли в городской атмосфере, а именно уменьшение доли частиц в диапазоне малых размеров. Поэтому для городских контрольных органов должен быть основополагающим не столько общий показатель эффективности (он может достигать даже 95%), а показатель улавливания наиболее опасных мелких частиц.

Средняя концентрация пыли в крупных городах и индустриальных центрах мира довольно высока и лежит в пределах 50÷150 мкг/м^3. В каждой стране установлены гранично допустимые концентрации твёрдых частиц. К сожалению, в большинстве из таких городов они превышают установленные нормы. Для уменьшения выбросов на городской территории можно использовать все ранее названные приёмы приёмы. Влияние муниципальных властей должно быть распространено на все эти возможные варианты. Рассмотрим главный из них, а именно очистку отходящих газов.

В промышленности используются пылеулавливающие устройства пяти основных классов:

1)Гравитационные пылеосадочные камеры (ГПК);

2)Циклонные (центрифужные) сепараторы (ЦС);

3)Мокрые осадители (МО);

4)Тканевые фильтры (ТФ);

5)Электрофильтры (ЭФ).

Первый тип устройств применяется в основном для осаждения крупных частиц ($d \geq 50$ мкм). Схема ГПК представлена на рис. 8.1

Скорость движения потока в ГПК должна быть довольно низкой (не более 0,3 м/с), а общая длина устройства – достаточно большой. Достоинства ГПК: незначительное энергопотребление, низкие капитальные и эксплуатационные затраты, высокая надежность (долговечность). Недостатки: большие размеры, очень низкая интенсивность улавливания.

Циклонные сепараторы (ЦС) являются наиболее часто применяемыми устройствами для отделения твёрдых частиц. Закрутка потока происходит за счет тангенциальной подачи газа (Рис. 8.2, а) или применения вращающейся крыльчатки 6 (Рис. 8.2, б). Под действием центробежных сил пылевые частицы соударяются с корпусом ЦС и через корпус 3 уходят в бункер. Очищенный газ выходит через цилиндр 5 и выходное отверстие 6. Обычно используют ЦС с диаметром от 150 до 650 мм (иногда до 2500 мм). Для улучшения очистки несколько сепараторов включают последовательно или в виде блока (т.н. мультициклоны). ЦС предназначены для улавливания частиц с размерами $d \geq 10$ мкм. Высокоэффективные ЦС улавливают 50 – 80% частиц при $d \leq 5$ мкм, 80-95% частиц при $5 < d < 20$ и 95 – 99% при $d > 20$ мкм. Основные преимущества циклонов – более высокий уровень очистки по сравнению с ГПК,

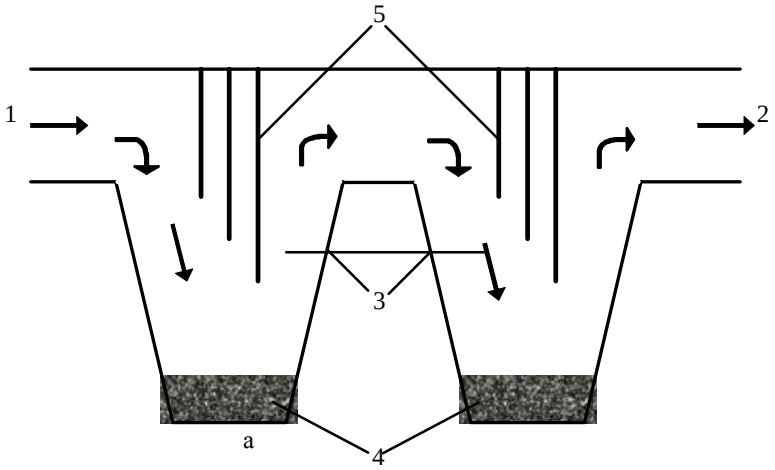


Рис. 8.1 Схема ТПК.

1 – вход, 2 – выход, 3 – бункеры, 4 – осевшая пыль, 5 – пластины-рассекатели

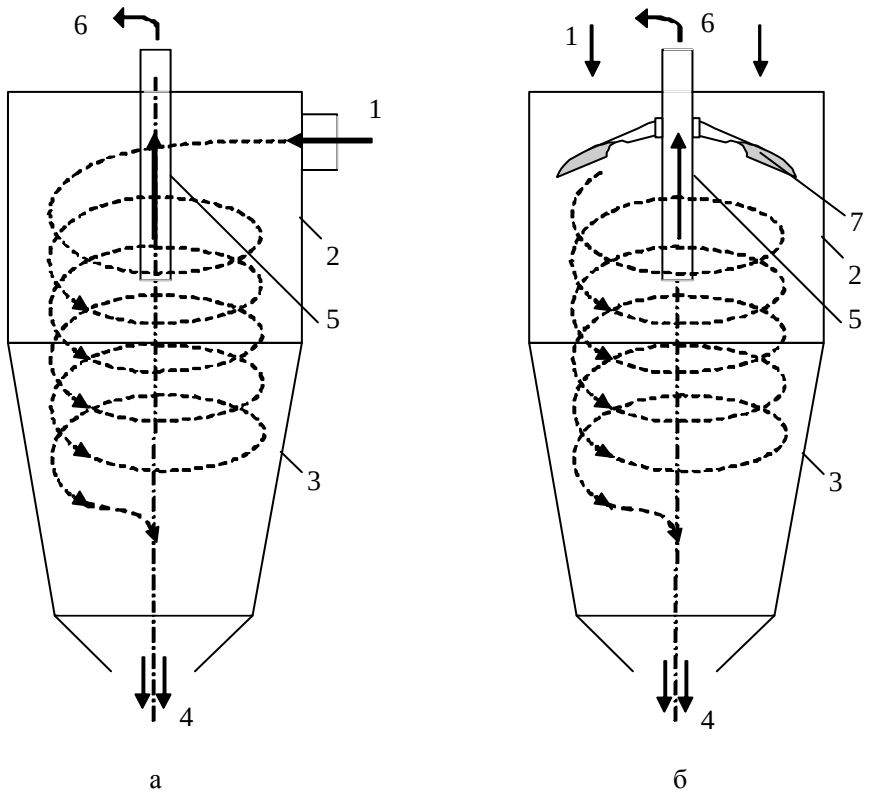


Рис. 8.2 ЦС с тангециальным входом (а) и с крыльчаткой (б):
а-вид сверху, б- вид сбоку.
1 – вход, 2 – корпус циклона, 3 – конус, 4 – выход для пыли, 5 – цилиндр для выходящего газа, 6 – выход газа, 7 – вращающиеся лопатки

простота изготовления (особенно из стандартных труб) и низкая стоимость. Главный недостаток ЦС с тангенциальным вводом состоит в том, что их размер и стоимость резко возрастает по мере повышения эффективности улавливания. Лопаточный тип циклонов более энергоёмок. Кроме того, лопатки могут подвергаться эрозии при поступлении абразивной пыли.

В мокрых осадителях (МО) жидкость (обычно вода) используется для захвата частиц пыли или для увеличения размера аэрозоля. В промышленности обычно используются при вариантах МО:

1) брызговые камерные скрубберы.
2) циклонные скрубберы.
3) скрубберы Вентури.

Мокрые осадители позволяют улавливать частицы от 0,1 до 20 мкм. Принципы действия состоят в распылении жидкой фазы на пути загрязненного газового потока. На рис. 8.3 представлена одна из схем инерционного скруббера с отбойными пластинами.

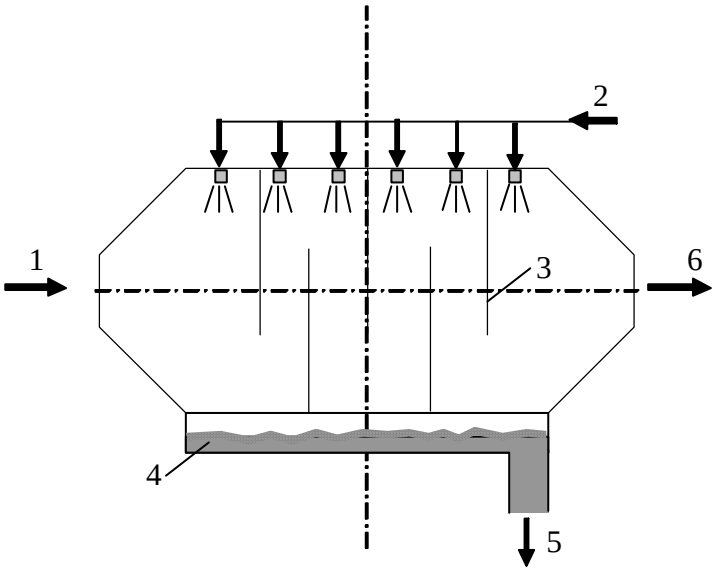


Рис. 8.3 Инерционный скруббер мокрого типа:
1 – вход, 2 – подача жидкости в форсунки , 3 – брызгоотбойные пластины,
4 – мокрый шлам, 5 – выход мокрого шлама, 6 – выход очищенного воздуха

На рис. 8.4 представлена схема циклонного скруббера – А и скруббера Вентури – В. Принцип их работы ясен из рисунка.

Основные преимущества мокрых осадителей – возможность тонкой очисти. Так, например, если в скрубберах Вентури обеспечить большой перепад давления (в 20 – 30 раз), то их эффективность может достигнуть 99% для сублимирующей области и 99,5% для частиц размером 5 мкм. Недостаток этих устройств более сложная и дорогая конструкция, увеличенное энергопотребление, дополнительные трудности, связанные с удалением мокрого шлама и др.

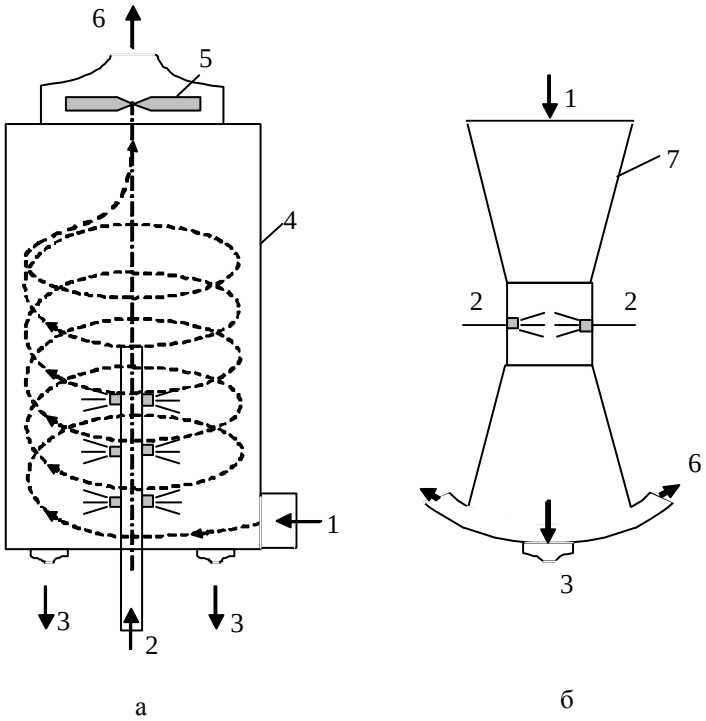


Рис. 8.4 Тангенциальный центробежный скруббер (а) и скруббер Вентури (б): 1 – вход, 2 – подача жидкости в форсунки, 3 – отверстия для вытекания жидкости, 4 – корпус циклона, 5 – выпрямляющие поток лопатки, 6 – выход газа, 7 – корпус скруббера Вентури

В тканевых фильтрах (ТФ) используется один из старейших и широко используемых методов – метод фильтрации. При этом фильтры могут быть изготовлены не только из ткани, но также из любого материала, например волокнистого слоя, насыпного слоя и т.п. ТФ обычно изготовляются в форме цилиндрических труб (рукавов) в подвешенном состоянии (Рис. 8.5).

В процессе работы время от времени происходит встряхивание рукавов для очистки от пыли зацепившейся за ворсистую поверхность фильтра.

Достоинством тканевых фильтров является высокая эффективность улавливания. Так даже частицы размером 0,01 мкм могут быть захвачены с эффективностью 99%. Одним из основных недостатков тканевых фильтров является необходимость их регулярной очистки. Площадь фильтрации должна быть достаточно велика, что связано с увеличением габаритов устройства.

Электрофильтры (ЭФ) построены на принципе взаимодействия между частицами и собирающим электродом, имеющими противоположные заряды. Процесс, как правило, идёт в две стадии: на первой частицы становятся электрически заряженными, на второй – они под действием неоднородного электрического поля удаляются

из газового потока. Принципиальная схема ЭФ представлена на рис. 8.6.

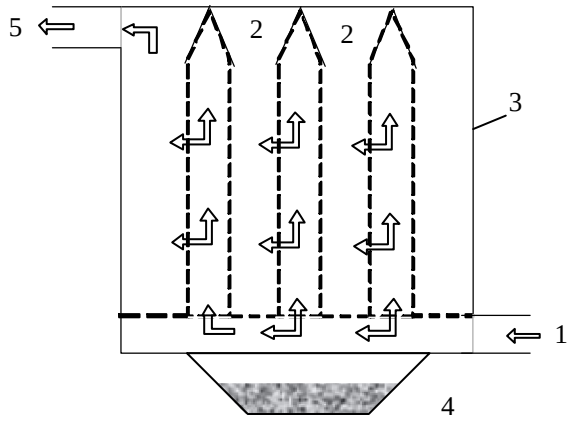


Рис. 8.5 Схема типичного рукавного фильтра:
1 – вход, 2 – подвесные рукавные фильтры, 3 – корпус ТФ,
4 – бункер-накопитель, 5 – выходное отверстие

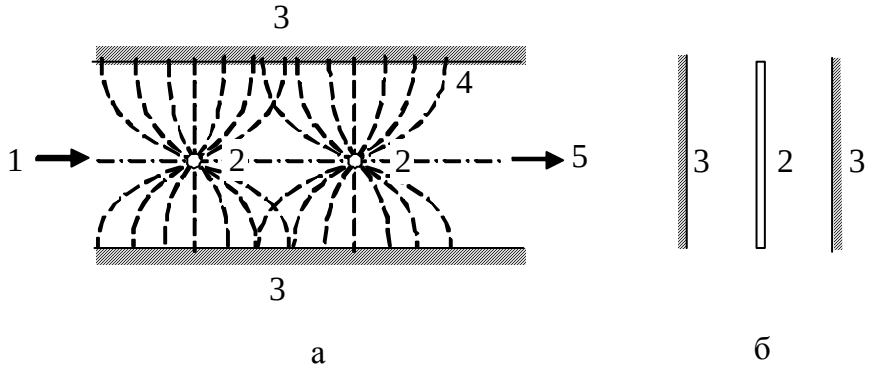


Рис. 8.6 Принципиальная схема электрофильтра. а-вид сверху, б- вид сбоку.
1-вход, 2- коронирующие электроды, 3- осадительный электрод,
4-силовые линии электрического поля, 5-выход очищенного газа

Разность потенциалов между проволочным электродом и корпусом может быть достаточно большой: типичные напряжения составляют 40 – 50кВ. Если выходящий из пылеочистителя воздух выходит в жилой (городской) район, то центральный электрод обычно заряжают положительно для предотвращения образования в атмосфере избыточного озона.

К достоинствам ЭФ относятся: способность оперировать с большими объёмами газа, высокая эффективность улавливания частиц – начиная от субмикроновых (при d ~0,05 мкм) до крупных (d ~200 мкм), низкое энергопотребление, малый перепад давления, возможность работать при высоких температурах и улавливать как твердые, так и жидкие частицы. К недостаткам можно отнести непростую процедуру стряхивания пыли с осадителя и уменьшения

притягивающих сил в результате ионизации воздуха внутри накопляющегося пылевого слоя на осадительном электроде.

Контроль газообразных выбросов является более сложной процедурой по сравнению с контролем твердых или жидких частиц. Известно, что на долю газообразных выбросов приходится 91% по весу всех загрязняющих воздушную среду веществ, причем окись углерода составляет 56% [129]. В качестве основных методов очистки вредных газообразных выбросов применяют адсорбцию, абсорбцию и дожигание. Адсорбцией называют процесс разделения, основанный на способности некоторых твердых веществ избирательно улавливать газообразные или жидкие компоненты из набегающего загрязнённого потока. Различают физическую адсорбцию и хемосорбцию. В первом случае молекулы газа прилипают к поверхности адсорбента под действием межмолекулярных сил притяжения. В качестве примера таких адсорбентов можно назвать активированный уголь, силикагель, аломосиликаты, цеолиты, и другие вещества. Важным свойством физического адсорбента является свойство отдавать обратно захваченный продукт, т.е. подвергаться десорбции. Обычно такой процесс (называемый регенерацией) идет при нагревании (прокаливании) или промывании. Очищенный при десорбции поглотитель может быть использован повторно. В основе хемосорбции лежит химическое взаимодействие между адсорбатом (веществом, подвергающимся адсорбции) и адсорбером. Силы сцепления в этом случае значительно больше и в большинстве случаев обратный процесс затруднён или невозможен. Адсорбенты могут поглощать все частицы начиная от 200 мкм и меньше.

Абсорбцией называют такой процесс химической технологии, при котором очистка газовых выбросов происходит с помощью жидких поглотителей при их взаимном контакте. Движущей силой процесса является градиент концентрации на границе раздела фаз газ-жидкость, обеспечивающий диффузию примеси из одной фазы в другую. В ходе процесса могут быть использованы абсорберы с форсунками, скрубберы Вентури или насадочные башни. Насадочные башни являются противоточными устройствами, в которых струя жидкости движется сверху вниз, а газ под напором движется снизу вверх. Термин «насадочная» употребляется в связи с тем, что на пути движения газа устанавливают тела различной геометрической формы (насадки), обладающие большой поверхностью. На такой поверхности жидкость растекается в виде пленки, что способ-

ствует лучшей абсорбции. Насыщенная загрязнителем жидкость может быть в дальнейшем подвергнута регенерации и использована повторно или выведена в качестве отхода.

Процесс сжигания или термического окисления отходящих газоаэрозолей используется в том случае, если образовавшиеся при сжигании вещество становится безвредным или менее токсичным. В отдельных случаях этот процесс используется для подавления неприятного запаха. Подобным способом обезвреживаются такие выбросы как окись углерода, углеводороды, легковоспламеняющиеся вещества и другие продукты. Одним из основных процессов поступления вредных веществ в атмосферу является испарение растворителей, которые затем дожигаются. Далее следует сжигание промышленных, бытовых и сельскохозяйственных отходов, а также отходов нефтепереработки и другие процессы. Сжигание отходов в пламени обычно производится в специальных печах с подводом или без подвода дополнительного топлива. В самом процессе важно не преодолеть предел взрываемости смеси. На нефтеперерабатывающих заводах применяется сжигание горючих отходов (например, метана) в факеле, т.е. на кромке вертикальной трубы. При термическом окислении загрязнённый воздух проходит через устройство с горелками, куда подают топливо и (при необходимости) кислород. Термическое окисление происходит при более низких температурах по сравнению с печами для сжигания. В процессах дожигания и окисления часто используют катализаторы, повышающие эффективность процедуры (каталитическое сжигание).

Контроль окиси углерода (CO) и углеводородов (C_nH_m) основан в большинстве случаев на доокислении. Механизм перехода окиси углерода в двуокись (CO_2) может проходить разными путями и всё ещё требует дополнительного изучения. Рассматривают разного типа реакции, например:

$$CO + OH \leftrightarrow CO_2 + H$$

$$CO + O_2 \rightarrow CO_2 + O \qquad (8.1)$$

$$CO + H_2 \leftrightarrow CO_2 + H_2$$

Аналогичные реакции можно записать и для углеводородов. Известно, что окись углерода и несгоревшие углеводороды поступают в атмосферу как от стационарных источников при неполном

сжигании топлив, так и от подвижных источников (переобогащённая смесь). В обоих случаях существуют механизмы уменьшения выбросов, часть из которых была названа ранее. Здесь можно назвать, прежде всего, дожигание и каталитическое окисление. В подвижных источниках выбросы уменьшаются при переходе от использования бензина к природному газу. Однако полного очищения выбросов от этих токсикантов пока что произвести невозможно.

Контроль выбросов окислов серы SO_x можно обеспечить несколькими методами:

1) удаление соединений серы из газового потока;
2) переход к низкосернистому топливу (уголь или нефть с малым содержанием серы, а также, природный газ);
3) предварительное обессеривание угля и нефти.

Сера является компонентом всех природных углей и нефти, в которых её содержание находится в пределах от 0,1 до 5%. Основными поставщиками окислов серы в атмосферу являются тепловые электрические станции и промышленные котельные (около 75%). Образование окислов можно пояснить наличием количественно простых суммарных реакций

$$S + O_2 \rightarrow SO_2$$

$$SO_2 + 0{,}5O_2 \leftrightarrow SO_3 \qquad (8.2)$$

$$SO_2 + O + M \rightarrow SO_3 + M$$

Последняя из реакций проходит с участием третьего тела (катализатора).

При обессеривании угля необходимо учитывать, что сера в нём находится в составе неорганических и органических соединений. Неорганический железный колчедан FeS_2 находится в угле в виде дискретных частиц, которые можно удалить. Для удаления органических соединений серы необходимо применять более сложные технологические процессы. Для этого осуществляют газификацию угля или обжиг с выделением газов, в которых имеются соединения серы. Следующим этапом является обессеривание отходящих газов.

Для удаления двуокиси серы из отходящих газов в промышленности применяют различные процессы очистки. В одном из них применяют шлам, содержащий известь (CaO) и известняк ($CaCO_3$)

в присутствии сульфита и сульфата кальция. Двуокись серы в процессе реакции образует сульфитные и сульфатные соли, твёрдое вещество, которое отделяется от шлама и сбрасывается в осадительный бассейн. В качестве активного вещества применяется также Na_2CO_3 с образованием на выходе Na_2SO_4. Применяется также окись магния (MgO) с образованием в процессе реакции $MgSO_3$, который в процессе обжига обычно снова восстанавливается до MgO. Образовавшаяся при этом окись серы утилизируется и может быть использована для получения серной кислоты. Широко применяется щелочная очистка с учётом того, что среди щелочей натрий и аммиак являются отличными поглотителями SO_2. Применяется также операция каталитического окисления SO_2 в SO_3 (катализатор V_2O_5) и получение серной кислоты, которая затем утилизируется. Имеются и другие способы очистки отходящих газов от двуокиси серы.

Выброс в атмосферу окислов азота N_xO_y происходит в основном при сжигании различных топлив. Основная часть окислов в отходящих газах образуется за счёт окисления азота, находящегося в атмосферном воздухе. Содержание окислов в отходящих газах возрастает по мере повышения температуры сгорания. Определённое количество азота находится в углеводородном топливе. Кроме температуры горения объёмы выброса окислов азота зависят от нескольких факторов: соотношение воздух-топливо, степень охлаждения зоны горения, конфигурация топки (камеры сгорания). Известно, что азот образует с кислородом шесть соединений: NO, N_2O, NO_2, N_2O_3, N_2O_5 и NO_3. Из этих окислов только NO, N_2O, NO_2 потенциально способствуют загрязнению атмосферы. При этом N_2O нереакционно способный газ с анестезирующими свойствами, находится в атмосфере в концентрациях значительно ниже порога биологического воздействия. NO также содержится в атмосфере в незначительном количестве, однако является химически активным соединением, способствующим образованию смога. Опасной является двуокись азота NO_2 – красновато-бурый газ активно раздражающий глаза, слизистую оболочку и бронхи. Как правило, при горении окислы азота образуются при температурах свыше 1500°К. При этом важным фактором является время пребывания в зоне горения и достаточное количество кислорода в реагирующей смеси. Важную роль играет также степень смешения. Как было отмечено уменьшение концентрации N_xO_y в дымовых газах начинается с контроля горения. Одним из методов контроля является охлаждение

первичной зоны пламени путём передачи тепла окружающим поверхностям. Основным же методом при контроле N_xO_y в топке является регуляция дымовых газов. Её смысл состоит в том, что часть охлаждённых отходящих газов возвращается в зону горения. При этом происходит поглощение тепла в топке и появляется дефицит кислорода. Всё это приводит к уменьшению концентрации N_xO_y. Двухступенчатое сжигание, при котором в разных частях факела используется то богатая, то бедная смесь, также способствует уменьшению содержания окислов азота. Второй стадией контроля N_xO_y является операция с отходящими дымовыми газами. Для этого применяется каталитическое разложение NO на N_2 и O_2 и восстановление окислов до молекулярного азота за счет добавления H_2, CO, NH_3, H_2S при наличии катализатора. Кроме этих процедур используется явление адсорбции и абсорбции. N_xO_y хорошо поглощается древесным углем, а также жидкостями: водой, растворами щелочей и карбонатов серной кислотой и растворами некоторых органических веществ. Все перечисленные здесь и некоторые другие методы обеспечивают определенную степень очистки отходящих газов от окислов азота, однако их низкая реакционная способность и необходимость контроля огромных объёмов газа склоняют технологии уменьшения концентрации к организации процессов горения.

Здесь были названы технологические средства и методы для контроля наиболее типовых техногенных полютантов. Эти же методы и принципы могут быть использованы и для контроля других вредных веществ. Следует отметить, что разработка и анализ подобных технологий – это отдельный крупный раздел экологической науки.

8.2 Основы государственной экологической политики

Одним из главных условий устойчивого экономического и социального развития Украины является обеспечение экологической безопасности граждан страны и соблюдение принципов рационального природопользования. Это условие является важным для любого государства земного шара. Однако для нашей страны, пережившей Чернобыльскую катастрофу планетарного масштаба, поддержание экологического равновесия на своей территории превратилось в проблему сохранения генофонда украинского народа. Реше-

ние этой проблемы связано, прежде всего, с законодательным обеспечением экологической безопасности как в масштабе всей страны, так и на региональном уровне. Главным законодательным документом прямого действия является Конституция Украины, которая устанавливает обязанности государства по обеспечению экологической безопасности, поддержанию экологического равновесия на территории Украины. Статьи 3, 16, 50 и 60 определяют защиту и оздоровление окружающей среды как важные права и обязанности граждан. Исходя из конституционных принципов каждый гражданин Украины, обеспечивается правом на безопасную для здоровья и жизни окружающую среду и на возмещение вреда, обусловленное нарушением этого права. Это право обеспечивается законодательными актами и документами разного уровня, а именно: Законами принятыми в Верховной Раде Украины, Указами президента страны, Постановлениями и Декретами Кабинета министров, решениями отдельных министерств и других общегосударственных органов. Соответствующие нормативно-правовые документы разрабатываются и на региональном уровне. Уже в первые месяцы и годы существования Украины как суверенного и независимого государства, был принят ряд основополагающих законов, которые прямо или косвенно определяют экологическую стратегию страны. Это, прежде всего, «Закон Украины об охране окружающей природной среды», принятый 25.06.1991 г, а также изменения и дополнения к этому закону от 05.05.1993 г.Закон регулирует отношения в области охраны, использования и воспроизводства возобновляемых природных ресурсов, предотвращения вредного воздействия хозяйственной деятельности на природную среду и ликвидации последствий такого воздействия. В следующем году, т.е. 16.10.1992 г был принят «Закон Украины об охране атмосферного воздуха». Изменения и дополнения к закону были приняты 28.02.1995 г. Поскольку названный закон имеет прямое отношение к проблеме формирования безопасной воздушной среды на территории больших городов, есть смысл назвать его основные положения. Закон устанавливает единые для Украины нормативы экологической безопасности воздуха, предельно допустимые в воздухе предельные концентрации загрязняющих веществ (ПДК) уровне акустического, электромагнитного, ионизирующего и других видов вредного воздействия на атмосферный воздух. Установлены типы правонарушений в области охраны атмосферного воздуха, к которым относятся: нару-

шение прав граждан по экологической безопасности воздушной среды, превышение лимитов выбросов в воздух загрязняющих веществ и ПДК, превышение вредного воздействия на воздух физических и биологических факторов, осуществление незаконной деятельности, негативно влияющей на климат и погоду, эксплуатация транспортных средств, технологического оборудования, не отвечающего требованиям по охране атмосферного воздуха, отказ от предоставления информации об экологической обстановке в случае загрязнения атмосферного воздуха. Были приняты также законы Украины имеющие прямое или косвенное отношение к проблемам экологии, а именно:

«О животном мире» (март 1993 г), «Об экологической экспертизе»(февраль 1995 г), «О качестве и безопасности пищевых продуктов и продовольственного сырья», «О защите растений» (октябрь 1998), «Об отходах» (март 1998 г), «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера» (июнь 2000 г.), «Об основах государственной политики в сфере науки и научно-технической деятельности» (декабрь 1991), «Об обеспечении санитарного и эпидемиологического благополучия населения» (февраль 1994 г.) и другие. В стране принято несколько экологически ориентированных кодексов: «Водный кодекс Украины» (июнь 1995 г), «Кодекс Украины о недрах» (июль 1997 г), «Лесной кодекс Украины» (январь 1994 г.), «Земельный кодекс Украины» (декабрь 1990, с последующими дополнениями в 1992 и 1993 гг).

В марте 1998 года Верховная рада Украины приняла и опубликовала «Основные направления государственной политики Украины в направлении охраны окружающей среды, использования природных ресурсов и обеспечения экологической безопасности». Этот документ полностью согласуется с основными направлениями, разработанными в странах Европейского союза.

Проблемы экологической безопасности и рационального природопользования всегда находились в центре внимания всех ветвей власти Украины. По инициативе президентов Верховная рада и Кабинет министров принимали законодательные акты, декреты и постановления, касающиеся проблем охраны окружающей среды. В рамках этой проблемы были изданы несколько указов президента Украины, к примеру, Указ об учреждении «Дня окружающей сре-

ды» (август 1998 г), около 20 Указов о создании отдельных зон природного заповедного фонда на территории Украины и другие.

Кабинет министров координирует работу министерств и ведомств, которые прямо или косвенно связаны с проблемами экологии. Постановления и декреты Кабмина конкретизируют отдельные виды деятельности, которые определены законодательными актами. К примеру, постановлением Кабмина от 01.03.1999 г определен тариф (грн/т за выброс (сброс) в окружающую среду разнообразных загрязнителей). Можно назвать также такие постановления Кабмина, как: «О службе государственной охраны природного заповедного фонда», «О мероприятиях по разрешению эколого-гидрологических проблем, которые возникли вследствие закрытия горнодобывающих предприятий, шахт и разрезов» и т.п.

Основным координатором деятельности в области охраны окружающей среды является Министерство экологии и природных ресурсов. На протяжении 1995 – 2000 гг Министерство обеспечило проведение государственной экологической экспертизы потенциально опасных объектов. Оно держит на контроле исполнение всех законодательных актов экологической направленности в масштабах всей страны. При министерстве функционирует государственная экологическая инспекция. Ежегодно подготавливаются и публикуются материалы о состоянии окружающей среды в стране (например, «Національна доповідь про стан навколишнього середовища в Україні» с указанием отчетного года и др.). Проблемами ликвидации экологических аварий и катастроф активно занимается Министерство по вопросам чрезвычайных ситуаций и защиты населения от последствий Чернобыльской катастрофы.

8.3 Стандартизация и метрология в обеспечении качества атмосферного воздуха.

Важной составной частью деятельности министерства экологии и природных ресурсов является реализация политики правительства по проблемам стандартизации метрологии и сертификации в экологии, а также в проведении экологического аудита. Известно, что во всех развитых странах повышение уровня производства, улучшение качества продукции, и рост жизненного уровня населения связаны с использованием стандартизации во всех отраслях хозяйственной деятельности и, в первую очередь, в области охраны

окружающей среды. Основной целью стандартизации является установление положений, которые обеспечивают соответствие какого-либо объекта (продукта, процесса, услуги) его предназначению и его безопасности для людей, животных и растений. Наряду с международной системой стандартов существуют национальные системы, которые, к примеру, в нашей стране закреплены Декретами Кабинета министров «О стандартизации и сертификации» от 10.05.1993 г. и «О государственном надзоре за соблюдением стандартов, норм и правил, и ответственности за их нарушение» от 08.04.1993 г.

Идентификация национальных стандартов содержит аббревиатуру ДСТУ (Державный стандарт України – укр.). Отдельные стандарты СССР (ГОСТ – государственный общесоюзный стандарт) продолжают действовать в Украине до их замены или отмены. Основную часть стандартов ГОСТ предусмотрено использовать как межгосударственные в соответствии с «Соглашением о проведении согласованной политики в сфере стандартизации метрологии и сертификации» (Москва, 13.03.1992г.). По отдельным видам объектов в Украине используются международные стандарты системы ISO (International Standard Organization). В структуру ISO входят более 100 государств – членов, включая Украину. Существуют и другие международные организации по стандартам. Согласованность разных стандартов обозначается несколькими комбинированными идентификаторами (ДСТУ, ГОСТ, ISO и др.). Система стандартов по защите окружающей среды, которая была разработана ещё в СССР, используется в Украине в соответствии с межгосударственными соглашениями. В области экологии используется межгосударственная система ISO серии 14000.

Следует назвать некоторые государственные и межгосударственные стандарты, имеющие прямое отношение к обсуждаемой проблеме.

- ДСТУ ISO 4226:2004 и ISO 4226:1993 – Качество воздуха. Общие положения. Единицы измерения.
- ДСТУ ISO 6879:2003 и ISO 6879:1995 – Качество воздуха. Характеристики и руководство по измерению качества воздуха.
- ГОСТ 17.2.1.01-76 – Атмосфера. Классификация выбросов по составу.

- ГОСТ 17.2.1.03-84 – Атмосфера. Термины и определения контроля. Загрязнения.
- ГОСТ 17.2.3.01-86 и СТСЭВ 1925-79 – Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населённых пунктов.
- ГОСТ 17.2.3.02-78 Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями
- ДСТУ 2501:94 – Анализаторы газов для контроля выбросов транспортных средств. Общие технические требования и методы испытания.
- ДСТУ 4277:2004 Нормы и методы измерений содержания окиси углерода в отработанных газах автомобилей с двигателей, работающими на бензине или газовом топливе.
- ГОСТ 17.2.6.02 и СТ СЭВ5172 – контроль загрязнителей воздуха автоматическими газоанализаторе.

Последние пять позиций относятся к метрологическим стандартам, поскольку они определяют количественные показатели и требования к средствам их измерения.

Стандарты, правила и технические условия перевозки опасных грузов и нормы выбросов транспорта, регламентируются государственными и международными соглашениями. В Украине действуют правила и нормы, определяемые постановлениями Кабинета министров: «Об осуществлении экологического контроля в пунктах пропуска через государственную границу» от 20.03.95 г. и «Об упорядочении осуществления сборов в пунктах пропуска через государственную границу» от 15.06.99 г.

8.4 Нормирование вредного воздействия на природную среду.

На государственном уровне осуществляется экологическое нормирование. Под нормированием понимают деятельность по установлению гранично допустимого влияния на биосферу. Основными объектами нормирования антропогенной нагрузки на природную среду есть уровень концентрации загрязняющих веществ в окружающей среде. Кроме этого, нормируется целый ряд видов воздействия, к которым относятся: выбросы и сбросы в окружающую среду, радиационное, электромагнитное, акустическое воздействие на человека и т.п. При этом вводится понятие предельно допустимых уровней. – ПДК. Различают две группы нормирования. Первая из них – это санитарно-гигиеническая норма, определяющая

уровень воздействия на здоровье людей и отдельных популяций живых организмов. Вторая – это группа, определяющая общее экологическое нормирование, т.е. более широкое обеспечение качества экологической системы в целом (включая и здоровье людей). Речь идёт о сохранении установившегося равновесия в природе в рамках возможной саморегуляции.

Основные принципы экологических нормативов состоят в следующем:

1) какое-либо изменение природной среды следует рассматривать как недопустимое;
2) нормативы следует устанавливать в соответствии с техническими возможностями снижения уровня загрязнений и контроля за их содержанием в окружающей среде;
3) допустимый уровень загрязнений необходимо устанавливать таким образом, чтобы затраты на его достижение были бы не больше стоимости убытков при неконтролируемом загрязнении;
4) стандарты необходимо устанавливать так, чтобы при их соблюдении не было бы никакого прямого или косвенного вредного влияния на людей.

Следует отметить, что первый принцип является в некоторой мере утопичным и поэтому его следует рассматривать как предельный норматив, к которому необходимо стремиться. В процессе экологического нормирования определяются экологически допустимые концентрации, обозначаемые индексом ЭДК. Считается, что именно этот тип нормирования должен стать составной частью государственной программы обеспечения экологической безопасности. Отечественными специалистами в области экологии было введено понятие модуля техногенной нагрузки (МТН), присваиваемое отдельному региону. Он выражается, в массе твердых выбросов на квадратный километр. Предполагается, что в дальнейшем данный показатель будет расширен и на газообразные выбросы.

Предельно допустимые концентрации (ПДК) по первой (основной) группе нормирования устанавливаются Министерством здравоохранения (МЗО). ПДК определяется как масса вредного вещества, содержащегося в единице объема воздуха (в мг/м^3), в одном литре жидкости (мг/л) или в 1кг твердого вещества (мг/кг) отдельных компонентов биосферы, при которой периодическое или постоянное (круглосуточное) влияние на организм человека, жи-

вотного или растения, не вызывает отклонений в их нормальном функционировании на протяжении всей жизни нынешнего и будущего поколений. МЗО установило нормативы ПДК на 600 вредных веществ в воздушной среде, 200 – в водной среде и 100 – в почве. Общее количество вредных веществ, поступающих в окружающую среду составляет более 40 тысяч. Нормативы установлены для человека, животных и для растений. Значения ПДК зависят от времени и условий воздействия. В этом смысле вводятся понятия: максимальной разовой концентрации ($ПДК_{мр}$), среднесуточной концентрации ($ПДК_{сс}$), концентрация в рабочей зоне ($ПДК_{рз}$) и концентрация в населенном пункте ($ПДК_{нп}$). $ПДК_{мр}$ – это наиболее высокое значение концентрации загрязняющего вещества в воздухе, полученное вследствие анализа многократных проб. Термин «разовая» предполагает воздействие в течении 20 – 30 мин. $ПДК_{сс}$ определяется замерами в течение 24 часов непрерывно или с равными интервалами. Она рассчитана на все группы населения и на длительный период влияния. $ПДК_{рз}$ – определяется как концентрация ежедневного 8-часового (41 час в неделю) воздействия, которое не должно вызывать заболевания или отклонений в состоянии здоровья работающих, т.е. нынешнего, а также будущих поколений. $ПДК_{нп}$ – концентрация в месте жительства, где люди пребывают круглосуточно. Естественно, что все названные ПДК будут разными. В таблице 8.1 приведены значения $ПДК_{нп}$.

В этой таблице приведены значения коэффициента К, который представляет собой отношение ПДК данного вещества к ПДК какого-либо базового вещества (в данном случае SO_2).

В таблице 8.2 приведены значения ПДК для отдельных растений.

При комплексном воздействии смеси n вредных веществ применяется эффект суммирования, например:

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{\varphi_i}{(ПДК)_i} < 1 \qquad (8.3)$$

В общем случае норматив вредности этого или иного вещества определяется в зависимости от принадлежности его к какому-либо классу опасности (их всего четыре). Градация вредных веществ по классам опасности представлена в таблице 8.3.

Таблица 8.1 Предельно допустимая концентрация вредных веществ в воздухе населенных пунктов (мг/м^3).

Вещество	ПДК$_{сс}$	ПДК$_{мр}$	К
Твердые вещества (пыль)	0,15	0,2	3
Двуокись серы	0,05	0,5	1,0
Двуокись азота	0,04	0,085	0,8
Окись азота	0,06	0,4	1,2
Окись углерода	3,0	5,0	60
Аммиак	0,04	0,2	0,8
Хлористый водород	0,2	0,2	4,0
Цианистый водород	0,01	-	0,2
Окись кадмия	0,001	-	0,02
Свинец	0,0003	0,03	0,005
Сероводород	0,005	0,03	0,1
Бензопирен	0,000001	-	0,00002
Фенол	0,003	0,01	0,06
Формальдегид	0,003	0,035	0,06
Фтористый водород	0,005	0,2	0,1

Таблица 8.2 Предельно допустимая концентрация вредных веществ в атмосфере воздуха для растений

Название загрязняющего вещества	Предельно допустимая концентрация, мг/м^3			
	Для растений в целом максимальные разовые	Для древесных пород		Для человека максимальная разовая
		Максимальные разовые	Средне-суточные	
Диоксид серы	0,02	0,03	0,015	0,5
Аммиак	0,05	0,1	0,04	0,2
Бензол	0,1	0,1	0,05	1,5
Хлор	0,25	0,025	0,015	0,1
Сероводород	0,02	0,008	0,008	0,008
Формальдегид	0,02,	0,02	0,003	0,035
Пыль, цемент	-	0,02	0,05	0,5
Метанол	0,2	0,2	0,1	1,0

Таблица 8.3 Класс опасности нормируемых веществ

Класс опасности	Степень опасности	Величина ПДК мг/м^3
1	Чрезвычайно опасные вещества	$\leq 0{,}1$
2	Высоко опасные вещества	0,1-1,0
3	Умеренно опасные вещества	1,0-10,0
4	Мало опасные вещества	>10,0

Следует отметить, что в таблице 8.1 приведены значения ПДК без учета суммирования. При одновременном воздействии нескольких веществ значения ПДК для одного из них определяется с помощью формулы (8.1). рассмотрим пример такого расчета. Пусть в воздухе населенного пункта (на автомобильной магистрали) содержится определенная концентрация окиси углерода – φ_1, пыль – φ_2, свинца – φ_3, двуокиси азота – φ_4. Среднесуточные значения $(ПДК)_i$ (i=1..4) для этих веществ заданы в таблице 8.1. Необходимо определить предельно допустимую концентрацию углерода φ_1' с учетом суммирования. Пользуясь формулой (8.3), можем записать:

$$\varphi_1' = \left[1 - \left(\frac{\varphi_2}{ПДК_2} + \frac{\varphi_3}{ПДК_3} + \frac{\varphi_4}{ПДК_4}\right)\right] * (ПДК)_1 \qquad (8.4)$$

Зная практические (например, замеренные) значения φ_2, φ_3, φ_4, и значения $(ПДК)_i$, можно найти φ_1', которое в данном случае определяет ПДК окиси углерода с четом суммирования. Естественно, что оно будет меньше значения указанного в таблице 8.1 (которое равно 3,0 мг/м^3). В каждом населенном пункте, особенно в воздушной среде больших городов, реализуется так называемая «фоновая концентрация» целого ряда вредных веществ, поступивших от всех источников расположенных в данной местности. В этом случае значение ПДК для каждого вещества в условиях выброса от какого-либо отдельного источника (т.е. дополнительно к фону) следует оценить с учетом эффекта суммирования. В нормировании выбросов в окружающую среду также устанавливаются предельно допустимые значения, обозначаемые индексом ПДВ и измеряемые в единицах массы за единицу времени. Естественно, что значения

ПДВ для каждого отдельного источника зависят от значения ПДК того вредного вещества, которое он выбрасывает в среду. Обычно принимается, что концентрация выбрасываемого вещества не должна превышать ПДК в приземном слое атмосферы на границе санитарно-защитной зоны, расположенной вокруг источника. Санитарно-защитной зоной (СЗЗ) называют участок земли вокруг объекта хозяйственной деятельности, отделённый условной границей от жилищного массива с целью уменьшения вредного воздействия этого объекта на здоровье людей. Размер СЗЗ являются расчетным, и зависит от принятого значения ПДК. Территорию самой зоны следует засаживать деревьями и кустарниками, имеющими бактерицидные свойства. В соответствии с санитарными нормами проектирования промышленных предприятий выделяют пять классов объектов хозяйственной деятельности, для которых установлены размеры СЗЗ от 50 до 300 метров. Размеры СЗЗ в зависимости от класса объектов приведены в таблице 8.4.

Значения ПДВ следует определять для каждого источника отдельно. Этот показатель зависит от характерных параметров источника и усредненных метеоусловий в заданном пункте. Если взять, к примеру, точечный источник, то его ПДВ будет зависеть от высоты и диаметра дымовой трубы, скорости потока на выходе, физико-химических параметров выбрасываемых веществ, осредненных ветровых условий температуры окружающей среды, преобладающего уровня устойчивости атмосферы и т.п. Расчетные эмпирические соотношения для нахождения ПДВ приведены в соответствующих литературных источниках (например [169]). Для более точных расчетов концентрации полютантов в воздушной среде, определения границ санитарно-защитных зон и допустимых выбросов следует использовать уравнения турбулентного переноса, приведеные в Разделе 7. С помощью математического анализа можно нормировать выбросы от нескольких различных источников с произвольным их расположением на местности.

Таблица 8.4 Размеры санитарно-защитных зон.

Класс объекта	Размер СЗЗ (м)	Промышленные объекты
1А	3000	Особо опасные объекты (АЭС и др.)
1Б	1000	Химические, нефтеперерабатывающие, бумажно-целюлозные и металлургические заводы. Предприятия, которые занимаются сжиганием кокса, добычей нефти, природного газа и каменного угля.
2	500	Цементные, гипсовые, известковые и асбестовые заводы. Предприятия, которые изготовляют свинцовые аккумуляторы, добывают бурый уголь и горючие сланцы
3	300	Предприятия по производству стекловаты, керамзита, рубероида, угольных изделий для электропромышленности, разных лаков и олиф. Заводы железобетонных конструкций, асфальтобетонные, кабельные заводы и др.
4	100	Предприятия металообрабатывающей промышленности, машиностроительные заводы, электропромышленность, изготовление неизолированного кабеля, кирпича.
5	50	Предприятия легкой промышленности, металообрабатывающей промышленности без литейных цехов, пищевая промышленность и др.

Государственная политика экологического нормирования должна определять уровни критических антропогенных нагрузок на урбанизированную территорию. Эти нагрузки зависят не только от характера объектов хозяйственной деятельности, но и от степени соответствия урбанистических структур, природно-ландшафтным особенностям территории. Процессы урбанизации, которые происходят во всем мире (а в том числе, и в нашей стране), привели к значительному сосредоточению населения на ограниченных территориях, которые стали ареной глубоких изменений в окружающей среде, направленных в сторону нарушения природного равновесия. Считается, что для соблюдения экологического равновесия в региональных системах расселения следует придерживаться определенных градостроительных принципов, а именно:

- формирование экологически сбалансированного природного каркаса расселения;
- рационального хозяйственного зонирования территории;

- учет территориальной локализации природно-обменных процессов в градостроительном районировании;
- рассмотрение природного ландшафта с учетом его эволюции.

В разных странах существуют различные подходы к нормированию антропогенной нагрузки на урбанизированную территорию. При этом на данной территории обычно выделяют центральную часть (собственно город) и прилегающую (менее плотно заселенную) агломерацию. В центральной части плотность населения допускается до уровня примерно 2500 человек на 1 кв.км (в некоторых странах до 3000 – 5000 чел. на 1 кв.км). Средняя плотность по агломерации в целом устанавливается на уровне от 100 до 1500 чел. на кв.км (например, в Германии). В каждой из стран, в которых осуществляется политика нормирования, территория городской агломерации обычно делятся на отдельные зоны:

1) промышленность, жилищные массивы, транспортные коммуникации;
2) рекреационная зона, сельхозугодия;
3) леса и акватории.

В той же Германии первой зоне отводится 28% территории, второй зоне – 42% и третьей зоне – 30%. В США территория агломерации делится на три равные по площади зоны, а экологической нормой на 1 чел. считается 3га территории. Дело в том, что практически во всех странах процессы урбанизации вплоть до настоящего времени происходили стихийно, не планово. Только в последние годы появились программы рационализации заселения и размещения хозяйственных объектов. В настоящее время при проектировании региональных систем расселения считается целесообразным выделить такие специфические зоны:

- наиболее активной хозяйственной деятельности;
- экологического равновесия;
- буферную.

При этом необходимо учитывать устойчивость локальных природных экосистем (равнинные и горные, степные, лесостепные и лесистые, с достаточными ограниченными водными запасами и т.п.). Рациональная планировка центрального ядра агломерации должна включать город-центр, необходимые резервные территории для его развития и лесопарковый защитный пояс. Далее должна следовать зона ограниченного развития, в которой можно органи-

зовать кратковременный отдых населения. Считается, что для больших городов с населением более 1 млн.чел. зона ограниченного развития должна быть шириной не менее 35 – 40 км.

8.5 Экономические рычаги в экологической политике.

Инструменты экологического механизма охраны окружающей природной среды регламентируются законами Украины, постановлениями кабинета Министров и другими нормативными актами. Законодательство устанавливает такие экономические рычаги, как установление лимитов на использование природных ресурсов, на выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду, на размещение отходов. Государство также устанавливает нормативы и размеры сборов за выбросы вредных веществ и размещение отходов.

Рассмотрим эти инструменты несколько подробнее. **Лимитирование природопользования** применяется по отношению к предприятиям, которые допускают вредные выбросы, но не могут быть закрыты или перепрофилированы, так как выпускают, необходимую обществу, продукцию, повышают уровень занятости рабочей силы. **Платность природопользования** включает плату практически за все природные ресурсы за загрязнение среды и другие виды воздействия. При этом за сверхлимитное использование ресурсов и нормативных выбросов оплаты повышается в несколько раз. **Материальное стимулирование** состоит в основном в использовании поощрительных мер, таких как: установление налоговых льгот, освобождение от налогообложения экологических фондов и природоохранного имущества, применение поощрительных цен и надбавок на экологически чистую продукцию, применение льготного кредитования и т.п. **Плата за загрязнение среды** взымается на основе установленных лимитов и их возможного превышения. **Плата за ухудшение качества природных ресурсов** взымается за такие результаты воздействия как: снижение плодородия почвы, уменьшение продуктивности лесов, рыбопродуктивности водоемов и т.п. Нормативы сборов за загрязнение представляют собой фиксированные суммы (в гривнах) за единицу массы вредных выбросов. Плательщиками сборов являются субъекты предпринимательской деятельности независимо от формы собственности, а также учреждения, организации и отдельные лица, осуществляющие выбросы. Объектами начисления сбора для стационарных источников

являются объемы (массы) выбросов и отходов. Для подвижных источников объектом начисления является масса использованного топлива.

Нормативы сборов за выбросы представлены в таблицах 8.5 и 8.6.

Нормативы сборов должны быть увеличены путем умножения на коэффициент $К_1$ в зависимости от количества жителей в населенном пункте или $К_2$ в зависимости от его народно-хозяйственного типа (см. таблицы 8.7 и 8.8)

Нормативы сбора за выбросы автомобильного транспорта представлены в таблице 8.9.

Таблица 8.5 Нормы сборов за выбросы

Наименование загрязняющего вещества	Норматив сбора грн/т
Азота окись	53
Аммиак	10
Ангидрид серный	53
Ацетон	20
Бенз(а)пирен	67871
Ванадия пятиокись	199
Водород хлористый	2
Углерода окись	21
Углеводород	3
Газообразные фтористые соединения	132
Твердые вещества	2
Кадмий и его соединения	422
Марганец и его соединения	1376
Никель и его соединения	2150
Озон	53
Ртуть и её соединения	2260
Свинец и его соединения	2260
Сероводород	171
Сероуглерод	111
Стирол	389
Фенол	242
Формальдегид	132
Хром и его соединения	1431

Таблица 8.6 Нормативы сборов в зависимости от класса вредности

Класс вредности	Нормативный сбор, грн/т
I	381
II	87
III	13
IV	3

Таблица 8.7 Коэффициент увеличения сбора за выбросы в зависимости от численности населения.

Численность населения (тыс. чел.)	Коэффициент $К_1$
До 100	1,00
100-250	1,20
250-500	1,35
500-1000	1,55
Сверх 1000	1,80

Таблица 8.8 Коэффициент увеличения сбора в зависимости от народно-хозяйственного типа населенного пункта

Типы населенных пунктов		Коэффициент $К_2$
I	Организационно-хозяйственные и культурно-промышленные центры местного значения с превосходством аграрно-промышленных функций (районые центры, города районного значения, поселки и села)	1,0
II	Многофункциональные центрв, центры с превосходством промышленных и транспортных функций (республиканские и областные центры, города государственных республиканских, областных значеный)	1,25
III	Населенные пункты, отнесенные к курортным с превосходством рекреационных функций	1,65

Таблица 8.9 Нормативы сбора оплаты за выбросы автомобильного транспорта

Вид топлива	Норматив сбора, грн/т
Дизельное топливо	3
Бензин:	
этиловый	4
не этиловый	3
Сжиженный газ	4
Сжатый природный газ	2

8.6 Региональная экологическая стратегия и её реализация

Основная доля ответственности за экологическую безопасность населения и рационального природопользования в соответствии с Конституцией возлагается на государство и его институты. Государственные органы берут на себя обязанность по выработке законодательных основ экономической политики и внедренные в процессе ее реализации структурно-функциональных, научных, технических, экологических, юридических, социальных, контрольных и других, необходимых рычагов и средств.

Вместе с тем, конкретное использование решений и координация экологической деятельности на местах, с учетом региональных условий, возможностей прямого взаимодействия с субъектами хозяйственной деятельности, должны быть возложены на местные органы власти. Другими словами экологическая политика должна быть региональной по своей сути. Известно, что в марте 1998 года Верховная Рада Украины приняла Постановление: «Основные направления государственной политики Украины в области защиты окружающей среды, использования природных ресурсов и обеспечения экологической безопасности». После принятия этого документа определяющую экологическую стратегию на национальном уровне, каждая область разработала в 1999 году свои региональные планы.

В связи с этим, есть необходимость рассмотреть более конкретно особенности экологической политики на примере какого-нибудь отдельного регионального образования. В данном случае, в качестве примера, возьмем Днепропетровскую область, население которой и ее природная среда подвергаются мощному и разруши-

тельному техногенному воздействию. Территория областного центра г. Днепропетровска и особенно таких городов как Кривой Рог и Днепродзержинск, по мнению многих экспертов, уже давно, должна быть отнесена к категории зон экологического бедствия. Если говорить о загрязнении атмосферы этих городов, то следует назвать такие цифры: объемы годовых вредных выбросов в воздушную среду г. Днепропетровска составляют 150 – 160 тыс.т., в Кривом Роге 450 – 460 тыс.т. и в Днепродзержинске 120 – 130 тыс.т. В целом по области выбросы в атмосферу составляют около 900 тыс.т. в год.

Уже одни эти показатели говорят о серьезном экологическом неблагополучии в регионе. Однако загрязнение атмосферы городов – это только одна сторона проблемы. На территории области практически все объекты хозяйственной деятельности оказывают вредное, а иногда и очень опасное воздействие на окружающую среду.

Комплексная областная программа по обеспечению экологической безопасности и рационального природопользования [109] была разработана в 1999 г. областной государственной администрацией, главным управлением экологии, государственным управлением экологической безопасности при участии Института проблем природопользования и экологии НАН Украины. Она рассматривается как региональный план действий на определенный период времени. Кроме названной программы, в 2001 г. был разработан еще один важный и содержательный документ под названием «План региональной экологической политики в Днепропетровской области», разработанный в рамках международной программы (составители: А.П.Бабий, Н.П.Грицан – Днепропетровское агентство устойчивого развития, а также А. Ван-Бергейн, Р.Кляйнианс, К.Петерс, Е. Ван дер Сток – АМЕСО, экологические услуги, Голландия).

Оба документа содержат довольно подробный перечень мероприятий экологической направленности. Мы здесь назовем только некоторые основные положения разработанных программ.

Прежде всего, в программах представлена инвентаризация источников токсичных выбросов и стоков, а также объектов вредного воздействия на человека и природную среду. Региональным планом выделены четыре класса предприятий (наиболее широко представленных в области), которые расположены по степени их влияния на окружающую среду. **Первый класс** включает предприятия с наи-

более опасным воздействием на среду: комбинаты черной металлургии с полным металлургическим циклом и мощностью более 1 млн.т. чугуна и стали в год; мощные тепловые электростанции; производство по выплавке цветных металлов (ртути, марганца, урана, свинца, мышьяка и т.п.) непосредственно из руд и концентратов; предприятия повторной переработки цветных металлов, производство ферросплавов, отдельные виды химического производства и др.

Второй класс – предприятия очень опасного воздействия на среду. Сюда относятся: предприятия горнорудной промышленности (добыча угля, полезных и полиметаллических руд), добыча горных пород VIII–IX категории твердости, производство свинцовых аккумуляторов, искусственной кожи, пленочных материалов с использованием легких органических растворителей производство портландцемента и т.п.

Третий класс – умеренно опасные предприятия – включает: производство битума, пластических масс (карболита, хлорвинила и т.п.), производство искусственных минеральных красок, лаков, олифы, рубероида и т.п.

Четвертый класс – малоопасные предприятия: изготовление бумаги, производство электротехнических машин и приборов, получение электролитов, производство красного и силикатного кирпича, искусственного камня, бетонных изделий, спиртоводочные и винные заводы и т.п.

При определении классов по степени вредности производства принимаются во внимание не только выбросы, жидкие стоки или вскрышные работы (при горных выработках), но также объемы и степень токсичности накопленных твердых отходов.

В Региональной программе действий дается также комплексная экологическая оценка отдельных районов и областей с учетом совокупности показателей.

Отмечается, что удовлетворительная экологическая ситуация наблюдается в северной части области (Верхнеднепровский, Царичанский, Магдалиновский районы). В остальных районах и особенно в городах, а также их окрестностях экологическая обстановка остается сложной или даже критической. Кроме названных ранее городов Днепропетровска, Кривого рога и Днепродзержинска, подверженных сложной техногенной нагрузке, следует добавить Зеле-

нодольск, Орджоникидзе, Марганец, Никополь, Павлоград, Вольногорск, Желтые Воды, Новомосковск.

В Программе приводятся основные количественные показатели загрязнения внешней среды. Поскольку часть таких показателей была приведена ранее в разделе 6, мы здесь приведем только общую характеристику территории и отдельные данные. Область расположена в юго-восточной части Украины на обоих берегах Днепра. Площадь областной территории (около 32 тыс.кв.км) сравнима с площадью таких стран, как Голландия, Бельгия, Дания, или Швейцария. 84% населения области – городские жители, а именно они больше всего подвержены вредному экологическому воздействию. Область богата полезными и другими металлическими рудами, содержащими хром, никель, титан, алюминий, ртуть, уран, магний. Общие запасы полезных и марганцевых руд считаются одними из крупнейших в мире. Область также богата запасами угля, множеством нерудных материалов. Значительная часть сельскохозяйственных земель – это известные на весь мир плодородные черноземы. В области функционирует более 6000 предприятий, производящих товары самых различных наименований. Здесь создаются около 12% валового национального продукта.

Наличие природных богатств и не всегда рациональная хозяйственная политика по их использованию привели к серьезной концентрации вредных производств на территории и к устойчивому загрязнению окружающей среды на протяжении нескольких десятилетий. Казалось бы, что мощный интеллектуальный потенциал (14 вузов, более 40 научно-исследовательских учреждений, более 30 конструкторских бюро) могли бы оказать серьезную помощь администрации региона в решении экологических проблем. Но этот потенциал все еще неэффективно используется в данном направлении.

Обсуждаемые экологические программы включают, прежде всего, перечень отправных показателей. В атмосферу поступают выбросы от 25 тыс. стационарных и более 700 тыс. передвижных источников. Основными стационарными источниками являются 57 металлургических предприятий, выбросы которых в атмосферу равны 530 тыс.т в год, а также 11 тепловых электростанций (их выбросы равны 250 тыс.т в год). Продуктами выбросов являются: пыль, SO_2, CO, NO_2 и другие вредные ингредиенты. Выбросы от подвижных источников в 2000 г. составили 860 тыс.т.

Серьезной проблемой является загрязнение Днепра и 145 малых рек данного региона. Длина Днепра на территории области составляет 261 км, общая длина малых рек – 4623 км. Объем водных ресурсов региона составляет 53,3 км^3, включая 0,3 км^3 подземных вод.

В поверхностные водные объемы на территории региона поступает около 2 млрд.м^3 промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод от 85 предприятий и городских канализационных систем. В 1999 г. только в реку Днепр было сброшено 269 тыс.т. нефтепродуктов, 146 тыс.т. сульфатов, 190 тыс.т хлоридов, 1358 т аммиака, 350 т железа и т.д. Основными загрязняющими веществами являются нефтепродукты, фенолы, тяжелые металлы, аммиак и нитриты.

В области сложилась чрезвычайная ситуация с размещением твердых токсических и радиоактивных отходов. Происходит непрерывное и неконтролируемое загрязнение почвы, усиливается ветровая и дождевая эрозия, нарушаются природные экоситемы и ландшафты. Лесистость территории составляет всего 4% (против 30% среднего мирового показателя), что недостаточно для поддержания атмосферного баланса.

Учитывая все названные факторы, региональная экологическая программа предусматривает использование соответствующих мер и средств.

Обращает на себя внимание структура плана региональной экологической политики, представленная в [110]. Основой разработанной модели является выделение шести отдельных групп целевой экологической политики:

1) промышленность (металлургия, горнодобывающая отрасль, химическое производство, другие отрасли);
2) энергетика;
3) коммунальное хозяйство (канализационные системы и очистные сооружения, системы бытовых отходов);
4) сельское хозяйство;
5) транспорт;
6) потребители.

Далее каждая из групп подразделяется на такие составные элементы: описание воздействия (на среду), цели, подход (способ реализации целей).

К примеру, в такой группе как «Энергетика», в пункте «Описание» называются основные проблемы энергетики, порождающие экологический урон, называются основные предприятия отрасли (в данном случае – Криворожская ГРЭС и Приднепровская ГРЭС.

В пункте «Воздействие» называются состав и объемы выбросов, жидких стоков и твердых отходов, а также величина затрачиваемых топливных ресурсов.

В пункте «Цели» говорится о целесообразности снижения энергопотребления, а, следовательно, сокращения производства энергии, получаемой за счет сжигания органического топлива.

В пункте «Подход» дается перечень мероприятий, позволяющей достигнуть поставленной цели, а именно:

- разработать и осуществить программу энергосбережения на предприятиях энергетического комплекса, ориентируясь на опыт стран, в которых подобные программы действуют;
- внедрить современное энергосберегающее оборудование на предприятиях-потребителях энергии;
- внедрить единую систему налогообложения и платежей за расход и перерасход энергии;
- перейти к более широкому использованию альтернативных источников энергии (энергии ветра, Солнца, гидроэнергии, малых рек и т.п.), используя при этом льготное налогообложение и другие средства;
- организовать компанию (в учебных заведениях, в средствах массовой информации и т.п.) по повышению общественного сознания в вопросах сохранения и использования энергии.

В такой целевой группе как «Транспорт» пункт «Описание» акцентирует внимание на том, что транспортная система, являясь важнейшим элементом экономического прогресса в любой стране, приносит в то же время, огромный вред окружающей среде. При этом рассматриваются все виды транспорта: автотранспорт, железнодорожный, водный, воздушный, трубопроводный.

В пункте «Воздействие» речь идет о выбросах в атмосферу вредных веществ, расходование топливных ресурсов, шумовое(акустическое) загрязнение среды, высокая опасность аварий, нарушение ландшафта и природных экосистем при прокладке дорог, негативном влиянии на глобальные экологические процессы.

В пункте «Цели» предлагается:

- сократить загрязнение атмосферы от транспорта (особенно в больших городах)
- сократить потребление ресурсов и энергии;
- уменьшить риск аварий при транспортировке вредных веществ;
- производить минимальное изменение ландшафта и природных экосистем.

В пункте «Подход» предлагаются меры по достижению поставленных целей:

- разработать на технологическом уровне подходы к снижению подвижными источниками токсичных выбросов;
- установить более жесткие стандарты на вредные выбросы и акустическое воздействие на среду обитания;
- ограничить транспортные потоки в городских районах плотного заселения путем введения штрафных санкций и запретов;
- сформировать систему платежей и налогов, имея в виду дорожный сбор, сборы за топливо и его виды, платные стоянки и т.п., которые направлялись бы на природоохранные цели;
- внедрить систему периодического контроля состава выхлопных газов;
- повысить гражданскую ответственность владельцев частного транспорта за соблюдение экологических норм;
- повысить юридическую и материальную ответственность транспортных предприятий, осуществляющих перевозку экологически опасных грузов.

Своеобразной особенностью, обсуждаемой региональной программы действий, является наличие в ней целевой группы «Потребители». В пункте «Описание» речь идет о том, что именно потребители, как важнейший элемент экономической системы, оказывает существенное влияние на окружающую среду, особенно в крупных городах.

В пункте «Воздействие» говорится о потреблении ресурсов и энергии, что прямо или опосредованно приводит к выбросам вредных веществ в атмосферу, загрязненных жидких стоков в реки, водоемы и в грунт, к образованию твердых бытовых отходов, которые накапливаются на контролируемых и стихийных свалках, к участию потребителей в загрязнении среды пестицидами и т.п.

В пункте «Цели» записать:

- сократить избыточное потребление ресурсов и энергии;
- сократить объемы бытовых отходов, обеспечит их первичную сортировку;
- снизить применение активных синтетических моющих средств;
- повысить экологическую образованность населения и его гражданскую ответственность.

В пункте «Подход» говорится, что наиболее эффективным путем влияния на потребителя является, прежде всего, предоставления ему своевременной информации об экологической ситуации, об источниках загрязнения среды, об уровне вреда для здоровья населения, обусловленного нарушением природного баланса.

Органы регионального и местного управления должны инициировать образование в среде потребителей общественного движения, создания общественных организаций экологической направленности и оказания им действенной помощи.

Аналогично упомянутым здесь целевым группам составлен план действий в других областях промышленности, в коммунальном секторе и в сельском хозяйстве.

Региональная экологическая проблема состоит не только в рациональном планировании действий, а прежде всего, в активной деятельности по претворению этих планов в жизнь.

Координацию работы по выполнению намеченных планов в Днепропетровской области осуществляет Государственное управление по защите окружающей природной среды и другие природоохранные организации. Естественно, что экологические проблемы находятся под постоянным контролем облгосадминистрации, областной прокуратуры, регулярно обсуждаются на заседаниях областного совета.

Эта большая, сложная работа дает свои результаты, однако, также как и во всей стране изменить сложившиеся негативные тенденции пока не удается.

Подобно тому, как это было сделано практически во всех отдельных областях и в Автономной республике Крым, в каждом крупном городе Украины разработаны свои стратегические программы в области обеспечения экологической безопасности городских жителей. Естественно, что в программах каждого из городов много общих черт и, вместе с тем, они содержат и свои характерные особенности. Рассмотрим, как и ранее, в качестве примера, со-

держание подобной программы и меры по ее реализации в городе Днепропетровске [108].

Город Днепропетровск, являясь крупным индустриальным центром, имеет на своей территории почти все виды энерго- и ресурсоемких отраслей промышленности: металлургию, химическое производство, производство строительных материалов, крупное машиностроение, а также мощную тепловую элеткростанцию, работающую на угле. В связи с быстрыми темпами индустриализации, особенно начиная с середины XX столетия, названные отрасли инициировали мощное давление на окружающую природную среду. К настоящему времени загрязнение атмосферного воздуха, водного бассейна (особенно реки Днепр), подземных вод и грунта достигли критического уровня и по многим показателям превышают допустимые санитарные нормы. Нарушение природного равновесия в регионе, кроме загрязнения среды, привело к таким негативным изменениям, как резкий подъем грунтовых вод, появление оползней на кромках оврагов и глубоких балок, пересекающих городскую территорию, значительному росту типовых для загрязнённой окружающей среды заболеваний и другим опасным явлениям. На территории отдельных предприятий и в окрестности города скопилось огромное количество твердых промышленных и бытовых отходов. Появились серьезные проблемы в обеспечение жителей города качественной питьевой водой из-за недостаточной мощности существующих очистных сооружений. В этой сложной экологической обстановке возникла необходимость в выработке комплекса стратегических и тактических мер для защиты городского населения и природных авуаров от вредного техногенного воздействия.

Исполкомом городского совета и Управлением по экологии была разработана и Решением городского совета утверждена «Комплексная долгосрочная программа охраны окружающей природной среды и рационального использования природных ресурсов г. Днепропетровска на 2000 – 2010 гг.». В основу этой программы положены следующие основополагающие принципы:

- приоритетность требований экологической безопасности и обязательного обеспечения экологических стандартов;
- гарантирование экологической безопасности среды для жизни и здоровья людей;

- опережающий характер мер по охране окружающей природной среды;
- научное обоснование экономических, экологических и социальных интересов общества;
- использование природных ресурсов с учетом степени антропогенных изменений территорий проживания населения;
- прогнозирование состояния окружающей среды и обязательность экологической экспертизы.

Сама программа содержит следующие основные положения:

- исследование и контроль состояния атмосферного воздуха на городской территории с точки зрения газового пылевого и радиоактивного загрязнения;
- экологический аудит промышленных предприятий города;
- инвентаризация источников загрязнения воздуха;
- инвентаризация источников загрязнения водного бассейна реки Днепр и ее притоков;
- ликвидация несанкционированных и закрытых накопителей отходов с проведением рекультивации земель;
- внедрение на заводах города альтернативной программы очистки сточных вод промпредприятий;
- совершенствование снабжения жителей города чистой питьевой водой путем повышения эффективности ее обеззараживания, реконструкция насосных станций подачи воды, проведения восстановительных работ сооружений биологической очистки сточных вод;
- выявление зон подтоплений жилого сектора и промышленных площадок, водопонижение и предотвращение подтопления территории путем реконструкции ливневых коллекторов;
- координация и контроль автомобильного движения на улицах и дорогах города с целью существенного снижения выбросов в окружающую среду;
- создание специальных предприятий в рамках обеспечения защиты окружающей среды, типа регионального центра по переработке отходов ЗАО «Экоцентр»;
- предупреждение оползневых процессов на территории города (инженерная защита, водопонижения);

- осуществление проекта «Прибрежные защитные и водоохранные зоны рек Днепр, Самара, оз.Ленина и других водных объектов»;
- реализация природоохранных программ в отдельных районах города, например «Оздоровление экологической ситуации на территории Диевской поймы» и другие меры.

Каждый из пунктов программы содержит конкретное наполнение и необходимую детализацию.

Выполнение этих и других положений программы находится под контролем городского света и его исполнительного комитета.

Деятельность городскго совета, других городских органов, научно-исследовательских учреждений, отдельных общественных организаций при участии средств массовой информации приносят определенные положительные результаты. Совместными усилиями удается удерживать на каком-то стабилизированном уровне экологическую ситуацию в городе. Что же касается кардинального улучшения обстановки, то, то здесь существенных сдвигов пока не наблюдается.

Это вызвано неразрешенностью многих общегосударственных и региональных проблем, начиная от низких темпов совершенствования технологий по выпуску малоотходной и экологически чистой продукции, явно недостаточного финансирования отрасли и кончая все еще низким уровнем экологичекой сознательности, образованности и культуры населения.

ДУМАЯ О БУДУЩЕМ

Человеческий род сможет выжить только при изменении самих цивилизованных начал. А это возможно только при условии наижесточайшего самоограничения и коллективной дисциплины.

Акад. Н.Н. Моисеев

Если вы не думаете о будущем, у вас его не будет.

Дж. Голсуорси

Человек может обойтись без воздуха всего несколько минут, без воды - несколько дней, без пищи – несколько недель. В то же время, не думая о будущем он может прожить всю свою жизнь.

N N

Бди!

Козьма Прутков

Оставаясь в рамках обсуждаемой проблемы, всё ещё трудно говорить о наступлении так называемого «светлого будущего». Основанием для этого служит ряд серьёзных факторов, характеризующих современный этап развития общества. Прежде всего необходимо с сожалением отметить, что несмотря на прилагаемые на государственном и региональном уровне усилия, экологическая ситуация в больших городах Украины и, в первую очередь, состояние их воздушной среды вызывает серьезную тревогу. Если к середине 90-х годов прошлого столетия выбросы в атмосферу несколько уменьшились из-за сокращения промышленного производства, то в настоящее время происходит их непрерывное нарастание. Это объясняется несколькими причинами. Первой из них является то, что промышленность страны, обеспечивающая основной вклад в ВВП, по-прежнему ориентирована на ресурсо- и энергозатратное производство. При этом нормы производственных удельных затрат существенно превышают показатели развитых стран.

Другой причиной служит то, что значительная часть продукта производится на оборудовании, срок безопасной службы которого уже истек или подходит к концу. Очистные сооружения на подобном оборудовании уже не могут эффективно выполнять своих технологических функций.

В больших городах резко нарастает доля выбросов от подвижных источников, поскольку количество автомобилей на улицах и дорогах городов непрерывно увеличивается.

Все более значительную долю в загрязнение городской среды вносит коммунальное хозяйство и сами жители городов. Нужно откровенно признать, что уровень экологического сознания и даже уровень оценки экологической опасности у значительной части населения все же низок. Экономические рычаги в системе экологического контроля работают неэффективно или не работают вовсе. Экологические фонды расположены в десятках ведомств, что не дает возможности сосредоточенно использовать их по прямому назначению.

Наконец, следует иметь в виду, что в рыночной экономической системе защита окружающей среды от вредного воздействия входит в категорию так называемых экстерналий. Другими словами, этот вид экономической деятельности лежит за пределами данной системы: он невыгоден, поскольку не приносит прибыли. Сколько бы не внушали частному предпринимателю мысль о том, что окружающую среду загрязнять вредно – эти внушения будут всегда бессмысленными. Координацию работы по охране окружающей среды должно брать на себя государство. Действия государственных институтов по отношению к производителю материальных благ должны быть такими, чтобы защита окружающей среды стала для него выгодной. Или с другой стороны – загрязнение среды сверх установленных нормативов должно приносить ему убыток. С этой целью следует установить действенный механизм непрерывного (можно сказать ежесуточного) контроля за выбросами всех предприятий, которые вредно воздействуют на среду, и немедленно реагировать на результаты контроля. Эта реакция должна иметь форму наказания за нарушение норм в виде увеличенного налога или штрафов, или, наоборот, в виде поощрения за снижение объемов выбросов, например, путем уменьшения налогового бремени. Следует отметить, что любые санкции против предпринимателя должны быть юридически подкреплены и для этого должна быть усовершенствована региональная юридическая политика в области экологии (как об этом говорится, например, в [157]).

В случае эффективного внедрения экономических рычагов в отношениях между государственными институтами и предприятиями, у руководителей всех субъектов хозяйственной деятельно-

сти должен появиться стимул для поиска новых, экологически безопасных, технологий или же для оплаты усилия научных коллективов в деле поиска таких технологий.

Здесь следует отметить еще одну сторону государственной политики, связанную со строительством новых предприятий на основе привлечений иностранных инвестиций. Известно о существовании тенденции строить вредные предприятия на «чужой» территории. Следует, по-видимому, очень строго контролировать процедуру создания новых экологически опасных производств, особенно в тех регионах, которые уже перенасыщены источниками вредных выбросов.

Если продолжить разговор об особенностях экологической политики в рамках рыночной системы экономики, следует иметь в виду один важный недостаток, присущий данной системе. Речь идет о том, что в погоне за прибылью (а это очень важный стимул) происходит выпуск избыточного продукта, при изготовлении которого затрачиваются ресурсы и наносится вред окружающей среде. В свою очередь настойчивая реклама порождает избыточное потребление произведенного продукта. Здесь можно привести бесчисленное количество примеров того, как люди, приобретая новый продукт, отказываются от т.н. «устаревших», но вполне пригодных вещей и дееспособных моделей технических устройств (к примеру, по данным печати, в 2006 г. в США были сданы в утиль, т.е. на уничтожение, десятки миллионов (!) персональных компьютеров). То же самое происходит с бытовой техникой, мебелью, средствами транспорта, с обувью и одеждой, мода на которые непрерывно меняется. Миллионы тонн избыточно произведенных продуктов питания уничтожаются (или, в лучшем случае, перерабатываются на корм для животных) после истечения срока их годности. К сожалению, на этот аспект экологической проблемы обращают внимание пока только активисты т.н. «зеленого движения». Что касается международных организаций, межгосударственных проектов, то они в основном направлены на решение глобальных экологических проблем и в меньшей мере, посвящены координации выпуска той, или иной продукции.

Государственные и политические деятели, предприниматели, да и многие граждане во всем мире внимательно следят за показателями торгов на мировых биржах, за котировкой акций и считают экономически целесообразным, чтобы они росли. А ведь это во

многих случаях связано с избыточным расходом ограниченных мировых ресурсов и вредным воздействием на окружающую среду.

Возникает закономерный вопрос: а можно ли в принципе совместить материальный прогресс, к которому всегда будет стремиться человечество, с уменьшением нагрузки на окружающую среду? На него можно ответить утвердительно, основываясь на отдельных, хотя пока немногочисленных, примерах. Возьмем, к примеру, такую страну как Голландия (Нидерланды). Это небольшая североевропейская страна с площадью 41,526 тыс. кв.км и населением 16,57 млн. чел. (2007 г.), с национальным доходом на душу населения - 25800 долларов США. Географическое положение страны отличается тем, что значительная часть территории лежит ниже уровня моря и это потребовало многолетних усилий жителей страны, затраченных на её обустройство. По берегам Северного моря были построены дюны и дамбы общей протяженностью 3 тыс. км. В настоящее время, как и ранее, голландцам приходится постоянно заниматься осушением земельных угодий. Запасы пахотной земли в Голландии очень незначительны, а именно 0,07 га/чел. (в Украине – 0,63 га/чел.). Несмотря на отмеченные трудности, страна смогла преломить сложившиеся тенденции и, продолжая превышать жизненный уровень, затормозила процесс загрязнения и деградации природной среды на своей территории. И это в то время, когда в стране активно развиваются такие промышленные отрасли как нефтехимическая, металлургическая, машиностроительная и другие. Страна знаменита своим сельским хозяйством. Она покрывает 20% мирового экспорта мясомолочной продукции: мяса птицы, молока, яиц, сливочного масла. В стране задействована самая большая в мире площадь теплиц, здесь развивается плодоводство, овощеводство, цветоводство (при этом экспортируется до 2 млрд. луковиц тюльпанов в год). И это все притом, что в сельском хозяйстве задействовано всего лишь 2% рабочей силы. 7% территории страны – это окультуренные ландшафты, практически все леса искусственного насаждения. Города страны благоустроены, не перегружены автомобильными потоками и внешне привлекательны, особенно для иностранных туристов (3 млн. человек в год). Голландия стала инициатором создания экологических проектов, направленных на оказание помощи странам Восточной Европы, включая Украину.

Отдельные заметные достижения в охране окружающей среды можно найти и в других странах и, прежде всего, в Западной Европе. Было бы неплохо, если бы наши государственные и политические деятели, представители региональных администраций внимательно познакомились с положительным опытом других стран и содействовали такой государственной политике, где проблемы экологии были поставлены в ряд важнейших приоритетов.

Что же можно было бы взять из зарубежного опыта и рекомендаций отечественных экологов для того, чтобы улучшить состояние воздушной среды наших городов? Начать, по-видимому, стоит с проблемы озеленения территорий. Давно известен неоспоримый постулат: «Природа защищает землю, покрывая ее растительностью». Известен также факт, что многие большие города мира, в которых мало зеленых насаждений, дышат чужими легкими, т.е. поглощают кислород, привнесенный извне. Известно, что все растения в процессе фотосинтеза поглощают углекислый газ и выделяют кислород. Обменные процессы в атмосфере и ветровые потоки пока еще в целом позволяют выравнивать концентрацию кислорода в воздушной среде. Однако в отдельных пунктах на территории городов, например, в уличных каньонах, заполненных движущимися автомобилями, в углублениях и оврагах образуется застойный избыток углекислого газа, окиси углерода и устойчивый дефицит кислорода. Положение могут спасти только зеленые насаждения. Города должны утопать в зелени. Вокруг каждого города необходимо создавать зеленый пояс, куда для отдыха и восстановления здоровья могут перемещаться жители города в свободное время или в случаях критического загрязнения воздушной среды. В пределах такой загородной рекреационной зоны (подобно тому, как это делается за границей) следует предусмотреть удобства для временного пребывания людей: разместить места для стоянки транспорта, для установки палаток, площадки для спортивных игр, передвижные пункты торговли, места для разведения огня и приготовления «походных» деликатесов, урны для уборки мусора, туалеты и т.п. Естественно, что за все эти услуги следует взымать хотя бы символическую плату.

Активное озеленение городов, озеленение всей страны должно быть инициировано как национальная программа. Для того, чтобы не считать эту идею пустой иллюзией, следует вспомнить некоторые исторические прецеденты. В Советском Союзе в 1947 году, т.е.

уже через два года после окончания кровопролитной войны, был объявлен известный «План преобразования природы». Его воплощение сыграло значительную роль в оздоровлении и обогащении природных ресурсов на Юго-Западе СССР, включая территорию Украины. Речь идет о формировании лесозащитных полос в засушливых и потенциально плодородных землях страны. При осуществлении плана был задействован огромный материальный, финансовый, технический, трудовой и научный потенциал (естественно под жестким партийно-правительственным контролем). К проекту присоединились деятели культуры и искусства – на эту тему были написаны литературные произведения, снимались кинофильмы, сочинялась музыка и песни. В короткие сроки были посажены, а затем постепенно выращены тысячи гектаров древесных насаждений в виде лесозащитных полос. В конечном счете, эта программа позволила защитить поля от суховеев и совершенно изменить агробиологическую ситуацию на большой территории.

Вековыми традициями в нашем народе была воспитана любовь к «зеленому другу». Почему бы не использовать эти добрые традиции в деле спасения окружающей природной среды от дальнейшей деградации?

Возьмем еще одну проблему современных больших городов – рост интенсивности автомобильного движения на улицах и дорогах, а следовательно, и нарастание загрязнения атмосферы. Снова же можно говорить о том, что многие страны ранее уже испытали шоковую автомобильную нагрузку в городах и успели выработать некоторые меры ее смягчения.

В разделе 5 приведена общая характеристика подвижных источников вредных выбросов. Здесь речь пойдет о возможных путях решения этой проблемы на основе опыта других стран и рекомендаций отечественных специалистов в данной отрасли.

Речь должна идти о том, как предотвратить для городских жителей все нарастающую угрозу задохнуться в автомобильном чаду. Кроме загрязнения воздушной среды существует и другая (косвенная по отношению к экологии) проблема автомобилизации – образование заторов («пробок») на улицах и дорогах больших городов. В качестве примера можно было привести появившиеся в печати данные о том, что в середине сентября 2007 г. на некоторых улицах Киева возникали пробки, в каждой из которых было более 10 тысяч автомобилей. Ситуация ухудшалась от того, что припарковавшиеся

по обочинам автомобили еще более затрудняли маневры водителей. Установлено, что в таких пробках люди теряли минуты и часы драгоценного рабочего времени. Резко возросло количество дорожно-транспортных происшествий. Более того, стоящие или движущиеся черепашьим ходом автомобили – это сосредоточенный источник вредных выхлопов в жилой зоне. Подобные явления на улицах и дорогах наблюдаются в Харькове, Днепропетровске, Одессе, Львове и других городах Украины.

Таким образом, контроль интенсивности автомобильного движения становится одной из первоочередных задач городских властей. Понятно, что остановить автомобильную экспансию в городах при нынешних условиях практически невозможно. Следует искать паллиативные решения. Одно из них – ограничение движения на отдельных маршрутах (обычно в центральной части города).

Есть смысл проанализировать, как эта проблема решается в других странах и что можно было бы предложить с нашей стороны. Следует сразу признать, что единого рецепта – как справится с этим недугом – в мире пока не существует. Рассмотрим отдельные варианты.

Во-первых, это регулируемый непосредственно дорожными службами запрет на выезд на заданный участок улицы или дороги установленные промежутки времени.

Другой вариант (как это сделано в Лондоне) предполагает введение отдельной платы за въезд в центральную часть города. После оплаты водитель получает пропуск и закрепляет его на лобовом стекле. Само собой разумеется, что парковка в центре города оценивается значительно дороже, чем на удалении от центральной части. В Афинах (Греция) ограничение транспортных потоков основано на принципе «чет-нечет», а именно: машины с четными номерами допускаются на регламентированные участки дороги в четные дни, а с нечетными номерами – в нечетные дни. Борьба с заторами на городских дорогах затронула и США. Так в Лос-Анжелесе введена практика: в одном автомобиле должно быть несколько пассажиров. Один человек в автомобиле (водитель) считается вредной роскошью. Принцип действия простой – один водитель в определённой, установленной между собой очередности перевозит других водителей попутчиков. В Париже частные автомобили вытесняются общественным транспортом. На центральных улицах три из четырех полос отводится для движения общественного транспорта и ог-

раничиваются высокими бетонными бордюрами. В Берлине все важные дороги и перекрёстки оборудованы специальными приборами, которые регистрируют интенсивность движения и передают сигналы в электронный центр, который регулирует работу светофоров, вводит ограничения скорости, высылает на место полицию и т.д. Во многих странах уже установилась практика, когда водитель, подъезжая к центральной части города, оставляет автомобиль на специальных стоянках, а сам пересаживается на общественный транспорт. В отдельных городах на нескольких радио-каналах ведутся передачи для автомобилистов, помогающие регулировать движение. Средства массовой информации ведут активную пропаганду, в которой делается акцент на том, что увеличение автомобильного парка в городах уже не является прогрессом. Можно привести пример одного из городов Голландии, Амстердама, где уже давно установилось мнение, что автомобили в городе являются деструктивной угрозой. В США и в Западной Европе на основе горького опыта городские власти пришли к выводу, что расширение проезжей части улиц, строительство новых автомобильных развязок, сооружение более современных пунктов парковки, а тем более ликвидация трамвайных и троллейбусных маршрутов, только способствуют активизации автомобильного движения и росту загрязнения воздушной среды. Эти меры (которые у нас еще пытаются внедрить) давно считаются неэффективными и устаревшими.

Одним из кардинальных решений является широкое использование велосипедов для перемещения людей на короткие и умеренные дистанции в центре города. Недавно в Париже заработала система проката велосипедов. Двухколесное (а иногда, трёхколёсное) средство берётся на прокат в одном пункте и сдаётся в другом в конце маршрута. Другим примером активного, можно сказать массового внедрения велосипедного транспорта можно считать уже упоминаемый город Амстердам.

Особо остро стоит проблема «автомобильного нашествия» на столицу Украины город Киев. В своё время, Киев завоевал авторитет города, по улицам и зелёным бульварам которого можно было спокойно побродить и полюбоваться достопримечательностями. В настоящее время ситуация коренным образом изменилась. Сейчас в Киеве зарегистрировано более 7,5 миллионов автомобилей (а ведь по дорогам города движутся также автомобили, прибывшие со стороны). Более того, это количество непрерывно нарастает на вели-

чину 40÷50 тыс. в месяц. Трудно представить себе впечатление иностранных туристов, едущих в экскурсионном автобусе, который движется в атмосфере выхлопных газов и на длительное время застревает в автомобильных пробках. Проблемы на дорогах возникают для автомобилей скорой помощи и пожарного транспорта. Существуют и другие побочные проблемы автомобилизации, которые также наносят вред окружающей среде: это густая сеть заправочных станций, пунктов мойки автомобилей, расположенных в жилой зоне городов и т.п.

Приведенные примеры показывают, что наступил момент, когда образно выражаясь необходимо «нажать на тормоза».

Следующей задачей региональных властей и общественности в деле защиты окружающей среды является активное воздействие на городских жителей, которые сами эту среду загрязняют. Если говорить об атмосфере, то следует вспомнить о дымящих свалках бытового мусора, которые планово или не планово размещены на территории городов. Известно, что мусоровозы часто увозят со двора только часть бытовых отходов, а остатки тут же и сжигаются. Ранее уже отмечалось, что особую опасность для человека представляют продукты горения пластиковых предметов, поскольку при этом образуются ядовитые вещества, такие как диоксины, фураны, полихлорбифенилы и т.п. По статистическим данным при сжигании бытового мусора образуется 38.2 нанограмм на 1кг отходов (нанограмм $=10^{-9}$ г). Опасность диоксинового загрязнения воздушной среды состоит в том, что в общей смеси диоксинов и родственных им веществ (общее количество – около 400) определённую долю составляют сильно токсичные соединения. Чемпионом среди известных человечеству ядов является тетрахлор-дибензол-парадиоксин (3,4,7,8ТХДД). Как уже отмечалось в разделе 4, диоксины имеют коварное свойство накопляться в организме человека в течение всей его жизни, а допустимая доля такого накопления составляет всего лишь 0.000002г.

Таким образом речь идёт о том, чтобы строго контролировать вывоз мусора из городской территории и категорически не допускать его сжигания. Более совершенным вариантом (принятым в странах Западной Европы) является сортировка отходов перед их удалением самими жильцами, размещающими в отдельных ёмкостях пластик, металл, стекло, бумагу, дерево и т.п., что даёт возможность более эффективной утилизации этих отходов.

В заключительных рекомендациях следовало бы сказать о том, как можно было бы повысить роль общественности в деле защиты окружающей среды. Известно, что в Украине есть политические партии так называемого «зеленого спектра», программы которых имеют прямую экологическую направленность. Эти партии являются важным звеном всемирного «зелёного движения», которое из года в год набирает силу и оказывает всё более заметное позитивное влияние на характер хозяйственной деятельности человека на Земле. Кроме политических партий в нашей стране действуют десятки общественных экологических организаций, роль которых особенно заметна на региональном уровне.

В качестве рекомендуемого примера рассмотрим деятельность Крымской республиканской Ассоциации «Экология и мир» (WWW.ecomir.crimea.ua). Экологическое движение в Крыму является одним из самых первых массовых движений общественности на территории Украины. Оно возникло еще в советское время, в конце 80-х годов в знак протеста против строительства атомной станции в районе мыса Казантип. Движение объединило научную общественность, интеллигенцию, студенческую молодежь, политических деятелей религиозные слои населения полуострова. Первым президентом Ассоциации стал профессор Симферопольского госуниверситета В.Г.Пивоваров. Значительную роль в становлении экологического движения в Крыму сыграли десятки крупных ученых различных специальностей: физики, механики, геологи, геофизики, геотектонисты, экономисты, сейсмологи, а также писатели и деятели культуры. Это движение получило активную поддержку местных средств массовой информации.

Участники созданной Ассоциации, специалисты своего дела, не считаясь со временем и не получая каких-либо материальных благ, работали в различных комиссиях, экспертных группах, проводили митинги и шествия, собирали подписи под воззванием против строительства АЭС (всего было собрано 350 тысяч подписей). В конечном счете, правительство СССР приняло решение о прекращении строительства. На этом этапе деятельность Ассоциации была прекращена. В дальнейшем члены организации активно участвовали в работе так называемого «Общественного Комитета Крыма» (КРК). Была составлена программа Ассоциации, где содержалась формулировка долгосрочных стратегических целей, таких как восстановление и сохранение уникальной природы Крыма,

осуществление единой экологической политики стран Азово-Черноморского бассейна и т.п.

Диапазон деятельности Ассоциации довольно широк. Об этом можно судить по разработанным и опубликованным концептуальным проектам и программам, а именно:

- Концепция устойчивого развития Крыма;
- Концепция создания экологического мониторинга Крыма на базе интеграции земных, авиационных и космических систем;
- Программа сохранения биологического и ландшафтного разнообразия Крыма;
- Создание Крымского природного национального парка;
- Концепция сохранения и укрепления здоровья человека: гуманитарно-экологический аспект;
- Эколого-экономическая система рекреационного использования лесов Крыма и т.д. (всего 11 программ).

В актив Ассоциации следует внести такие виды работы и экологических акций:

- Активное сотрудничество с Верховной Радой и министерством здравоохранения АРК, другими государственными органами, Крымской академией природоохранного и курортного строительства, научными учреждениями и учебными заведениями;
- Активная работа по грантам международных экологических фондов в рамках программ Европейского союза ФАР, ТАСПС и других;
- Организация и проведение республиканских конференций «Экология регионов и здоровье населения», международной конференции «Экологически чистая энергия для Крыма», международного семинара по проблемам сохранения биоразнообразия Крыма;
- Плодотворное сотрудничество с неправительственными организациями других стран, такими как : «Центр безопасной энергии» и «Корпус мира» (США), экологический фонд «Global Greegeant Fund» и другими;
- Проведение экологических семинаров в городах Крыма;
- Регулярные выступления в средствах массовой информации и издание книг: «Устойчивый Крым. План действий» (1999

г.), «Устойчивый Крым. Энергетическая стратегия XXI века» (2001 г.).

Завершая разговор о Крымской Ассоциации, следует отметить, что в Украине есть несколько десятков экологических общественных организаций и групп общенационального уровня. Наиболее влиятельными среди них есть Всеукраинская экологическая лига, Украинская экологическая ассоциация «Зеленый мир», Украинское товарищество защиты природы, Украинское товарищество устойчивого развития, Всеукраинский комитет поддержки программ ООН по проблемам окружающей среды и ряд других.

Упомянутые организации в своей деятельности опираются на международный опыт. Образцами активной деятельности здесь являются: Всемирный фронт охраны природы (работает с 1962 г.), международная неправительственная организация «Гринпис» (создана в 1971 г.) и другие. Известно, что названные организации продуктивно участвовали в подготовке таких документов, как Декларация Конференции ООН по проблемам окружающей среды и развития. Повестка дня на XXI столетие (Рио-де-Жанейро, 1992 г.), а также Конференции по изменению климата и защите биологического разнообразия (Киото) и других.

Прогрессивная общественность нашей страны возлагает большие надежды на положительные результаты работы неправительственных экологических организаций. Активизация их деятельности – это, прежде всего, показатель внедрения эффективных демократических принципов в систему управления государством. Наконец, это тот рычаг, который пока задействован не в полную силу, т.е. в его использовании есть большие резервы. Может быть именно здесь, т.е. в массовом общественном воздействии, стоит искать точку приложения усилий, которые смогли бы замедлить скорость деградации окружающей среды и развернуть движение в сторону восстановления утраченного равновесия.

Возникает вопрос: с чего же начать свою деятельность экологическим организациям на локальном, муниципальном уровне, т.е. в рамках одного города, области, региона? Конечно, следует начать с составления стратегической программы и разработки плана тактических действий. Об одной из таких программ, составленных для Крыма, речь уже шла ранее. Но это получается ответ на поставленный вопрос в общем виде. Более правильно на него нужно было бы ответить так: необходимо начать с единого, может быть и не очень

масштабного, но конкретного действия. Рассмотрим возможные варианты. К примеру, добиться того, чтобы:

- Ежедневно при передаче прогноза погоды, диктор называл бы данные о состоянии воздушной среды на территории города и приводил рекомендации специалистов-экологов или медиков о том, как себя вести в случае возникновении критических ситуаций;
- Уже в ближайшее время вдоль какой-либо магистрали была бы проложена велосипедная дорожка (познакомьтесь, как это сделано в Амстердаме или Париже);
- Члены общественной экологической организации имели бы доступ к оперативной и достоверной информации об экологической ситуации вокруг тех предприятий, на которых расположены источники наиболее крупных вредных выбросов;
- В городе начало работать Бюро экологических жалоб и были бы определены службы, которые должны на них реагировать;
- В городе был бы создан фонд экологического спасения, который формировался бы на основе добровольных пожертвований бизнесовых структур. На средства фонда можно было бы оплачивать регулярные передачи экологического характера по радио и на телевидении, публикацию материалов в газетах и журналах, издание специальных книг и брошюр, проведение экологических информационных семинаров в учебных заведениях и на предприятиях, закупку контрольной аппаратуры для замера концентрации вредных веществ в окружающей среде и т.п.;
- Экологические организации имели бы свой сайт в Интернете, на котором размещалась бы информация об экологической ситуации в городе, о характере деятельности самой организации, рекомендации городским жителям о том, как ограничить загрязнение среды на бытовом уровне, информация о том, как организована экологическая деятельность в других странах и за рубежом;
- Можно было бы публиковать в СМИ информацию о предприятиях, нарушающих установленные нормы выбросов и наоборот, о предприятиях, уменьшающих вредное воздействие на окружающую среду;

- Получить доступ к правосудию по вопросам, касающимся проблем экологии;
- И, наконец, быть готовым к проведению массовых протестных акций в случаях, когда, к примеру, под видом привлечения иностранных инвестиций, на территории города, области, региона будут создаваться экологически вредные предприятия, будут завозиться из-за границы для захоронения вредные отходы или же в случаях, когда местные ответственные органы не будут принимать кардинальных мер по решению наболевших экологических проблем.

Диапазон возможных действий неправительственных экологических организаций значительно шире, чем тот, о котором здесь идет речь. Ну что же, нужно уже сейчас быть готовым к решительным действиям, которые помогли бы сохранить воздух наших городов чистым и безвредным для их обитателей.

Несмотря на то, что современные тенденции в деле защиты окружающей среды всё ещё нельзя считать позитивными, следует оставить место для надежды на более благоприятное течение событий. При каких же условиях такая тенденция может осуществиться? Следует надеяться, что непрерывный рост материального благосостояния людей будет дополнен повышением уровня общественного сознания. Под общественным сознанием в данном случае следует понимать уровень образования населения, уровень культуры и развития науки, а главное – уровень общественной морали. Только сообщество обладающее высоким уровнем общественного сознания может установить для себя разумное ограничение в объёме потребления материальных благ и расходования имеющихся природных ресурсов.

Ну что ж, если мы будем бдительными и целеустремлёнными, то результаты начнут сказываться уже в ближайшем будущем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамовский, Е.Р. Алгоритмы оперативного счета в процессах анализа воздушной среды на территории больших городов / Е.Р. Абрамовский, О.А. Загний // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. – 2007. – т.7. –С. 19 – 31.
2. Абрамовский, Е.Р. Анализ воздушных течений в уличных каньонах и глубоких оврагах, расположенных на городской территории. / Е.Р. Абрамовский, Е.В. Егоров, Н.Н. Лычагин. // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки, – 2007. – т.7. – С. 10 – 18.
3. Абрамовский, Е.Р. Анализ возникновения и распространения загрязняющих веществ диоксиновой группы и растительных полютантов в городской атмосферы: збірник наукових праць / Е.Р. Абрамовский // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. – 2010. – т 10. – С. 10 – 16.
4. Абрамовский, Е.Р. Анализ загрязнения воздушной среды городов веществами диоксиновой группы / Е.Р. Абрамовский, Ю.В. Сирык // Тези доп. IX Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції “Людина і космос”. – Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2010. – С. 267.
5. Абрамовский, Е.Р. Анализ распространения загрязняющей примеси от постоянно действующего точечного источника в атмосфере городских глубоких оврагов / Е.Р. Абрамовский, Е.В. Егоров, Н.Н. Лычагин // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: Механіка. 2007. Вип. 10, №3/1. – С. 144 – 152.
6. Абрамовский, Е.Р. Атмосфера больших городов / Е.Р. Абрамовский, Н.Н. Переметчик. - Дн-ск: Наука и образование, 2007. – 187 с.
7. Абрамовський, Є.Р. Методи розрахунку концентрації повітряних забруднень на міській території: Навч. Посібник / Є.Р. Абрамовський, Ю.Л. Гринчишин, Є.В. Єгоров, О.А. Загній. Д.: 2010. – 222 с.
8. Абрамовский, Е.Р. Аэрология объектов городской застройки в расчетах загрязнения воздушной среды / Е.Р. Абрамовский // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: Механіка. – 2010. – Вип.14, т.1. – С. 90 – 97.

9. Абрамовский, Е.Р. Исследование миграции биополютанов в воздушной среде города / Е.Р. Абрамовский, Е. И. Мунтян // Тези доп. IX Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції “Людина і космос”. – Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2010. – С. 257.
10. Абрамовский, Е.Р. Комбинированные функции и их применение в инженерной практике / Е.Р. Абрамовский // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. 2001. – т.3. – С. 123–130.
11. Абрамовский, Е.Р. Компьютерное моделирование загрязнения воздушной среды в процессе сжигания бытовых отходов / Е.Р. Абрамовский, ОА. Загний // Тез. докл. Міжнародної науково-технічної конференції пам'яті академіка НАН України В.І. Моссаковського. – Дніпропетровськ: ДНУ, 2007. – С.292 - 293.
12. Абрамовский, Е.Р. Компьютерный мониторинг комбинированного загрязнения городской атмосферы / Е.Р. Абрамовский // Тез. доп. регіональної наук. конф. "Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу". – Д.: ДНУ, 2010. – С. 173 – 174.
13. Абрамовский, Е.Р. Компьютерный мониторинг комбинированного загрязнения городской атмосферы / Е.Р. Абрамовский // Тез. доп. на III міжнародній науковій конференції «Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу». –Д.: 2010.– С. 173.
14. Абрамовский, Е.Р. Копьютерный анализ комплексного загрязнения воздушной среды техногенными и воздушными полютантами / Е.Р. Абрамовский, Ю.В. Бондаренко // Тези доп. IX Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції “Людина і космос”. – Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2007. – С. 252.
15. Абрамовский, Е.Р. Математическое моделирование городской подстилающей поверхности в расчетах распространения воздушных зегрязнений / Е.Р. Абрамовский, О.А. Зегний // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: Механіка. – 2009. – Вип.13, т.1. – С. 59 – 62.
16. Абрамовский, Е.Р. Метод локализации в расчетах загрязнения воздушной среды на территории больших городов / Е.Р.

Абрамовский // Вісник Дніпропетр. ун-ту, Серія: Механіка. – 2005. – Вип. 8, т.1. – С. 5 – 16.
17. Абрамовский, Е.Р. Методика оперативного расчета распространения вредных примесей в воздушной среде больших городов / Е.Р. Абрамовский, ОА. Загний // Тез. докл. XXII научн. конф. стран СНГ «Дисперсные системы». – Одесса: «Астропринт», 2006. – С. 19 – 20.
18. Абрамовский, Е.Р. Особенности расчета распространения газоаэроозольных загрязнений на городской территории, пересеченной глубокими оврагами / Е.Р. Абрамовский, Е.В. Егоров, Н.Н. Лычагин // Тез. докл. XXII научн. конф. стран СНГ «Дисперсные системы» – Одесса: «Астропринт», 2006. – С. 21 – 22.
19. Абрамовский, Е.Р. Приближенный метод расчета метеорологических полей и поля концентраций загрязняющей примеси в пограничном слое атмосферы / Е.Р. Абрамовский, Е.В. Егоров, А.В. Хаминич // Вісник Дніпропетр ун-ту, Серія: Механіка. – 2003. – Вип.7, т.1. – С. 73 – 83.
20. Абрамовский, Е.Р. Расчет загрязнения атмосферы в крупном городе от сложной сети автомагистралей / Е.Р. Абрамовский, Д.В. Рудаков // Вісник Дніпропетр. ун-ту, Серія: Механіка. – 2003. – Вип.7, т.1. – С. 83 – 90.
21. Абрамовский, Е.Р. Расчет и анализ распространения техногенных загрязнений в водной среде в окрестности больших городов / Е.Р. Абрамовский, А.В. Коляда, // Тез. доп. регіональної наук. конф. "Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу". – Д.: ДНУ, 2006. – С 134-135.
22. Абрамовский, Е.Р. Расчетный анализ особенностей распространения воздушных загрязнений на территории большого города /Е.Р. Абрамовский, В.В. Вакуленко, Е.И. Ульянова // Тези доп. IX Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції “Людина і космос”. – Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2007. – С. 253.
23. Адаменко, В.Н. Климат больших городов / В.Н. Адаменко. – Обнинск: 1975. – 69 с.
24. Адоньев, С.М. Пылегазовые выбросы предприятий черной металлургии: 2-е изд. исправ. и доп. / С.М. Андоньев, О.В. Филиппов. – М.: Металлургия, 1989. – 192 с.

25. Акименко, В.В. Математическое моделирование экологического состояния пограничного слоя атмосферы региона / В.В. Акименко. – Луганск: Изд-во Восточноукраинского государственного университета, 1988. – 192 с.
26. Анапольская, Л.Е. Об учёте особенностей ветрового режима при планировании городов / Л.Е.Анапольская // Тр. ГГО, 1963 – №149. С. 11 – 15.
27. Аравин, В.И. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде / В.И. Аравин, С.Н. Нумеров. – М.: 1953. – 616 с.
28. Ариэль, Н.З. Ветер в условиях города / Н.З. Ариэль, Л.А. Ключникова. // Тр. ГГО, 1960. – Вып. 94. – С. 29.
29. Аронин, Д.Э. Климат и архитектура / Д.Э. Аронин. – М.: Госстройиздат, 1959. – 251 с.
30. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / Под ред. Ф.Т.М. Ньюстадта, Х. Ван Дона. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 351с.
31. Бакалов, В.А. К вопросу о влиянии зелёных насаждений на очистку атмосферного воздуха от загрязнений промышленными выбросами / В.А. Бакалов // Вопросы географии Южного Урала. – Челябинск, 1972. – С. 107 – 117.
32. Безуглая, Э.Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов / Э.Ю.Безуглая. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 234 с.
33. Бейтмен, Г. Высшие трансцендентные функции. В 2-х т. т. 2 / Г. Бейтмен, А. Эрдейи. – М.: 1974. – 295 с.
34. Беклемышев, Н.Д. Поллинозы / Н.Д. Беклемышев, Р.К. Ермакова, В.С. Мошкевич. – М.: Медицина, 1985. – 240 с.
35. Белан, Б.Д. Исследование состояния воздуха больших городов с помощью мобильной станции / Б.Д. Белан, Г.А. Ивлев, Е.В.Покровский, А.В. Фофонов // Тез. докл. XXII научн. конф. стран СНГ «Дисперсные системы». Одесса: «Астропринт», 2006 . – С. 61.
36. Белов, И.А. Взаимодействие неравномерных потоков с преградами / И.А. Белов. – Л.: 1983. – 144 с.
37. Белоцерковский, С.М. Математическое моделирование плоскопараллельного отрывного обтекания тел / С.М. Белоцерковский, В.Н. Котовский, М.И. Ништ. – М.: 1988. – 232 с.

38. Белоцерковский, С.М. Моделирование отрывного обтекания цилиндра вблизи экрана / С.М. Белоцерковский, В.Н. Котовский, М.И. Ништ // ИФЖ. – 1986. – т.50, № 2. – С. 186.
39. Беляев, Н.Н Методы экспресс-расчета уровня загрязнения атмосферы: монография / Н.Н. Беляев, Е.Д. Коренюк, В.К. Хрущ. – Д.: Наука и образование, 2002. – 192 с.
40. Беляев, Н.Н. Компьютерное моделирование динамики движения и загрязнения подземных вод / Н.Н. Беляев, Е.Д. Коренюк, В.К. Хрущ. – Д.: Наука и образование, 2001. – 156 с.
41. Беляев, Н.Н. Прогнозирование качества воздушной среды методом вычислительного эксперимента / Н.Н. Беляев, Е.Д. Коренюк, В.К. Хрущ. – Д.: Наука и образование, 2000. – 208 с.
42. Беляев, Н.Н. Численный расчет распространения аэрозольных загрязнений: Учеб. Пособие / Н.Н. Беляев, В.К. Хрущ. – Д.: ДГУ. – 1990. – 80 с.
43. Берлянд, М.Е. Города и климат планеты / М.Е. Берлянд, К.Н. Кондратьев. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 40 с.
44. Берлянд, М.Е. О распространении атмосферных примесей в условиях города / М.Е. Берлянд // Метеорология и гидрология. – 1970. – №3. – С. 45 –57.
45. Берлянд, М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М.Е. Берлянд – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 273 с.
46. Берлянд, М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнение атмосферы / М.Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 448 с.
47. Боже-Гарнье, Ж. Очерки по географии городов. /Ж. Боже-Гарнье, Ж. Шабо. – М.: Прогресс, 1967. – 424 с.
48. Борисенко, М.М. Особенности ветрового режима в нижнем слое атмосферы над городом / М.М. Борисенко, М.В. Заварина // Тр. ГГО, 1971. – Вып. 283. – С.12 – 21.
49. Бретшнайдер, Б. Охрана воздушного бассейна: технология и контроль / Б. Бретшнайдер, Н. Курфюрст. – Л.: Химия, 1989. – 288 с.
50. Бруяцкий, Е.В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е.В. Бруяцкий. – К.: Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000.– 443 с.
51. Будыко, М.И. Тепловой баланс земной поверхности / М.И. Будыко. – Л.: 1956. – 472 с.

52. Бызова, Н. Л. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примесей / Н.Л. Бызова, Е.К. Гаргер, В.Н. Иванов. –Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 278 с.
53. Бызова, Н.Л. Рассеивание примесей в пограничном слое атмосферы / Н.Л.Бызова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1971. – 191 с.
54. Вагер, Б.Г. Пограничный слой атмосферы в условиях горизонтальной неоднородности / Б.Г. Вагер, Е.Д. Надежина. – Л.: 1979. – 136 с.
55. Васильева, Л.Г. Приземная инверсия температуры воздуха в разных районах СССР / Л.Г. Васильева, Т.А. Голубова // Тр. ГГО, 1970. – Вып. 264. – С. 3 – 22.
56. Ветошкин, А.Г. Процессы и аппараты защиты атмосферы: учебное пособие / А.Г. Ветошкин. – Пенза, 2004. – 302 с.
57. Владимиров, А.М. Охрана окружающей среды / А.М. Владимиров, Ю.И. Ляхин, Л.Т. Матвеев, В.Г. Орлов; под ред. М.Е. Берлянда. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 424 с.
58. Влияние человека на глобальные климатические условия / Пер. с англ. Б.Е. Шнеерова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 84 с. с ил.
59. Вопросы турбулентной диффузии в приземном слое атмосферы // Тр. Ленинград. гидрометеоролог. Ин-та. – 1963 Вып. 15. – 240 с.
60. Вредные вещества в промышленности: Органические вещества: Новые данные 1974 по 1984 г.: Справочник / Под общей ред. Э.Н. Левиной и И.Д.Гадаскиной. – Л.: Химия, 1985. – 464 с.
61. Временные методические указания по определению фоновых концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе для нормирования выбросов. – М.: Гидрометеоиздат,1981. – 40 с.
62. Галушкина, Т.П. Экономические инструменты экологического менеджмента (теория и практика) / Т.П. Галушкина. – Одесса: Институт проблем рынка и экономико-экологических исследований НАН Украины, 2000 – 280 с.
63. Гоман, О. Г. Численное моделирование осесимметричных отрывных течений несжимаемой жидкости / О.Г. Гоман, В.И. Карплюк, М.И. Ништ. – М.: 1993. – 288 с.

64. Горб, А.С. Клімат Дніпропетровської області / А.С. Горб, Н.М. Дух. – Д.: Вид. ДНУ, 2006. –203 с.
65. Гринчишин, Ю.Л. Экспериментальные исследования аэрологии городских объектов в задачах распространения воздушных загрязнений / Ю.Л. Гринчишин // Тез. доп. на III міжнародній науковій конференції «Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу». –Д.: 2010.– С. 176.
66. Грицан, Н.П. Экологические основы природопользования / Н.П. Грицан, Н.В. Шпак, Г.Г. Шматков, А.Г. Шапарь и др.; под ред. И.П. Грицан. – Дн-ск: ИППЭ НАН Украины, 1998. – 409 с.
67. Девнин, С.И. Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций: Справочник / С.И. Девнин - Л.: Судостроение, 1983. – 320 с.
68. Денисов, П.П. К вопросу о влиянии водоёмов на температуру воздуха прилегающих территорий / П.П. Денисов. // Динамика и термика рек. – М.: Стройиздат, 1973. – С. 54 – 56.
69. Деркачев, Э.А. Качество жизни населения. Актуальные эколого-гигиенические проблемы охраны окружающей среды и здоровья населения Приднепровья: состояние, прогноз и пути решения / Э.А. Деркачев, А.П. Штепа // Экополис, 2004. №1(13), – С. 23 – 27.
70. Дмитриев, А.А. Некоторые соображения о влиянии большого города типа Москвы на коэффициент турбулентности в нижней тропосфере / А.А Дмитриев // Климат большого города. – М.: изд-во МГУ, 1965. – С. 136 – 151.
71. Дубинский, Г.П. Климат города Харькова / Г.П. Дубинский, А.Д. Бабич, А.И. Лобошникова // Материалы харьковского отделения географического общества Украины, 1971. – Вып. 8. – С. 88 – 90.
72. Егоров, Е.В. Исследование процесса распространения воздушных загрязнений на городской территории, пересеченной глубокими оврагами // Тези. доп. регіональної наук. конф. "Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу". – Д.: ДНУ, 2006. – С. 133 – 134.
73. Егоров, Е.В. Метод расчета распространения загрязняющих примесей в атмосфере городского лабиринта / Е.В. Егоров // Тез. доп. на III міжнародній науковій конференції

«Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу». –Д.: 2010.– С. 177.
74. Егоров, Е.В. Об одном приближенном методе расчета метеорологических полей и поля концентрации загрязняющей примеси в атмосфере / Е.В. Егоров, А.В. Хаминич // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: Механіка. – 2004. – Вип.8, т.1. – С. 76 – 89.
75. Егоров, Е.В. Расчет распространения загрязнений примесей в атмосфере городского лабиринта / Е.В. Егоров, Н.Н. Лычагин // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: Механіка. – 2011. – Вип.15, т.1. – С. 53 – 62.
76. Егоров, Е.В. Фильтрационная модель распространения загрязняющих примесей в атмосфере городских лабиринтов / Е.В. Егоров, Н.Н. Лычагин // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: Механіка. – 2010. – Вип.14, т.1. – С. 143 – 152.
77. Егоров, Е.В. Фильтрационная модель расчета распространения загрязняющих примесей в атмосфере городского лабиринта // Тези. доп. регіональної наук. конф. "Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу". – Д.: ДНУ, 2008. – С. 164 – 165.
78. Елманов, В.И. Охрана атмосферного воздуха / В.И. Елманов, Г.Г. Терновая. – М.: Юрид. лит., 1984. – 112 с.
79. Заварина, М.В. О влиянии города на ветровой режим нижних слоёв атмосферы / М.В. Заварина, М.М. Борисенко // Материалы конференции «Климат-город-человек». – М.: 1974. – С. 149 – 150.
80. Загний, О.А. Математические модели в анализе процессов распространения пылевых выбросов на городской территории / О.А. Загний // Тези доп. IX Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції “Людина і космос”. – Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2007. – С. 251.
81. Загний, О.А. Некоторые особенности расчета распространения атмосферных загрязнений на территории больших городов / О.А. Загний // Тези. доп. регіональної наук. конф. "Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу". – Д.: ДНУ, 2006. – С. 130 – 131.
82. Задорский, В.Г. Разрешение экологических проблем города в условиях рынка / В.Г. Задорский // Бизнес и политика:

украинское информационное аналитическое издание. –2000. – № 2,3.
83. Защита атмосферы от промышленных загрязнений: Справочник. – М.: Металлургия, 1988. – 530 с.
84. Згуровский, М.З. Численное моделирование распространения загрязнений в окружающей среде / М.З. Згуровский, В.В. Скопецкий, В.К. Хрущ, Н.Н. Беляев. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.
85. Иванова, О.А. Современные принципы озеленения городов / О.А. Иванова. – М.: 1960. – 254 с.
86. Израэль, Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю.А. Израэль. – М.: Гидрометеоиздат, 1984. – 560 с.
87. Климат большого города (на примере Москвы). М., изд-во МГУ, 1965.
88. Климат Москвы (особенности климата большого города). (Под ред. А.А. Дмитриева, Н.П. Бессонова). Л., Гидрометеоиздат, 1969, с. 324.
89. Коляда, А.В. Численное моделирование поля течения воздушных масс в глубоких карьерах /А.В. Коляда, Н.Н. Лычагин // Тези. доп. регіональної наук. конф. "Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу". – Д.: ДНУ, 2006. – С. 131 – 132.
90. Кондратьев, К.Я. Актинометрия / К.Я. Кондратьев. – Л.: 1965. – 691 с.
91. Кораблева, А.И. Антропогенные проблемы экологии: метод. пособие. / А.И. Кораблева, А.Г. Шапар, Л.В. Гербанский и др. – Д.: Наукова книга, 1997. – С. 20.
92. Кратцер, П.А. Климат города / П.А. Кратцер. – М.: Иностранная литература. – 1958. – 239 с.
93. Левенко, А.С. Экология мегаполиса. Экологические аспекты промышленного развития Днепропетровска / А.С. Левенко, В.П. Колотенко, Н.Н. Переметчик; под общей редакцией городского головы города Днепропетровска И.И. Куличенко. – Днепропетровск, 2001. – 268 с.
94. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1970. – 904с.

95. Маккормик, Р.А. Метеорология и загрязнение воздуха в городах / Р.А. Маккормик // Бюллетень ВМО, 1988. – Вып. 8,т.18,№3. – 341 с.
96. Марчук, Г.И. Математические модели в геофизической гидродинамике и численные методы их реализации / Г.И. Марчук, В.П. Дымников, В.Б. Залесный. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987. – 296 с.
97. Марчук, Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г.И. Марчук. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
98. Марчук, Г.И. Численное решение задач динамики атмосферы и океана / Г.И. Марчук. – Л.: Гидромеитеоиздат, 1974. – 303 с.
99. Мезингер, Р.Ф. Численные методы, используемые в атмосферных моделях / Р.Ф. Мезингер, А. Аракава. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979. –136 с.
100. Мельников, Б.И. Экологические аспекты диоксинового загрязнения биосферы / Б.И. Мельников, В.М. Набивач, Р.В. Смотраев, О.В. Кожура // Екологія та ноосферологія, 2008. – Т. 19. – №3-4. – С. 108.
101. Методика расчета концентрации в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. – М–Л.: Гидрометеоиздат,1987. – 93 с.
102. Монин, А.С. Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы / А.С. Монин, А.М. Обухов // Тр. геофиз. Ин-та СССР – 1954. – №2 (151). – С. 163 – 187.
103. Монин, А.С. Статистическая гидромеханика. Теория турбулентности / А.С. Монин, А.М. Яглом. – С.-П.: Гидрометеоиздат, 1992. – 694 с.
104. Мур, Дж.В. Тяжелые металлы в природных водах / Дж.В. Мур, С. Рамамурти. – М.: Мир, 1987 – С. 22.
105. Нормализация атмосферы глубоких карьеров / Под ред. Н.З. Бишколова, В.В. Пененко. – Л.: Наука, 1986. – 295 с.
106. Нутерман, Р.Б. Моделирование загрязнения воздуха в уличном каньоне / Р.Б. Нутерман, А.В. Старченко // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – 18, №8. – С. 649 – 657.
107. Пененко, В.В. Модели и методы для задач охраны окружающей среды / В.В. Пененко, А.Е. Алоян. – Н.: Наука, 1985. – 257 с.

108. Переметчик, Н.Н. Стратегия работы управления по экологии Днепропетровского горсовета / Н.Н.Переметчик // Экополис №1. – Дн-ск.: ООО ПКФ “Арт-пресс”. –2004. – С. 1 – 16.
109. Петросян, Л.А. Введение в метеорологическую экологию / Л.А. Петросян, В.В. Захаров. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 224 с.
110. План региональной экологической политики в Днепропетровской области // А.П. Бабий, Н.П. Грицан – Днепропетровское агентство устойчивого развития Украины, А. ВанБергейк, Р. Кляйнианс, К. Петерс, Е. ВандерСток –Ameco, Экологические услуги, Голландия. – 2001. – 158 с.
111. Примак, А.В. Ключи к чистому воздуху / А.В. Примак, А.Н. Щербань. – К.: Наукова думка, 1998. – 128 с.
112. Прох, Л.З. К вопросу о прозрачности атмосферы в Киеве / Л.З. Прох // Метеорология и гидрология, 1960. – №12. – С. 234.
113. Раумер, Ю.Л. Тепловой баланс города и влияние городского озеленения на температурный режим / Ю.Л. Раунер, М.М. Чернавская // Изв. АН СССР, серия география, 1972. – Т.5. – с. 46 – 53.
114. Ревелль, П. Среда нашего обитания: В 4-х книгах. Книга 2-я: Загрязнение воды и воздуха / П. Ревелль, Ч. Ревелль.– М.: Мир, 1996. – 296 с.
115. Реттер, Э.И. Архитектурно-строительная аэродинамика / Э.И. Реттер. – М.: 1984. – 294 с.
116. Реттер, Э.И. Аэродинамика зданий / Э.И. Реттер, С.И. Стриженов. – М.: Стойиздат, 1968. – 240с.
117. Руководство по контролю загрязнения атмосферы / Под ред. М.Е. Берлянда, Г.И. Сидоренко. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979. – 442 с.
118. Русакова, Т. И. Задача численного расчета обтекания зданий воздушным потоком. /Т.И. Русакова, В.И.Карплюк. //Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: Механіка. – 2007. – Вип.10, № 3/1. – С. 51 – 57.
119. Русакова, Т. И. Численное исследование структуры вихревого потока около высотных сооружений / Т.И. Русакова, В.И. Карплюк // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: Механіка. – 2006. – Вип. 10, т.1. – С. 82 – 89.

120. Русакова, Т.И. Исследование динамики воздушного потока около зданий / Т.И. Русакова, В.И. Карплюк // Тези доп. IX Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції “Людина і космос”. – Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2007. – С. 265.
121. Русакова, Т.И. Расчет вихревых структур и поля скоростей при отрывном обтекании тонкого профиля / Т.И. Русакова // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: Механіка. – 2009. – Вип.13, т.1. – С. 63 – 70.
122. Русакова, Т.И. Численное исследование влияния циркуляции свободных вихрей на нестационарные аэродинамические характеристики цилиндра / Т.И. Русакова // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: Механіка. – 2002. – Вип.6, т.1. – С. 81 – 87.
123. Русакова, Т.И. Численное исследование влияния циркуляции свободных вихрей на нестационарные аэродинамические характеристики цилиндров при нестационарном отрывном обтекании / Т.И. Русакова, В.И. Карплюк // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: Механіка. – 2005. – Вип.9, т.1. – С. 81 – 87.
124. Русакова, Т.И. Численный расчет вихревых структур при отрывном обтекании / Т.И. Русакова // Тези доп. XI Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції “Людина і космос”. – Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2009. – С. 301.
125. Савицкий, В.Д. Экология и распространение пыльцы алергенных растений в Украине / В.Д. Савицкий, Е.В. Савицкая // Астма та алергія. – 202. – № 2. – С. 202.
126. Серебровский, Ф.Д. Аэрация жилой застройки / Ф.Д. Серебровский - М.: Издат. лит-ры по строит., 1973. – 121 с.
127. Скорер, Р.С. Аэрогидродинамика окружающей среды / Р.С. Скорер. – М.: Мир, 1980. – 550 с.
128. Тищенко, А.А. Охрана атмосферного воздуха. Расчет содержания вредных веществ и их распределение в воздухе: Справочное издание / А.А. Тищенко. – М.: Химия, 1991. – 368 с.
129. Уорк, К. Загрязнение воздуха. Источники и контроль / К. Уорк, С. Уорнер. – М.: Мир, 1980. – 539 с.
130. Устойчивый Крым. Энергетическая стратегия в 21 веке. – Симферополь: Экология и мир.– 2001. – 400 с.

131. Ушаков, К.З. Аэрология карьеров / К.З. Ушаков, В.А. Михайлов. – М.: Надра, 1975. – 245 с.
132. Фельдман, Ю.Г. К вопросу о защите воздушного бассейна городов от загрязнения / Ю.Г. Фельдман // Исследования по микроклимату и шумовому режиму населённых мест; 1965. – С. 117 – 124.
133. Флетчер, К. Численные методы на основе метода Галеркина / К. Флетчер. – М.: 1988. – 352 с.
134. Химия тяжелых металлов, мышьяка и молибдена в почвах / Н.Г. Нодред, Л.К. Зырина, М. Садовников. – М.: изд. МГУ, 1985. – 225 с.
135. Хрущ, В.К. Математическое моделирование рассеивания загрязняющих веществ в природных сферах / В.К. Хрущ // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Серія: Механіка. –1998. – Вип.1, т. 1. – С. 53 – 53.
136. Чайка, Е.Н. Водоснабжение города Днепропетровска / Е.Н. Чайка // Экополис, 2004. – №1(13). – С. 28 – 36.
137. Человек и среда (экология города). Библиографический указатель отечественных и иностранных информационных материалов 1967-1971гг. – М., 1972. – 137 с.
138. Чернобаев, И.П. Химия окружающей среды: учеб. пособие / И.П. Чернобаев. – К.: Высш. шк., 1990. – 191 с.
139. Чесанов, Л.Г. Проблемы урбоэкологии / Л.Г. Чесалов, А.Г. Шапарь, Л.И. Кораблева и др. –Дн-ск: Поліграфіст, 2001. – 187 с.
140. Численные методы, используемые в атмосферных моделях / Пер. с англ.–Л.: Гидрометеоиздат, 1982. – 360 с.
141. Шварц, К.Г. Моделирование мезомасштабных атмосферных процессов над большим городом / К.Г. Шварц, В.А. Шкляев // Метеорология и гидрология. – 1994. – №9. – С. 29 – 38.
142. Щербань, М.И. Основные проблемы изучения местного климата крупных городов Украины / М.И. Щербань. – М.: Недра, 1966. – С. 114 – 118.
143. Юдин, М.Й. Стационарная модель распределения ветра с высотой в турбулентной атмосфере / М.Й. Юдин, М.Е. Швец // Тр. ГГО. – 1940. – Вып. 31. – С.42–52.
144. Хрущ, В.К. Численный расчет течений вязкой теплопроводной жидкости на основе попеременного-треугольой схемы

/ В.К. Хрущ // Математические методы тепломассапереноса. – Д.: ДНУ, 1987. – С. 62 – 70.
145. Антошкіна, Л.І. Стан довкілля: моделі та прогноз: Монографія / Л.І. Антошкіна, М.М. Біляєв, Є.Д. Коренюк, В.К. Хрущ. – Д.: Наука і освіта, 2003. – 328 с.
146. Барабаш, М.Б. Екологічні проблеми України / М.Б. Барабаш. – К.: Абрис, 1989. – 211 с.
147. Бейко, І.В. Комплекс програм та інформаційна система для розв'язання задач охорони екологічного середовища / І.В. Бейко, П.М. Зінько, В.В. Лукович // Планирование экологического развития регионов с учетом их экологической безопасности. – Киев: Знание.– С. 10.
148. Вольвач, Ф.В. Стійкий екологічно безпечний розвиток і Україна: навч. посібник / Ф.В. Вольвач, М.І. Дробиход, В.Г. Дюканов та ін.; за ред. М.І. Дробихода. – К.: МАУП, 2002. – 104 с.
149. Гоман, О.Г. Чисельне моделювання аерологічної ситуації навколо споруд та промислових об'єктів / О.Г. Гоман, В.І. Карплюк // Диференціальні рівняння та їх застосування. – Д.: ДНУ, 2003. – С. 102 – 113.
150. Давидсон, В.Е. Вступ до гідродинаміки / В.Е. Давидсон. – Д.: 2004. – 216 с.
151. Данилов, В.Я. Автоматизована картографічна система для моніторингу екологічного стану України / В.Я. Данилов, В.Д. Барановский // Планирование экономического развития регионов с учетом их экологической безопасности. – Киев: Знание, 1994. – С. 18.
152. Єгоров, Є.В. Аналіз розповсюдження забруднюючих домішок від точкових джерел миттєвої дії в атмосфері міських глибоких балок / Є.В. Єгоров, Н.Н. Личагін // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія Механіка. – 2008. – Вип. 11, т.1. – С. 12 – 19.
153. Загній О.А. Моделювання міської поверхневої структури у розрахунках комбінованого забруднення атмосфери / О.А. Загній // Тези доп. XI Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції "Людина і космос". – Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2009. – С. 279.
154. Загній, О.А. Комп'ютерний аналіз комбінованого забруднення міської атмосфери техногенними та рослинними полютантами / О.А. Загній // Тези. доп. регіональної наук. конф.

"Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу". – Д.: ДНУ, 2008. – С. 162 – 163.
155. Загній, О.А. Моделювання міської поверхневої структури у розрахунках комбінованого забруднення атмосфери / О.А. Загній // Тези доп. XI Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції “Людина і космос”. – Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2009. – С. 280.
156. Залеський, І.І. Екологія людини: Підручник / І.І. Залеський, М.О. Клименко. – К.: Видавничий центр “Академія”, 2005. – 288 с.
157. Заржицький, О.С. Правові аспекти регіональної екологічної політики / О.С. Заржинський. – Дн-ськ: Наука і освіта, 2003. – 160 с.
158. Зеленська, А.Є. Екологічний атлас Дніпропетровської області / А.Е. Зеленська, А. Горб, К. Горб, А. Кримцов та ін.: – Київ – Дніпропетровськ: ДДУ, Мара ЛТД, 1995. – 25 с.
159. Киричек, І.Є. Діалогова система ідентифікації і моделювання екологічних процесів / І.Є. Киричек, В.М. Крячок, М.П. Лепеха // Планирование экономического развития регионов с учетом их экологической безопасности. – Киев: Знание. – 1994. – С. 24.
160. Кисельов, М.М. Національне буття серед екологічних реалій / М.М. Кисельов, Ф.М. Канак. – К.: Тандем, 2000. – 184 с.
161. Клименко, М.О. Метеорологія, стандартизація і сертифікацація в екології: Підручник / М.О. Клименко, П.М. Скрипчук. – К.: Видавничий центр “Академія”, 2006. – 368 с.
162. Кожушко, Л.Ф. Екологічний менеджмент: Підручник / Л.Ф. Кожушко, П.М. Скрипчук. – К.: ВЦ “Академія”, 2007. – 432 с.
163. Лаврик, В.І. Методи математичного моделювання в екології. Навч. посіб. для ВУЗів / В.І. Лаврик – К.: Вид. дім “КМ Академія”, 2002. – 203 с.
164. Литвин, В.М. Україна: досвід та проблеми державотворення. 90-ті роки 20-го ст. / В.М. Литвин. – К.: Наукова думка, 2001. – 559 с.
165. Мельник, Л.Г. Екологічна економіка: Підручник / Л.Г. Мельник. – Суми: ВТД “Університетська книга”, 2002. – 346 с.

166. Павлов, В.О. Екологічний паспорт міста Дніпропетровська. (Управління екології Дніпропетровської міськради) / В.О. Павлов, М.М. Переметчик, В.П. Колотенков, Б.Е. Шевченко. – Д.: УкОІМА-прес, 2000. – 112 с.
167. Переметчик, М.М. Стан екологічної безпеки в місті Дніпропетровську / М.М. Переметчик // Экополис. – 2000 №1(11). 2003 №1(12). – С. 9 – 29.
168. Регіональний план дій з охорони навколишнього середовища. Дніпропетровська облдержадміністрація / Головне управління економіки. Державне управління екобезпеки. Інститут проблем природокористування та екології НАН України. – Дн-ськ, 1999. – 28 с.
169. Тарасова, В.В. Екологічна стандартизація і нормування антропогенного навантаження на природне середовище / В.В. Тарасова, А.С. Малиновський, М.Ф. Рибак; під заг. ред. професора В.В. Тарасової. – К.: Центр учбової літератури, 2007. – 267 с.
170. Хилько, М. Екологічна політика / М.Хилько. – К.: Абрис, 1999. – 337 с.
171. Чернюк Л.Г. Економіка та розвиток регіонів (областей) України. Навчальний посібник. –К.: ЦУЛ, 2002. – 644с.
172. Шапар, А.Г. Критерії та показники сталого розвитку: наукові підходи до їх обгрунтування / А.Г. Шапар. – Д.: Зб. Наук. пр. Ін-ту проблем природокористування та екології НАН України. – 2000. – Вип. 2. – С. 175.
173. Щокін, Г.В. Україна на зламі тисячоліть: історичний екскурс, проблеми, тенденції та перспективи / Г.В. Щокін, М.В. Попович, М.С. Кармазіна та ін., за заг. ред. Г.В. Щокіна, М.Ф. Головатого. – К.: МАУП, 2000. – 231 с.
174. Adolphe, L. (2001) A simplified model of urban morphology: application to an analysis of environmental performance of cities, Environment and Planning B: Planning and Design 28, 183-200.
175. Allwine, K.J., Shinn, J.H., Streit, G.E., Clawson, K.L., and Brown, M. (2002) Overview of Urban 2000: a multiscale field study dispersion through an urban environment, Bull. Am. Meteorol. Soc. 83, 521-536.
176. Baklanov, A., Burman, J., and Naslund, E. (1997) Numerical modelling of three-dimensional flow and pollution transport over

complex terrain, PHOENICS Journal of Computational Fluid Dynamics 10(1), 57-86.
177. Baklanov, A., Mestayer, P., Clappier, A., Zilitinkevich, S., Joffre, S., Mahura., and Nielsen, N. W. (2005) On parameterizations of urban atmosphere sublayer in meteorological models, Atmospheric Chemistry and Physics Discuss. 5, 12119-12176.
178. Belayev N.N., Kazakevitch M.I., Khrutch V.K. Computer simulation of the pollutant dispertion among buildings // Wind Engineering into 21st Century. Proceedings of the Tenth International Conference on Wind engineering. Copenhagen/ Denmark/ A.A. BAKEMA/ ROTTERDAM/ BROOKFIELD.– 1999. P. 1217–1220
179. Belcher, S. E., Jerram, N., and Hunt, J.C.R. (2003) Adjustment of a turbulent boundary layer to a canopy of roughness elements, J. Fluid Mech. 488, 369-398.
180. Berkowicz, R., Hertel, O., Sorensen, N.N., and Michelsen, J.A. (1997) Modelling Air Pollution from Traffic in Urban Areas, In Proceedings from IMA meeting on Flow and Dispersion Through Obstacles, Cambridge, England, 2-30 March, 1994, eds. R.J. Perkins and S.E. Belcher, 121-142.
181. Berry M.A. Protecting the built environment – cleaning for health. – 2011, 193 p. http://www.BrahatBhasha.com
182. Bottema, M. (1997) Urban roughness modeling in relation to pollutant dispersion, Atmos. Env. 31, 3059-3075.
183. Bottema, M., and Mestayer, P.G. (1998) Urban roughness mapping-validation techniques and some first results, J. Wind Engineering Industrial Aerodynamics, 74-76, 163-173.
184. Britter, R.E., and Hanna, S.R. (2003) Flow and dispersion in urban areas, Ann. Rev. Fluid Mech. 35, 469-496.
185. C. Michail Hogan. Heavy metals. Encyclopedia of Earth National Conncile for Science and the Environment, Cleveland. Washington DC, 2010.
186. Calder, K.L. On Estimating Air Pollution Concentrations for a Highway in an Oblique Wind. Journal Atmos. Environ., 1973, №7, P. 863-868.
187. Cermak, J.E. (1995) Physical Modelling of Flow and Dispersion over Urban Areas, Wind Climate in Cities, (J.E. Cermak et al., ads.), Kluwer Academic Publishers, 383-404.

188. Chandler T.J. 1967.b). London's Heat Island. – Biometeorology, vol. 2, Part. 2, Pergamon Press.
189. Chang, C.H. and Meroney, R.N. (2003) Concentrations Distributions from Point Source Within Urban Street Canyons: Wind Tunnel and Computational Data, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol. 91, No. 9, 1141-1154.
190. Cheng, H. and Castro, I. (2002) Near wall flow over urban-like roughness, Boundary-Layer Met. 104, 229-259.
191. Eames, I., Hunt, J.C.R., and Belcher, S.E. (2003) Lagrangian and Eulerian properties of steady flows through groups of obstacles, Journal of Fluid Mechanics, [Summary version in ERCOFTAC Bulletin No. 56].
192. ERA Dioxin Redesessment Summary 4/94 – vol. 1, p.37.
193. Gayev, Ye.A. (1993) Effect of Easily Penetrable Roughness on the hydrodynamics of laminar flow, Fluid Mech. – Soviet Research. v. 19, N 3, 1-12.
194. Grimmond, C.S.B., and Oke, T.R. (1999) Heat storage in urban areas Local scale observations and evaluation of a simple model, Appl. Meteor. 38(9), 1262-1292.
195. Hardbreaves D.M., Baker C.I. Gaussian puff model of an urban street canyon// Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 69-71. 1977, P. 927-939.
196. Huber Alan H. Perfomance of a Gaussian model for center-line concentrationin the wake of buildings// Atmos. Envion. B.– 1988.–6.–P.1039-1050.
197. Hunt, J.C.R., Grinchenko, V.T., and Gayev, Environ.A. (2004) NATO Advanced Study Institute # PST.ASI.980064, Kyiv, Institute of Hydromachanics NASU, May 4-15, 2004.
198. Hunt, J.C.R., Tampieri, F., Weng, W.S., and Carruthers, D.J. (1991) Air flow and turbulence over complex terrain: a colloquium and a computational workshop, J. Fluid Mech. 227, 667-668.
199. Jerram, N., Perkins, R.J., Fung, J.C.H., Davidson, M.J., Belcher, S.E., and Hunt, J.C.R. (1993) Atmospheric flow through groups of buildings and dispersion from localized sources, in Wind Climate in Cities, NATO Advanced Study Institute, Karlsruhe, July 1993.
200. John H. Duffus. Heavy metals – a meaningless term (IUPAC Technical Report). Pnre and applied chemistry, 2003, vol. 74. pp 793-807.

201. Kalinovich N., Povlyshyn S. Airborn pollen in Lviv // Second Symposium on aeroloigy. – Viemia, 2000.
202. Kono H., Kusunoki K. 3-D Stream and Vortexes in an Urban Canopy Layer and Transport of Motor Vehicle Exhaust Gas-Wind Tunnel Experiment / Proceedings of the 9th Int. Conf. on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 2004, P. 70 – 74.
203. Masunaga, S., Yao,Y., Takada, H., Sakurai, T., Nakanishi, J. Sources apportioning of dioxin pollution recorded in Tokio Bay sediment core based on congener compositin, Geochemistry 35(4), 2001.
204. Mazzeo N.A., Venegas L.E. Evaluation of Turbulence from Traffic Using Experimental Data Obtained in a Street Canyon . / Proceedings of the 9th Int. Conf. on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 2004, P. 95 – 99.
205. Moussinopoulos N., Ossanlis I., Barmpas P. A Study of Heat Transfer Effects on Air Pollution Dispersion in Street Canyons by Numerical Simulations/ Proceedings of the 9th Int. Conf. on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 2004, P. 119–123.
206. Pavlos A. Kassomenos, Spiros P. Karakitsios and Geoegios A. Pilids. A simple semi-empirical approach to modelling benzene concentrations in a street canyon Atmospheric Environment Volume 38.– Issue 35.– November 2004.– Pages 6073-6078.
207. Saathoff P., StathopoulosT., Xuan W., Lazurel. Dispersion of pollutants around buildings. – Are current models adequate. Wind engineering into 21st Century. Larsen, Larose & Liversi. Balkena, Rotterdam. –1999. P. 395 – 405.
208. Shideki Masunaga Dioxin pollution in Japan: History and future. Jokonoma National Universitety, Yokohoma, Japan, 240 – 8501.
209. Simiu, E. Wind effects on structures / E. Simiu, R.H. Scanlan. - New Jork: A Wiley- Interscience Publication JOHN WILEY & SONS, 1986. – 589 p.
210. Spicksma F. Polinosis in Europe. New observations and developments N. Review of palcobotany and polinology, vol. 64. № 1-4, 1990. – p.35 – 40.

211. Worldhealht Organization. Indoor Air Pollution and Health. http://www.who.intrmediacentre/factsheets/fs 292/en.
212. WWW.UKRSTAT.GOV.UA – (2011).
213. Yoshida, K., Hakanishi, J. Estimation of dioxin in Japan by mathematical models, Proc. Of 4-th international workshop on risk evaluation and management of chemicals, Yokohama, 2001, pp. 55-76.

Абрамовский Евгений Романович
Карплюк Владимир Иванович
Переметчик Николай Николаевич

Атмосфера больших городов

Научное издание

Книга издается в авторской редакции
Сдано в печать 28.12.11 Подписано к печати
Формат 60×84 1/16. Вид печати – ризограф
Условн. печ. лист. 21,21 Тираж 300 экз

Издательство «Наука і освіта»
Свидетельство о внесении в Госреестр ДК №919 от 21.05.2002
г. Днепропетровск, ул Бердянская, 61 б
тел. (056)370-13-13, (0562) 35-78-19, 34-29-61