



*Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования*

**«МОСКОВСКИЙ  
АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)»**

**С. В. Шелмаков, Ю.В. Трофименко, А.В. Лобиков**

**Борьба с загрязнением атмосферы  
дисперсными частицами на автомобильном  
транспорте**

Учебное пособие

Москва, 2018

УДК 504.61:621.43.068  
ББК 20.18  
Ш444

*Рецензенты:*

зав. кафедрой «Автомобили» МАДИ, д-р техн. наук, проф. *Иванов А.М.*;  
зав. отделом теории рабочих процессов и имитационного  
моделирования энергетических установок  
ФГУП «НАМИ», д-р техн. наук *Козлов А.В.*

**Шелмаков, С.В.**

Ш444 Борьба с загрязнением атмосферы дисперсными частицами на автомобильном транспорте: учеб. пособие / С.В. Шелмаков, Ю.В. Трофименко, А.В. Лобиков. – М.: МАДИ, 2018. – 191 с.: ил.

В учебном пособии представлена развёрнутая информация о загрязнении атмосферы дисперсными частицами, об их влиянии на состояние окружающей среды и здоровье населения, об источниках их образования, в том числе на автомобильном транспорте. Подробно рассмотрены вопросы мониторинга дисперсных частиц, методы измерения их содержания в атмосфере и отработавших газах автомобилей, пути и методы сокращения их выбросов на автомобильном транспорте.

Учебное пособие предназначено для студентов автотранспортного (23.05.01 - Наземные транспортно-технологические средства, 23.03.03 - Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов) направления подготовки, для преподавателей и специалистов, занимающихся вопросами транспортной экологии.

УДК 504.61:621.43.068  
ББК 20.18

© МАДИ, 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	6
Определения.....	7
Обозначения и сокращения .....	18
<b>Введение</b> .....	20
<b>1. Природные и антропогенные источники дисперсных частиц и их характеристики</b> .....	21
1.1. Классификация дисперсных частиц .....	21
1.2. Основные источники природных и антропогенных выбросов дисперсных частиц и их массовый баланс.....	27
1.3. Структура выбросов ДЧ по секторам экономики .....	30
1.4. Гранулометрический и химический состав дисперсных частиц ...	36
1.4.1. Гранулометрический состав ДЧ и его характеристики .....	36
1.4.2. Химический состав типичных атмосферных ДЧ .....	42
1.5. Частицы «черного углерода» в составе ДЧ. Их влияние на изменение климата.....	44
1.5.1. Непосредственное воздействие ДЧ на климатическую систему Земли .....	45
1.5.2. Косвенное воздействие ДЧ на климатическую систему .....	51
1.6. Характеристики поведения ДЧ в атмосфере. Время жизни в атмосфере .....	51
1.6.1. Образование нанодисперсной («зародышевой») фракции ДЧ в атмосфере.....	51
1.6.2. Образование мелкодисперсной («накопительной») фракции ДЧ в атмосфере.....	53
1.6.3. Процессы переноса ДЧ в атмосфере и описывающие их математические модели .....	53
1.6.4. Процессы удаления ДЧ из атмосферы.....	56
1.7. Характеристика автотранспорта как источника ДЧ .....	57
1.7.1. Состав и физико-химические свойства ДЧ в ОГ ДВС.....	57
1.7.2. Состав и физико-химические свойства ДЧ от износа автомобильных шин .....	68
1.7.3. Состав и физико-химические свойства ДЧ от износа тормозных механизмов АТС .....	72

1.7.4. Состав и физико-химические свойства ДЧ от износа дорожного покрытия .....	75
<b>Контрольные вопросы</b> .....	80
<b>2. Санитарно-гигиеническая оценка воздействий ДЧ на здоровье населения, риски различных заболеваний</b> .....	83
2.1. Виды воздействия ДЧ на здоровье населения .....	83
2.1.1. Прямое воздействие ДЧ на здоровье населения.....	83
2.1.2. Косвенное воздействие ДЧ на здоровье населения .....	105
2.2. Нормирование содержания ДЧ в атмосферном воздухе .....	109
2.3. Оценка рисков заболеваемости населения при наблюдаемых уровнях ДЧ .....	110
<b>Контрольные вопросы</b> .....	115
<b>3. Методы отбора проб и измерений содержания дисперсных частиц в ОГ и атмосфере</b> .....	117
3.1. Общие принципы .....	117
3.2. Методы гранулометрического анализа ДЧ .....	117
3.2.1. Методы гранулометрического анализа ДЧ в потоке газа .....	121
3.2.2. Методы гранулометрического анализа ДЧ на фильтрах.....	130
3.3. Методы измерения массовых концентраций ДЧ .....	131
3.3.1. Гравиметрический метод.....	131
3.3.2. Гравиметрический метод пьезобалансового взвешивания...	132
3.3.3. Фотометрический (абсорбционный) метод.....	133
3.3.4. Нефелометрический метод.....	133
3.3.5. Радиоизотопный метод .....	135
<b>Контрольные вопросы</b> .....	136
<b>4. Мониторинг дисперсных частиц в атмосфере</b> .....	137
4.1. Анализ данных мониторинга ДЧ в Москве .....	137
4.2. Рекомендации по развитию системы мониторинга ДЧ .....	141
<b>Контрольные вопросы</b> .....	145
<b>5. Пути и методы сокращения выбросов ДЧ от автотранспорта</b> .	146
5.1. Сокращение транспортных потребностей и транзита .....	146
5.2. Приоритетное использование «экологически дружественных» видов транспорта .....	148
5.3. Технологическое совершенствование АТС и оптимизация структуры автопарка.....	150
5.3.1. Совершенствование рабочего процесса ДВС.....	152

5.3.2.	Очистка отработавших газов.....	153
5.3.3.	Расширение использования альтернативных топлив .....	157
5.4.	Приоритетное использование износостойких материалов шин, тормозов и дорожного покрытия.....	158
5.4.1.	Снижение износа шин.....	158
5.4.2.	Снижение износа тормозов .....	159
5.4.3.	Снижение износа дорожного покрытия.....	161
5.5.	Оптимизация режимов движения автотранспортных потоков ....	162
5.6.	Совершенствование процедур уборки и содержания дорожного покрытия.....	163
5.7.	Очистка воздуха зелёными насаждениями.....	164
	<b>Контрольные вопросы</b> .....	167
	Список литературы.....	168

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие содержит необходимую информацию в области охраны атмосферного воздуха от выбросов дисперсных частиц (ДЧ) автомобильным транспортом.

В состав этой информации входят:

- классификация ДЧ;
- характеристика основных источников выбросов ДЧ;
- влияние ДЧ на состояние окружающей среды;
- особенности физико-химических свойств ДЧ;
- санитарно-гигиеническая оценка воздействия ДЧ на здоровье населения;
- анализ методов инструментальных измерений содержания ДЧ в отработавших газах автомобилей и атмосфере;
- анализ результатов мониторинга ДЧ в атмосфере;
- предложения по направлениям сокращения выбросов ДЧ на автомобильном транспорте.

При подготовке данного учебного пособия использовались материалы зарубежных и отечественных научных исследований, зарубежные методические разработки, данные мониторинга атмосферного воздуха, находящиеся в свободном доступе.

Основной объём материала, положенного в основу данного учебного пособия, был собран и обработан авторами в ходе выполнения НИР, выполненной по заказу Государственного природоохранного бюджетного учреждения «Мосэкомониторинг». В связи с этим коллектив авторов выражает благодарность руководству этой организации, а также заместителю руководителя Департамента природопользования и охраны окружающей среды города Москвы Семутниковой Евгении Геннадьевне, генеральному директору ЗАО «Национальный центр транспортных исследований» Донченко Вадиму Валериановичу, начальнику отдела экологической безопасности и устойчивого развития транспорта ОАО НИИАТ Кунину Юлию Ильичу.

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**Аэродинамический диаметр частицы** – диаметр сферы плотностью  $1 \text{ г/см}^3$  с такой же скоростью оседания, вызванной действием силы гравитации в спокойном воздухе, что и частица при преобладающей температуре, давлении и влажности. Для частиц с аэродинамическим диаметром менее 0,5 мкм следует использовать термин *диффузионный диаметр частицы*.

**Аэрозоли** – дисперсные системы с газовой дисперсионной средой и твёрдой и/или жидкой дисперсной фазой с пренебрежимо малой скоростью оседания. *Диспергационные аэрозоли* образуются при раздроблении твёрдых веществ, распылении жидкостей и порошков. *Конденсационные аэрозоли* образуются при конденсации из пересыщенных паров и в результате газовых реакций, при которых образуются нелетучие продукты. Согласно глоссарию МГЭИК, аэрозоли (в более строгом понятии – *взвеси* – прим. автора) сохраняются в атмосфере как минимум несколько часов.

**Аэрозольные частицы** – дисперсные частицы, находящиеся в броуновском движении в атмосферном воздухе и практически не подверженные седиментации. Максимальный размер аэрозольных частиц колеблется от 0,01 до 0,1 мкм в зависимости от их плотности. Если же следовать определению аэрозолей в глоссарии МГЭИК, максимальный размер аэрозольных частиц может достигать до 10 мкм.

**Броуновское движение** – это непрерывное беспорядочное движение частиц микроскопических и коллоидных размеров, взвешенных в жидкости или газе, происходящее под действием ударов молекул окружающей среды и не затухающее во времени. Это движение тем интенсивнее, чем выше температура и чем меньше масса частицы и вязкость дисперсионной среды.

**Вдыхаемая фракция дисперсных частиц** (анг. *inhalable fraction*) – массовая доля всех взвешенных в воздухе частиц, которые вдыхаются через нос и рот.

**Взвешенные частицы** – любая субстанция, улавливаемая каким-либо конкретно указанным фильтрующим материалом после разбавления отработавших газов чистым отфильтрованным разбавителем при температуре в пределах 315 К (42°С) – 325 К (52°С); к ним относится, прежде всего, углерод, конденсированные углеводороды и сульфаты в соединении с водой.

Примечание: данное определение не совсем удачно, т.к. исходя из определения, речь идёт не о «взвешенных», а об «уловленных» ДЧ. Более корректно использовать более общее понятие – «дисперсные частицы».

**Возгоны** – *дисперсные частицы*, образующиеся в результате объёмной конденсации паров веществ.

**Выбросы автомобиля** – вещества, поступившие в атмосферу из агрегатов и систем автомобиля.

**Выбросы системы выпуска двигателя автомобиля** – вещества, поступившие в атмосферу из системы выпуска двигателя автомобиля.

**Вымывание примеси из атмосферы** – удаление примеси из атмосферы при образовании облаков, туманов и выпадении осадков.

**Вынуждающее радиационное воздействие** – упрощённая величина измерения важности механизма потенциального изменения климата. Положительное вынуждающее радиационное воздействие приводит к нагреванию приземного слоя атмосферы, а отрицательное вынуждающее радиационное воздействие – к его охлаждению.

**Выпадение примеси из атмосферы** – удаление примеси из атмосферы под действием гравитационных сил.

**Дисперсная система** – гетерогенная система из двух или большего числа фаз, из которых одна (дисперсионная среда) непрерывна, а другая (дисперсная фаза) диспергирована (распределена) в ней в виде отдельных частиц (твёрдых, жидких или газообразных). При размере частиц 0,1 мкм и меньше система называется *коллоидной*.

**Дисперсные частицы (ДЧ)** – твёрдые или жидкие частицы дисперсной фазы, содержащиеся в газообразной дисперсионной среде.



**Дисперсный состав частиц** – распределение частиц по размерам, характеризующее относительным содержанием фракций или параметрами функций, описывающих указанное распределение.

**Диффузионный диаметр частицы** – диаметр сферы с таким же коэффициентом диффузии, что и частица при преобладающей температуре, давлении и влажности. Для частиц с аэродинамическим диаметром более 0,5 мкм следует использовать термин *аэродинамический диаметр частицы*.

**Дихотомия** – сопоставленность или противопоставленность двух частей целого, раздвоенность, последовательное деление на две части, не связанные между собой. Способ логического деления класса на подклассы, который состоит в том, что делимое понятие полностью делится на два взаимоисключающих понятия. Дихотомическое деление в математике, философии, логике и лингвистике является способом образования взаимоисключающих подразделов одного понятия или термина и служит для образования классификации элементов.

**Дым** – частицы, взвешенные в потоке отработавших газов или атмосфере, которые поглощают, отражают или преломляют свет.

**Дым отработавших газов двигателя автомобиля** – дым, состоящий из дисперсных частиц, находящихся в отработавших газах двигателя автомобиля.

**Дымность отработавших газов двигателя автомобиля** – показатель, характеризующий степень поглощения светового потока, просвечивающего отработавшие газы двигателя автомобиля.

**Загрязняющее атмосферу вещество (ЗВ)** – примеси в атмосфере, которые могут оказывать неблагоприятное влияние на здоровье людей и (или) на окружающую среду.

**Импактор** – устройство для принудительного фракционного осаждения частиц аэрозоля с целью последующего определения их количества и размеров; применяется при исследовании загрязнённости воздуха.

**Источник загрязнения атмосферы** – объект, выделяющий загрязняющие атмосферу вещества.

**Канцерогенный фактор (канцероген)** – фактор, воздействие которого вызывает или достоверно увеличивает частоту возникновения доброкачественных и/или злокачественных опухолей у людей и/или животных.

**Каталитический нейтрализатор отработавших газов двигателя автомобиля** – устройство для нейтрализации (химического преобразования токсичных веществ в нетоксичные или малотоксичные) отработавших газов двигателя автомобиля методом каталитического воздействия.

**Климатическая система** – весьма сложная система, состоящая из пяти важнейших компонентов: атмосферы, гидросферы, криосферы, поверхности суши и биосферы и взаимодействий между ними.

**Копоть** – частицы чёрного цвета, образующиеся в переобогащённых зонах (с недостатком кислорода) открытого пламени при горении углеводородов. Видимо, получили название по способности адсорбироваться (налипать, или по-старинному – «опотевать», т.е. покрывать поверхность своеобразным «потом») на поверхности предметов, поднесённых к пламени.

**Коэффициент ослабления светового потока** – степень ослабления светового потока вследствие поглощения и (или) рассеивания света отработавшими газами при прохождении ими рабочей трубы дымомера.

**Летучая зола** – дисперсные частицы в виде несгораемого остатка топлива, образующегося из его минеральных примесей при горении, содержащиеся в дымовом газе во взвешенном состоянии.

**Лидар** (транслитерация LIDAR англ. *Light Detection and Ranging* – световое обнаружение и определение дальности) – технология получения и обработки информации об удалённых объектах с помощью активных оптических систем, использующих явления отражения света и его рассеяния в прозрачных и полупрозрачных средах. «Атмосферные» лидары способны не только определять расстояния до непрозрачных отражающих целей, но и анализировать свойства прозрачной среды, рассеивающей свет. Разновидностью атмосферных лидаров являются

доплеровские лидары, определяющие направление и скорость перемещения воздушных потоков в различных слоях атмосферы.

**Медиана** или **медианный диаметр** – значение размера частиц, которое разделяет популяцию распределения точно на две равные части, т.е. точка на кривой, где 50% распределения находятся слева от этой точки, а 50% – справа.

**Методика** – фиксированная совокупность приёмов практической деятельности, приводящая к заранее определённому результату. В научном познании методика играет важную роль в эмпирическом исследовании (наблюдении и эксперименте). В отличие от метода в задачи методики не входит теоретическое обоснование полученного результата, она концентрируется на технической стороне эксперимента и на регламентации действий исследователя.

**Мода** или **модальный диаметр** – такое значение размера частиц или класс распределения размеров, который в исследуемом распределении представлен в наибольшем количестве, т.е. это наивысшая точка кривой распределения.

**Отработавшие газы двигателя автомобиля** – смесь газов с примесью дисперсных частиц, удаляемая из цилиндров или камер сгорания двигателя автомобиля.

**Поверхностный слой** – неоднородный тонкий слой определённой толщины и объёма, который располагается по обе стороны поверхности, разделяющей две соприкасающиеся объёмные фазы.

**Потенциал глобального потепления (ПГП)** – весовой коэффициент, показывающий соотношение интеграла от теплового воздействия рассматриваемой примеси к интегралу от теплового воздействия углекислого газа. Интеграл от теплового воздействия представляет собой суммарный тепловой эффект, оказываемый примесью в течение определенного периода времени. Например, согласно МГЭИК, значение ПГП для метана в случае столетнего периода равняется 25. Это означает, что молекулы метана, попадающие в атмосферу, в течение срока их жизни разогревают атмосферу в 25 раз

сильнее, чем такое же количество углекислого газа на протяжении ста лет.

**Потенциал изменения глобальной температуры (ПГТ)** – соотношение изменения температуры в результате воздействия импульсных выбросов рассматриваемой примеси к изменению температуры от импульсных выбросов углекислого газа. Долго- и короткоживущие агенты со сходными значениями ПГТ будут оказывать равносильное воздействие на изменение среднегодовой глобальной температуры.

**Правило опровергаемости** – современная наука признаёт, что невозможно доказать абсолютную истину или какую-либо гипотезу или модель, поскольку всегда имеется возможность того, что можно применить другое объяснение для тех же наблюдений. В этом смысле даже хорошо обоснованные физические законы являются «условными». Отсюда, с помощью научной методологии никогда невозможно убедительно доказать, что гипотеза является истинной, возможно лишь доказать, что она ложная.

**Предельно допустимая концентрация примеси в атмосфере** – максимальная концентрация примеси в атмосфере, отнесённая к определенному времени осреднения, которая при периодическом воздействии или на протяжении всей жизни человека не оказывает на него вредного действия, включая отдаленные последствия, и на окружающую среду в целом.

**Примесь в атмосфере** – рассеянное в атмосфере вещество, не содержащееся в её постоянном составе.

**Принцип предосторожности** – избегание кажущегося наиболее эффективным решения, последствия которого необратимы, в пользу кажущегося менее эффективным решения, но последствия которого могут быть обратимыми.

**Пробеговый выброс** – показатель, характеризующий количество вещества, поступившее в атмосферу из системы выпуска двигателя автомобиля, отнесенное к единице пройденного пути.

**Протокол (норматив) по вдыхаемой фракции** (анг. *inhalable convention*) – условная характеристика устройств для отбора проб, используемых при исследовании вдыхаемой фракции дисперсных частиц.

**Протокол (норматив) по экстраторакальной фракции** (анг. *extrathoracic convention*) – условная характеристика устройств для отбора проб, используемых при исследовании экстраторакальной фракции дисперсных частиц.

**Протокол (норматив) по торакальной фракции** (анг. *thoracic convention*) – условная характеристика устройств для отбора проб, используемых при исследовании торакальной фракции дисперсных частиц.

**Протокол (норматив) по трахеобронхиальной фракции** (анг. *tracheobronchial convention*) – условная характеристика устройств для отбора проб, используемых при исследовании трахеобронхиальной фракции дисперсных частиц.

**Протокол (норматив) по респирабельной фракции** (анг. *respirable convention*) – условная характеристика устройств для отбора проб, используемых при исследовании респирабельной фракции дисперсных частиц.

**Пыль** – твёрдые частицы, способные образовывать взвеси в атмосфере.

**Респирабельная фракция** (анг. *respirable fraction*) – массовая доля вдыхаемых частиц, попадающих в нижние дыхательные пути: бронхиолы, альвеолы.

**Рециркуляция отработавших газов двигателя автомобиля (РОГ)** – перепуск части отработавших газов из системы выпуска в систему впуска двигателя автомобиля.

**Сажа** – дисперсный углеродный продукт неполного сгорания или термического разложения углеводородов, состоящий из сферических частиц чёрного цвета, образующих агломераты за счёт коагуляции. Средний размер сажевых частиц 100...3500 Å (0,01...0,35 мкм). Частицы сажи образованы из слоёв углеродных атомов, подобных слоям в

графите. Эти слои состоят из шестиугольников, в вершинах которых находятся атомы углерода (расстояния между ними 1,42 Å), но, в отличие от графита, слои в саже не плоские, а изогнутые, что и обуславливает сферическую поверхность частиц. Плотность сажевых частиц около 2 г/см<sup>3</sup>. Насыпная плотность сажи 0,05...0,5 г/см<sup>3</sup>, зависит от степени уплотнения сажи.

**Седиментация** – оседание частиц дисперсной фазы в жидкости или газе под действием гравитационного поля или центробежных сил. Скорость седиментации зависит от массы, размера, формы и плотности вещества частицы, вязкости и плотности среды, а также от ускорения, силы тяжести и действующих на частицы центробежных сил. В поле гравитационных сил седиментируют частицы грубодисперсных систем; в поле центробежных сил возможна седиментация коллоидных частиц и макромолекул.

**Система снижения токсичности двигателя** – совокупность средств и устройств, служащих для уменьшения содержания вредных веществ в выбросах двигателя.

**Твёрдые частицы – пыль** (анг. *particulate matter – dust*) – частицы любой формы, структуры и плотности, которые могут быть собраны путем фильтрования в заданных условиях после представительного отбора проб анализируемого газа и которые остаются выше по потоку от фильтра и на нём после осушки в заданных условиях. Однако в некоторых национальных стандартах определение твёрдых частиц может быть расширено и охватывать конденсаты или продукты химических реакций, осаждающихся на фильтре в заданных условиях (например, при температурах ниже температуры отходящего пылегазового потока).

**Технический углерод** – высокодисперсный аморфный углеродный продукт, производимый в промышленных масштабах. В отличие от термина «сажа», термин «технический углерод» описывает углеродные продукты, полученные в контролируемых условиях, для которых характерен фиксированный набор свойств. Размер частиц – 13...350 нм (0,013...0,35 мкм).

**Токсичность выбросов двигателя автомобиля** – способность выбросов двигателя автомобиля оказывать вредное воздействие на людей, животный мир.

**Торакальная фракция** (анг. *thoracic fraction*) – массовая доля вдыхаемых частиц, попадающих за пределы гортани.

**Трахеобронхиальная фракция** (анг. *tracheobronchial fraction*) – массовая доля вдыхаемых частиц, попадающих за пределы гортани, но не попадающих в нижние дыхательные пути.

**Удельный выброс загрязняющих веществ** – количество загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух при производстве единицы продукции или единицы энергии. *Удельный выброс* – часть *удельного выделения*, попадающая непосредственно в атмосферный воздух. Для источников, оборудованных системами пылегазоулавливания (ПГУ), удельный выброс равен разности удельного выделения и его уловленной и обезвреженной части. Для организованных источников без ПГУ удельные выбросы равны удельным выделениям.

**Удельное выделение загрязняющего вещества** – количество (масса) данного вещества, выделившееся в ходе технологического процесса, отнесённое к единице материального показателя, характеризующего этот процесс.

**Удельный выброс системы выпуска двигателя автомобиля** – показатель, характеризующий количество вещества, поступившее в атмосферу в единицу времени из системы выпуска двигателя автомобиля, отнесённое к единице мощности, развиваемой двигателем.

**Устойчивое развитие** – это такое развитие общества, которое обеспечивает достойную жизнь всех людей на Земле и гарантирует её сохранение в будущем на основе экологичного и социально справедливого хозяйствования в рамках, допустимых природой.

**Фаза** – часть системы одного состава с одинаковыми термодинамическими свойствами, ограниченная от других частей поверхностью раздела. Система, состоящая из одной фазы, а следовательно, имеющая одинаковые макроскопические свойства,

называется *гомогенной*; *гетерогенной* называют систему, состоящую из двух или более фаз.

**Число взвешенных частиц** – общее число частиц диаметром свыше 23 нм (0,023 мкм), остающихся в разбавленных отработавших газах после их обработки для отделения летучих материалов. Более корректный термин «число дисперсных частиц».

**Экстраторакальная фракция** (анг. *extrathoracic fraction*) – массовая доля вдыхаемых дисперсных частиц, не попадающих за пределы гортани.

**Ядра конденсации облаков** – находящиеся в воздухе частицы, размером более 0,05 мкм, служащие в качестве первоначального центра для конденсации жидкой воды и способные приводить к образованию облаков.

**Black carbon (BC)** – «чёрный углерод» – самый эффективно поглощающий видимое солнечное излучение компонент дисперсных частиц (*particulate matter, PM*). Высокая абсорбционная способность к свету всего видимого диапазона частот обуславливает чёрный цвет этих частиц. Наряду с BC в состав ДЧ могут входить менее абсорбирующие свет соединения, т.н. **Brown carbon (BrC)** – «бурый углерод». Кроме того, выбросы BC, как правило, сопровождаются выбросами соединений, в большей степени отражающими и рассеивающими свет, например, диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ), оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) и органического углерода (OC). Эти соединения оказывают противоположный эффект на климатическую систему. В русском языке пока не существует устоявшегося термина, точно соответствующего английскому black carbon. В литературе можно встретить такие варианты перевода как «сажа, элементарный углерод, чёрный углерод, технический углерод» и т.п. Наиболее близкое по смыслу понятие – «сажа».

**Organic carbon (OC)** – «органический углерод» – смесь соединений, содержащих углерод, связанный с другими химическими элементами, такими как водород и кислород. OC является продуктом неполного сгорания углеводородов, а также результатом окисления летучих органических соединений (VOC) в атмосфере. Оптические



свойства ОС лежат в широком диапазоне от поглощения до рассеивания.

**Particulate matter (PM)** – дисперсные частицы твёрдого или жидкого вещества, которые остаются индивидуально диспергированными в газе или жидкости.

**PM<sub>10</sub>** – дисперсные частицы, проходящие с 50%-ной эффективностью через впускное отверстие разделительной установки аэродинамического диаметра 10 мкм. **PM<sub>10</sub>** соответствуют требованиям «торокального протокола» по методам отбора проб при измерениях концентраций ДЧ.

**PM<sub>2,5</sub>** – дисперсные частицы, проходящие с 50%-ной эффективностью через впускное отверстие разделительной установки аэродинамического диаметра 2,5 мкм. **PM<sub>2,5</sub>** соответствуют требованиям «респирабельного протокола» по методам отбора проб при измерениях концентраций ДЧ.

**Total airborne particles** – «все взвешенные в воздухе частицы» – все дисперсные частицы, находящиеся в заданном объёме воздуха. Невозможно измерить концентрацию всех взвешенных частиц из-за того, что используемые устройства для отбора проб в некоторой степени обладают селективностью к определенному размеру частиц.

**Total Suspended Particles (TSP)** – «общие взвешенные частицы» – сумма взвешенных веществ, которая включает все находящиеся в воздухе «тонкие» (*fine*) частицы и часть «грубых» (*coarse*) частиц. В зависимости от направления и скорости ветра верхняя граница размеров ДЧ, попадающих в пробоотборник TSP, лежит в районе 25...40 мкм.

**Wide Range Aerosol Classifier (WRAC)** – «расширенный диапазон классификации аэрозолей» – показатель, «расширяющий» диапазон TSP в сторону более «грубых» частиц – вплоть до 100 мкм.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АИ – аэроионы

АСКЗА – автоматическая станция контроля загрязнения атмосферы

АТС – автотранспортные средства

АТК – автотранспортный комплекс

ВОЗ – Всемирная организация здравоохранения

ВСХ – внешняя скоростная характеристика

ДВС – двигатели внутреннего сгорания

ДВСПВ – ДВС с принудительным воспламенением рабочей (горючей) смеси

ДВСВС – ДВС с самовоспламенением рабочей (горючей) смеси при впрыске топлива в нагретый в результате сжатия воздух

ДЧ – дисперсные частицы

ЕС – Европейский Союз

ЭК ООН – Европейская экономическая комиссия Организации объединённых наций

ЗВ – загрязняющее (атмосферу) вещество

ИЗА – источник загрязнения атмосферы

МГЭИК – Межправительственная группа экспертов по изменению климата

МКРЗ – Международная комиссия по радиологической защите

НМУ – неблагоприятные метеорологические условия (штиль + температурная инверсия)

ОГ – отработавшие газы

ОУ – органический углерод

ПАУ – полициклические ароматические углеводороды

ПГП – потенциал глобального потепления

ПГТ – потенциал изменения глобальной температуры

ПДК – предельно допустимая концентрация

ПДК<sub>МР</sub> – максимально разовая предельно допустимая концентрация

ПДК<sub>сг</sub> – среднегодовая предельно допустимая концентрация

ПДК<sub>сс</sub> – среднесуточная предельно допустимая концентрация

РОГ – рециркуляция отработавших газов

СОЗ – стойкие органические загрязнители

УДС – улично-дорожная сеть

ЦНС – центральная нервная система

ЭУ – элементарный углерод

EPA – Environment Protection Agency – Агентство по защите окружающей среды (США)

IARC – International Agency for Research on Cancer – Международное агентство по исследованию рака

PAHs – Polycyclic Aromatic Hydrocarbons – полициклические ароматические углеводороды

PBDEs – PolyBrominated Diphenyl Ethers – полибромдифениловые эфиры

ТЕОМ – Tapered Element Oscillating Microbalance – гравиметрический метод пьезобалансового взвешивания

## **ВВЕДЕНИЕ**

Проблема загрязнения атмосферного воздуха мелкодисперсными частицами в настоящее время выходит на первый план среди других видов загрязнителей и по праву вызывает пристальный интерес экологов, климатологов, медиков, управленцев различного уровня.

Дисперсные частицы (ДЧ) служат носителями многих токсичных и канцерогенных веществ, поэтому содержание этих частиц в воздухе, ингаляционные дозы и эффект воздействия этих частиц на здоровье населения являются предметом серьёзного внимания врачей-гигиенистов.

Геофизики и климатологи рассматривают ДЧ (а именно их составную часть – т.н. «чёрный углерод») как один из существенных факторов, определяющих изменения климата планеты.

В крупнейших городах, в том числе в Москве, автотранспорт вносит основной вклад в выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. В отличие от промышленных источников выбросов, автотранспортные источники выделяют загрязняющие вещества в приземный слой воздуха густонаселённых территорий, что делает их ещё более опасными для здоровья населения. Проблема усугубляется непрерывным увеличением численности автопарка, интенсивности его использования, недостаточным уровнем экологического контроля автотранспортных средств (АТС) и т.п.

В существующей научно-технической литературе вопросам изучения ДЧ уделяется достаточно много внимания, однако из-за широты проблематики наблюдается некоторая путаница в понятиях, определениях и сути исследуемых процессов. Поэтому основной идеей данного учебного пособия является упорядочение имеющейся многообразной информации в этой области и комплексное изложение всех аспектов, касающихся борьбы с ДЧ на автомобильном транспорте.

## 1. ПРИРОДНЫЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

### 1.1. Классификация дисперсных частиц

Дисперсные частицы (ДЧ), обнаруживаемые в атмосфере, имеют различное происхождение, а также разнообразный химический и морфологический состав, обладают разными физическими характеристиками. Это обуславливает широкий спектр процессов, в которых ДЧ играют ту или иную роль.

Анализ научной, нормативной и инженерной информации выявил существенное различие в понимании терминологии, касающейся различных аспектов исследования ДЧ. Зачастую, авторы научных статей или нормативных документов смешивают понятия или используют их некорректно. Например, в Правилах ЕЭК ООН № 49 и № 83 измеряемые в ходе испытаний ДЧ определены как «загрязняющие взвешенные частицы», а в Правилах ЕЭК ООН №96 они же названы «загрязняющими твёрдыми частицами». В некоторых статьях встречаются такие фразы: «доля чёрного углерода в саже...» или «твёрдые частицы состоят из твёрдых частиц и капелек жидкости». Очень часто в качестве синонима ДЧ используют термин «аэрозоли», что является ошибочным. Во многих исследованиях наблюдается тенденция «глобализации» толкования отдельных терминов, когда «узкий» термин, определяющий лишь одну характеристику ДЧ (например, «чёрный углерод», «сажа», «пыль», «зола»), рассматривается как общий термин «дисперсные частицы». В связи с этим сделана попытка устранить подобные терминологические несуразицы. Далее приводится развёрнутая классификация ДЧ.

**По механизму появления ДЧ в атмосфере** выделяют первичные ДЧ и вторичные ДЧ. **Первичные ДЧ** попадают в атмосферу либо с поверхности земли, либо из космоса, а **вторичные ДЧ** образуются непосредственно в атмосфере.

Первичные ДЧ в свою очередь можно условно разделить на **биогенные ДЧ**, т.е. образовавшиеся в результате деятельности живых организмов (пыльца, споры, бактерии и вирусы, частицы, образующиеся

в результате отмирания тканей живых или разложения умерших организмов, дымы лесных или степных пожаров и т.п.) и **абиогенные ДЧ**<sup>1</sup>, т.е. образовавшиеся в результате процессов, протекающих в неживой природе (вулканическая деятельность, процессы выветривания горных пород, космическая пыль и т.п.).

Биогенные источники поступления ДЧ в атмосферу можно условно разделить на **природные ДЧ** и **антропогенные ДЧ**<sup>2</sup>, основываясь на степени потенциального контроля того или иного источника человеком. Категорию антропогенных ДЧ в атмосферном воздухе составляют продукты сжигания углеводородных топлив во всех областях хозяйственной деятельности, продукты сжигания органического вещества в сельском и лесном хозяйствах, дым от антропогенных пожаров, пыли и аэрозоли, образующиеся при обработке и перемещении сырья и материалов, а также при вспашке почвы и при перемещении техники, людей и животных по поверхности земли и т.п.

Вторичные ДЧ можно условно разделить на частицы, образующиеся в атмосфере в результате **химических** процессов<sup>3</sup>, в результате которых газообразные примеси реагируют друг с другом, формируя жидкие или твёрдые продукты этих реакций (например, в основном таков механизм образования фотохимического смога), и на частицы, образующиеся в результате **физического** процесса конденсации<sup>4</sup> парообразных примесей – **возгоны**. Типичными веществами – предшественниками образования вторичных ДЧ, или

---

<sup>1</sup> В биосфере, как гласит один из фундаментальных экологических принципов, «всё связано со всем», поэтому разделение на биогенные и абиогенные источники выделения ДЧ является условным.

<sup>2</sup> Иногда довольно затруднительно разграничить природные и антропогенные источники выбросов ДЧ. Например, пыль, поднимаемая ветром над пустыней Сахара, обычно относится к природным источникам, однако есть научные гипотезы, говорящие об антропогенном происхождении самой Сахары.

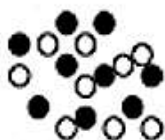
<sup>3</sup> Как правило, химические реакции зависят от физических условий, и, наоборот, влияют на физические характеристики атмосферного воздуха, поэтому корректнее говорить о взаимосвязанных физико-химических процессах образования ДЧ.

<sup>4</sup> В этом случае говорят об этапах а) образования зародышей, б) конденсации и в) коагуляции.

**прекурсорами**<sup>1</sup>, являются оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), оксиды серы ( $\text{SO}_x$ ), аммиак ( $\text{NH}_3$ ), летучие органические вещества (анг. volatile organic compounds, VOCs). Заметим, что в данном случае любая ДЧ может состоять из нескольких веществ, попавших в атмосферу из различных источников.

Классифицируя ДЧ по агрегатному состоянию, различают **твёрдые** (пыль) и **жидкие** (туман) ДЧ. И те и другие могут быть **гомогенными**, т.е. состоящими из одной фазы, или **гетерогенными**, состоящими из разных фаз (рис. 1).

**Внешнее смешение**  
Разные фазы остаются  
отдельными частицами



**6-7.5 m<sup>2</sup>/g**

**Наименьшая  
степень адсорбции**  
Наблюдается редко

**Внутренне-  
поверхностное  
смешение**

Одна фаза  
распределяется поверх  
другой, формируя одну  
гетерогенную частицу



**12 m<sup>2</sup>/g**

**Средняя степень  
адсорбции**  
Наблюдается часто

**Внутренне-объёмное  
смешение**

Разные фазы  
распределяются внутри  
отдельных гетерогенных  
частиц



**Наибольшая  
степень адсорбции**  
Практически не  
наблюдается

*Рис. 1. Различные виды гетерогенных ДЧ*

Классифицируя ДЧ по характеру поведения в атмосфере, выделяют **седиментабельные ДЧ**, т.е. частицы, оседающие в спокойном воздухе под действием силы тяжести Земли, и **аэрозоли** (размером менее 0,1 мкм), практически не оседающие в спокойном воздухе из-за преобладающего влияния на них броуновского движения

<sup>1</sup> Прекурсоры – газообразные примеси в атмосфере, служащие исходным «сырьём» для процессов образования вторичных ДЧ.

молекул воздуха. Промежуточной категорией в данном контексте можно считать категорию **взвесей**, которые могут достаточно долго находиться во взвешенном состоянии в реальной атмосфере, где существует ветер, конвекция и другие препятствующие седиментации (оседанию) ДЧ процессы. Согласно глоссарию МГЭИК, взвеси сохраняются в атмосфере как минимум несколько часов. Характеризуя размер ДЧ, в этом случае говорят об **аэродинамическом диаметре ДЧ** и **диффузионном диаметре ДЧ**. Кроме того, ДЧ могут покидать атмосферу в результате вымывания их жидкими осадками, адсорбции на поверхности снега или на поверхности растений. Очевидно, что ДЧ могут различаться по эффективности вовлечения в эти процессы, поэтому их можно разделять (классифицировать) и по этому признаку. Однако авторам не удалось найти примеров подобной классификации.

Классифицируя ДЧ по их **оптическим свойствам**, часто выделяют ДЧ, практически полностью **поглощающие свет** видимого спектра (наиболее часто встречаемые термины, применяемые для таких ДЧ – *сажа, копоть, чёрный дым, чёрный углерод, элементарный углерод*), практически полностью **отражающие свет** (*белый дым, часть органического углерода*) и ДЧ, обладающие **промежуточными оптическими свойствами** (*голубой дым, часть органического углерода, бурый углерод*).

Классифицируя ДЧ по **степени проникновения в организм человека через органы дыхания**, обычно выделяют **вдыхаемую (ингалябельную)** фракцию ДЧ, которые вдыхаются через нос и рот и **невдыхаемую (неингалябельную)** фракцию ДЧ, которые не могут проникнуть в организм человека через органы дыхания. Вдыхаемая фракция состоит из **экстраторакальной** фракции ДЧ, не попадающих за пределы гортани; **торакальной** фракции ДЧ, попадающих за пределы гортани; **трахеобронхиальной** фракции ДЧ, попадающих за пределы гортани, но не попадающих в нижние дыхательные пути и **респирабельной** фракции ДЧ, попадающих в нижние дыхательные пути: бронхиолы и альвеолы.



Классифицируя ДЧ по химическому составу, часто выделяют **минеральные<sup>1</sup> ДЧ** (например, элементарный углерод – сажа, сульфаты и нитраты) и **органические ДЧ** (*органический углерод*), а также ДЧ с *кислотными, щелочными или нейтральными* свойствами.

**Классификация ДЧ по морфологии и размеру** зависит от области применения данной классификации. Например, в ГОСТ 17.2.1.01-76 приводится следующая классификация ДЧ по размеру частиц:

- менее 0,5 мкм;
- от 0,5 до 3 мкм включительно;
- от 3 до 10 мкм включительно;
- от 10 до 50 мкм включительно;
- от 50 мкм.

Видимо, такая классификация связана с задачами проектирования газоочистного оборудования.

Однако определение размера ДЧ зависит от их формы (рис. 2). Единственная форма объекта, который может быть описан одним числовым значением, это сфера. Поэтому размеры ДЧ определяют, используя теорию **эквивалентной сферы**. Измеряя некоторые характеристики частицы (масса, объём, площадь поверхности и т.п.), предполагают, что они относятся к сфере, затем рассчитывают универсальное число (диаметр этой сферы), которое характеризует данную частицу.

В дальнейшем будет использоваться классификация ДЧ по их **аэродинамическому диаметру**, который позволяет с определённой степенью условности разделить ДЧ по тем последствиям, которые они вызывают для здоровья человека и состояния окружающей среды:

- **грубодисперсные<sup>2</sup>** (10...100 мкм);

---

<sup>1</sup> Понятие «минерал» подразумевает твёрдое природное неорганическое кристаллическое вещество. Но иногда его рассматривают в неоправданно расширенном контексте, относя к минералам некоторые органические, аморфные и другие природные продукты, в частности некоторые горные породы, которые в строгом смысле не могут быть отнесены к минералам.

<sup>2</sup> ДЧ размером более 100 мкм переходят в размерность «песка».

- **среднедисперсные** (2,5...10 мкм);
- **мелкодисперсные** (0,1...2,5 мкм);
- **нанодисперсные**<sup>1</sup> (0,001...0,1 мкм).

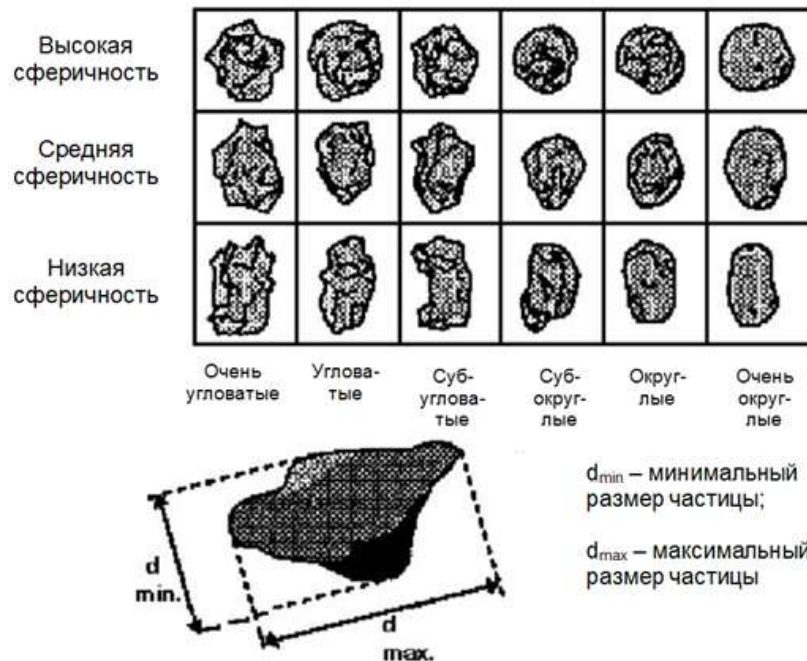


Рис. 2. Классификация ДЧ по форме и зависимость размеров ДЧ от их формы [1]

В международной практике применяется похожая классификация, базирующаяся, однако, лишь на указании верхней границы размеров ДЧ, что связано с особенностями экспериментального измерения концентраций этих ДЧ в отходящих (отработавших) газах или в атмосфере:

**TSP – total suspended particulate** – «все взвешенные в воздухе частицы» – все дисперсные частицы, находящиеся в заданном объеме воздуха. Под данное определение попадают грубодисперсные, среднедисперсные, мелкодисперсные и нанодисперсные частицы. Невозможно, однако, измерить концентрацию всех взвешенных частиц из-за того, что используемые устройства для отбора проб в некоторой степени обладают селективностью к определенному размеру частиц.

**PM<sub>10</sub> – particulate matter 10** – дисперсные частицы, проходящие с 50%-ной эффективностью через впускное отверстие разделительной

<sup>1</sup> ДЧ размером менее 0,001 мкм невозможно измерить существующими в настоящее время способами.

установки аэродинамического диаметра 10 мкм.  $PM_{10}$  соответствуют требованиям «торокального протокола» по методам отбора проб при измерениях концентраций ДЧ. Под данное определение попадают среднедисперсные, мелкодисперсные и нанодисперсные частицы.

**$PM_{2.5}$  – particulate matter 2,5** – дисперсные частицы, проходящие с 50%-ной эффективностью через впускное отверстие разделительной установки аэродинамического диаметра 2,5 мкм.  $PM_{2.5}$  соответствуют требованиям «респирабельного протокола» по методам отбора проб при измерениях концентраций ДЧ. Под данное определение попадают мелкодисперсные и нанодисперсные частицы.

**$PM_{0.1}$  – particulate matter 0,1** – дисперсные частицы, проходящие с 50%-ной эффективностью через впускное отверстие разделительной установки аэродинамического диаметра 0,1 мкм<sup>1</sup>. Под данное определение попадают нанодисперсные частицы.

## ***1.2. Основные источники природных и антропогенных выбросов дисперсных частиц и их массовый баланс***

Оценочные данные показывают, что основная масса ДЧ образуется в ходе антропогенных процессов, однако в некоторых случаях вклад природных выбросов оказывается существенным. Это обстоятельство получило отражение в европейской Директиве по качеству атмосферного воздуха и соответствующих рабочих документах. Исследования показали, что единственной примесью, для которой необходим учёт природной составляющей в создаваемых приземных концентрациях, является фракция  $PM_{10}$ .

Основными природными источниками  $PM_{10}$  считаются:

- пыль, поднимаемая ветром с поверхности засушливых регионов, состоящая главным образом из алюмосиликатов, кварца и карбонатов<sup>2</sup>;

---

<sup>1</sup> Неофициальное определение.

<sup>2</sup> Более точный состав ДЧ зависит от особенностей географического региона.

- морской аэрозоль, поднимаемый ветром с поверхности солёных водоёмов, состоящий из NaCl со следами магния, сульфатов и биогенных органических соединений;
- ДЧ, выбрасываемые в атмосферу в результате вулканической и сейсмической активности, состав которых крайне специфичен для каждого конкретного случая; кроме того, при вулканической деятельности происходят выбросы SO<sub>2</sub>, являющегося предшественником образования вторичных сульфатов;
- дым лесных и степных пожаров, состоящий главным образом из фракции PM<sub>2,5</sub> «элементарного углерода» (сажи) и неметановых органических летучих соединений, являющихся причиной образования вторичных ДЧ (органического углерода).

Для оценки вклада природных источников в наблюдаемые концентрации ДЧ используются модели, описывающие процессы выброса, переноса и оседания ДЧ. Для настройки подобных моделей используют результаты прямого и удалённого мониторинга<sup>1</sup> качества воздуха и метеорологических параметров. Однако пока не существует единого подхода к количественному определению этой доли. Оценки, выполненные по результатам мониторинга PM<sub>10</sub> в 2008 и 2009 годах в ЕС, показали, что вклад природных источников может достигать до 13 мкг/м<sup>3</sup> при определении среднегодовых концентраций. Однако этот вклад существенно зависит от уровня индустриального развития стран того или иного географического региона.

Из природных источников выбросов ДЧ следует особо рассмотреть пыль, поднимаемую ветром, т.к. её состав имеет специфическую привязку к местности. В почвах могут находиться частицы размером как менее 1 мкм, так и более нескольких миллиметров, но поглотительной способностью обладают преимущественно мелкодисперсные частицы. Под поглотительной способностью понимается способность почвы поглощать различные вещества из раствора, проходящего через неё, и удерживать их. Чем больше в почве минеральных и органических

---

<sup>1</sup> В т.ч. с использованием лидаров и радиометрического анализа. Самые известные применения: Aerosol Robotic Network (AERONET, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) и Sky Radiometer Network (SKYNET, <http://atmos.cr.chiba-u.ac.jp>).

коллоидных частиц, тем выше её поглотительная способность. У глинистых и суглинистых почв ёмкость поглощения больше, чем у песчаных и супесчаных. Почвенные коллоиды способны поглощать тяжёлые металлы, радионуклиды и стойкие органические загрязнители. Высыхая, эти компоненты почвы могут под действием ветра способствовать загрязнению воздуха мелкодисперсными частицами, в состав которых входят все перечисленные загрязняющие вещества.

Таким образом, в состав почвенной пыли могут входить высокотоксичные примеси антропогенного происхождения. Поэтому химический состав почвенной пыли вблизи антропогенно изменённых территорий следует отнести к смешанному «природно-антропогенному» типу.

Ещё одним компонентом природных ДЧ являются биогенные ДЧ. Размер бактерий составляет от одного до нескольких микрометров, а споры обычно не крупнее 2 мкм. Вирусы ещё меньше. Основная масса микроорганизмов попадает в атмосферный воздух с почвенной пылью, которая, сорбируя микроорганизмы, оказывается обсеменённой ими (в 1 г пыли содержится более 1 млн микроорганизмов). Микроорганизмы и пыль, находясь в воздухе во взвешенном состоянии, образуют систему бактериальных аэрозолей. В естественных условиях в воздухе встречается около 100 различных видов микроорганизмов, главным образом непатогенных. Это объясняется тем, что воздух как среда обитания неблагоприятен для развития микроорганизмов. Микрофлора воздуха представлена в основном микрококками, сарцинами, спороносными аэробными бактериями, различными видами *Penicillium* *Aspergillus* и др. Все они характеризуются высокой устойчивостью к высушиванию, ультрафиолетовым лучам Солнца и другим неблагоприятным условиям внешней среды. Вместе с тем известны случаи, когда удавалось доказать присутствие в воздухе крупных населенных пунктов патогенных и условно патогенных бактерий.

Бактериальное загрязнение городского воздуха, как правило, выше, чем пригородного. Это объясняется тем, что процесс оседания аэрозолей в условиях интенсивного уличного движения происходит

медленнее, чем в малоподвижном воздухе. Кроме того, в городе эффективность ультрафиолетовой радиации слабее (за счёт снижения прозрачности атмосферы). Что касается зелёных насаждений, которым принадлежит пылезадерживающая роль, то они распределены в городах крайне неравномерно. Из атмосферного воздуха над Москвой удалось выделить в 3...4 раза больше микроорганизмов, чем на той же высоте, но в 5...7 км от города. Наконец, с гигиенической точки зрения заслуживает особого внимания большая пылезадерживающая способность зелёных насаждений и обеззараживающий эффект фитонцидов, оказывающих отрицательное влияние на развитие микроорганизмов. Установлено, что в зоне крупных зелёных массивов задерживается от 50 до 90% пыли, как правило, обсеменённой микроорганизмами.

Особый тип атмосферных ДЧ представляют **радиоактивные** частицы. Антропогенные радиоактивные аэрозоли образуются при технологических или аварийных выбросах на предприятиях атомной промышленности и энергетики. Некоторые радиоактивные элементы (йод, полоний, плутоний), попав в атмосферу, захватываются аэрозольными частицами. Большая часть природной радиоактивности ДЧ обусловлена выделениями радона  $Rn^{222}$  и торона  $Rn^{220}$ . Из грунта радон и торон диффундируют в атмосферу, где постепенно распадаются и переходят в изотопы тяжёлых металлов ряда урана  $U^{238}$  и тория  $Th^{232}$ . В настоящее время принято считать, что на радон и продукты его распада приходится 80% дозы облучения, получаемой населением планеты за год от всех природных источников радиации. Основное количество радиоактивного вещества приходится на частицы с размером 0,015...0,5 мкм [2].

### ***1.3. Структура выбросов ДЧ по секторам экономики***

Особенности национальных статистических систем затрудняют проведение однозначного сравнения отраслевых распределений первичных антропогенных выбросов ДЧ: например, в отчётах о состоянии атмосферного воздуха в Европе (рис. 3) и в США (рис. 4)

используется разная группировка источников выбросов, а свободный доступ к первичной (не сгруппированной) информации отсутствует.

Терминологическая путаница также затрудняет однозначное понимание публикуемой статистики – во многих случаях авторы произвольно трактуют используемые термины в соответствии со своими интересами или исходя из особенностей измерительного оборудования и методик исследования. Поэтому одинаковые термины (например,  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$ ) приобретают «индивидуальные» особенности: «первичные – вторичные», «органические – неорганические», «фильтруемые – конденсируемые», «городские – сельские» и т.п.

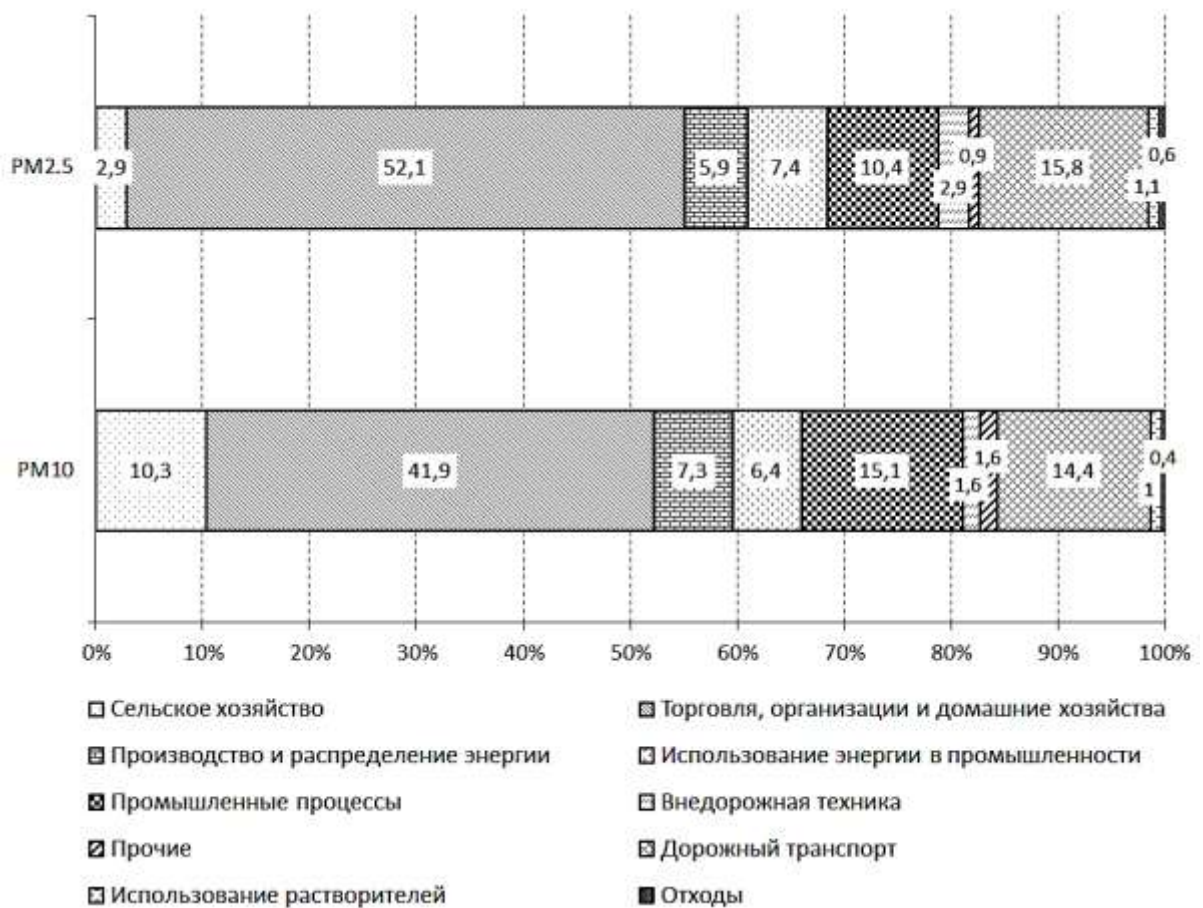


Рис. 3. Секторальный состав выбросов первичных ДЧ в Европе в 2011 году.

Источник: ЕЕА, 2013

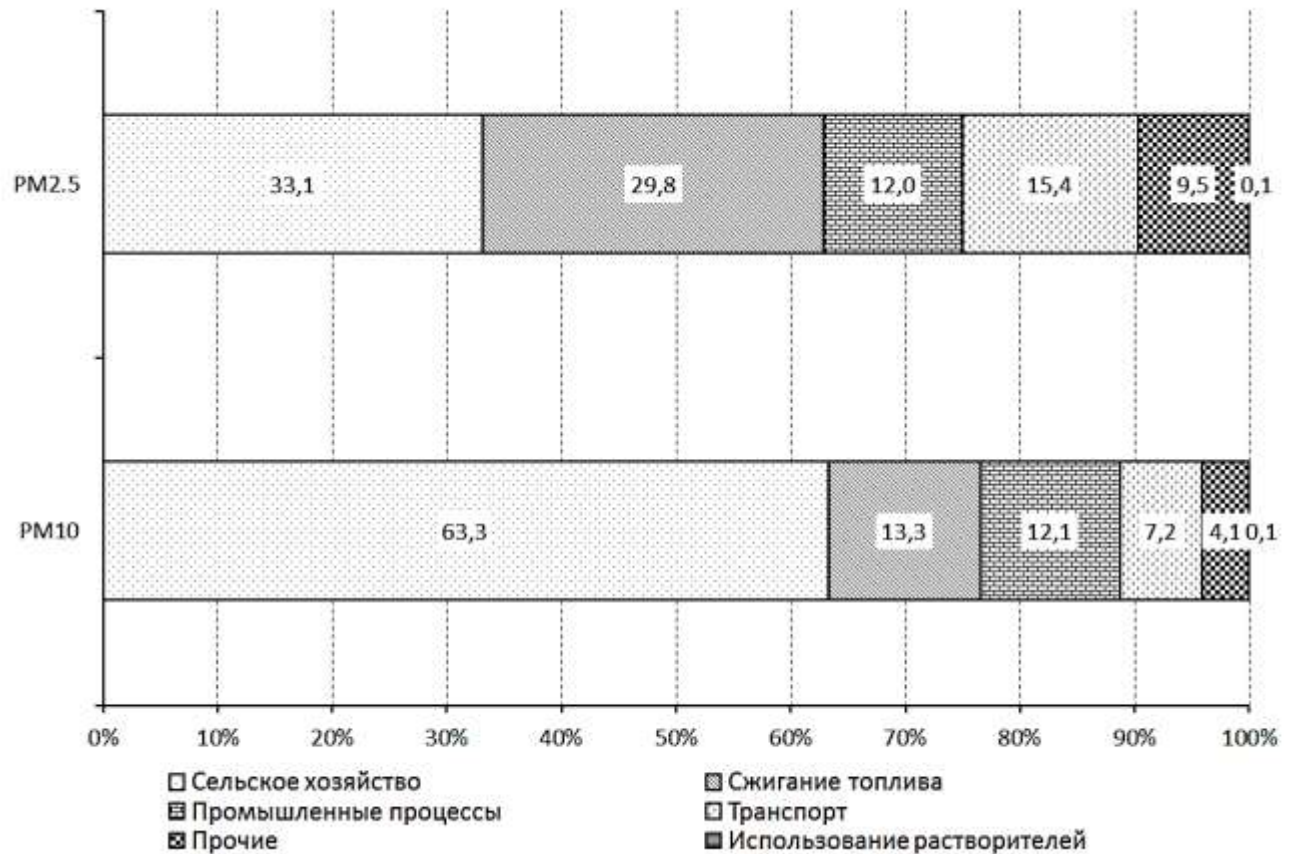


Рис. 4. Секторальный состав выбросов первичных ДЧ в США в 2011 году.

Источник: US EPA, 2013

В развитых странах отмечается устойчивая тенденция к снижению антропогенных выбросов ДЧ. Например, в ЕС в период с 2001 по 2010 годы первичные выбросы  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  сократились на 14% (см. рис. 5). Сократились также и выбросы газообразных веществ – предшественников образования вторичных ДЧ:  $SO_x$  – на 54%,  $NO_x$  – на 26%,  $NH_3$  – на 10%.

Однако эти снижения выбросов не привели к пропорциональному снижению уровней воздействия ДЧ на население, особенно городское: доля горожан, проживающих в зонах с превышением норм европейского законодательства по  $PM_{10}$ , составляет в ЕС 18...41%, и эта величина уменьшилась лишь незначительно в последнее десятилетие. Если же руководствоваться более жесткими нормами ВОЗ, то доля населения, проживающая в зонах с превышением норм по  $PM_{10}$ , составит более 80% [3].



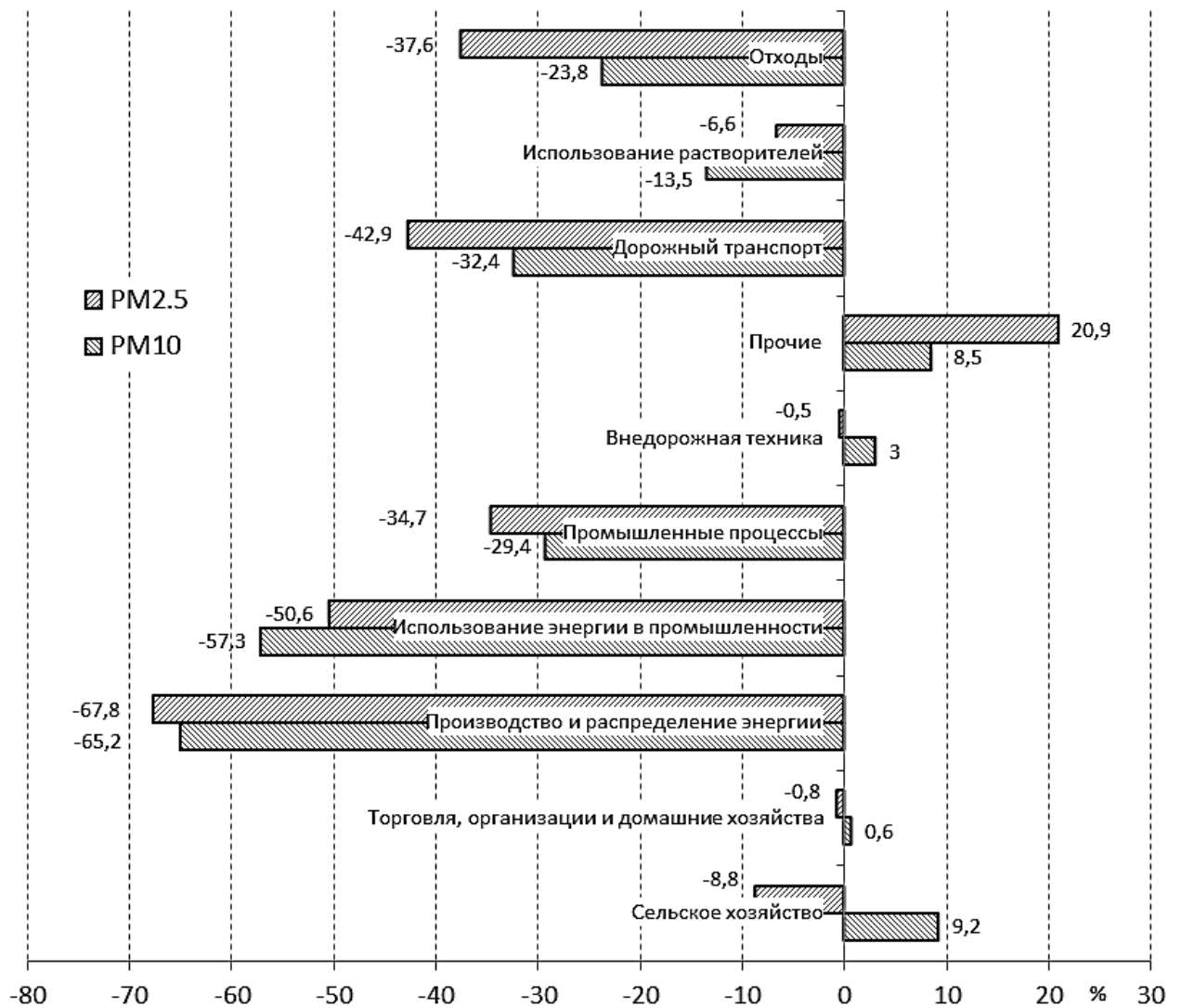


Рис. 5. Изменение первичных антропогенных выбросов ДЧ в ЕС за период с 1990 по 2010 годы. Источник: ЕЕА 2012

В последнее время большое внимание уделяется способности ДЧ оказывать влияние на климатическую систему. В связи с этим публикуется много исследований, в которых приводятся данные о выбросах «черного углерода» или сажи, «бурого углерода» и «органического углерода». Однако здесь также наблюдается довольно большая дисперсия представляемых данных (рис. 6, 7).

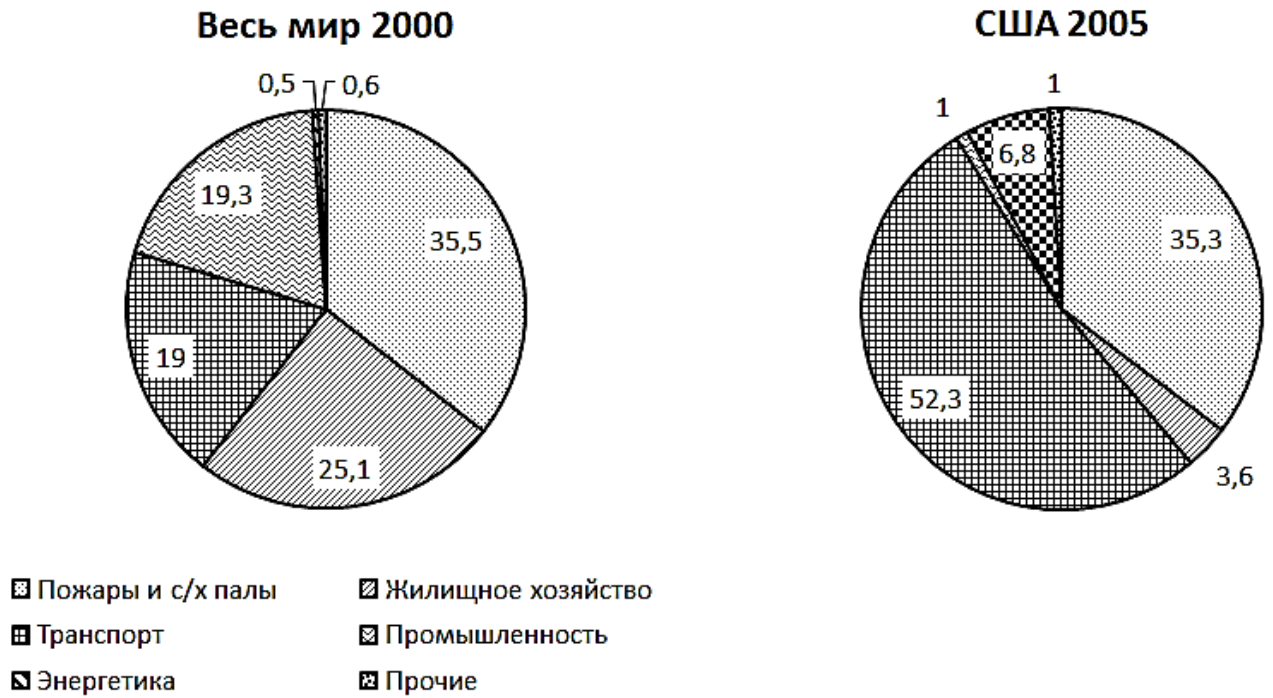


Рис. 6. Доля различных источников выбросов «черного углерода» (сажи) во всём мире и в США [4]

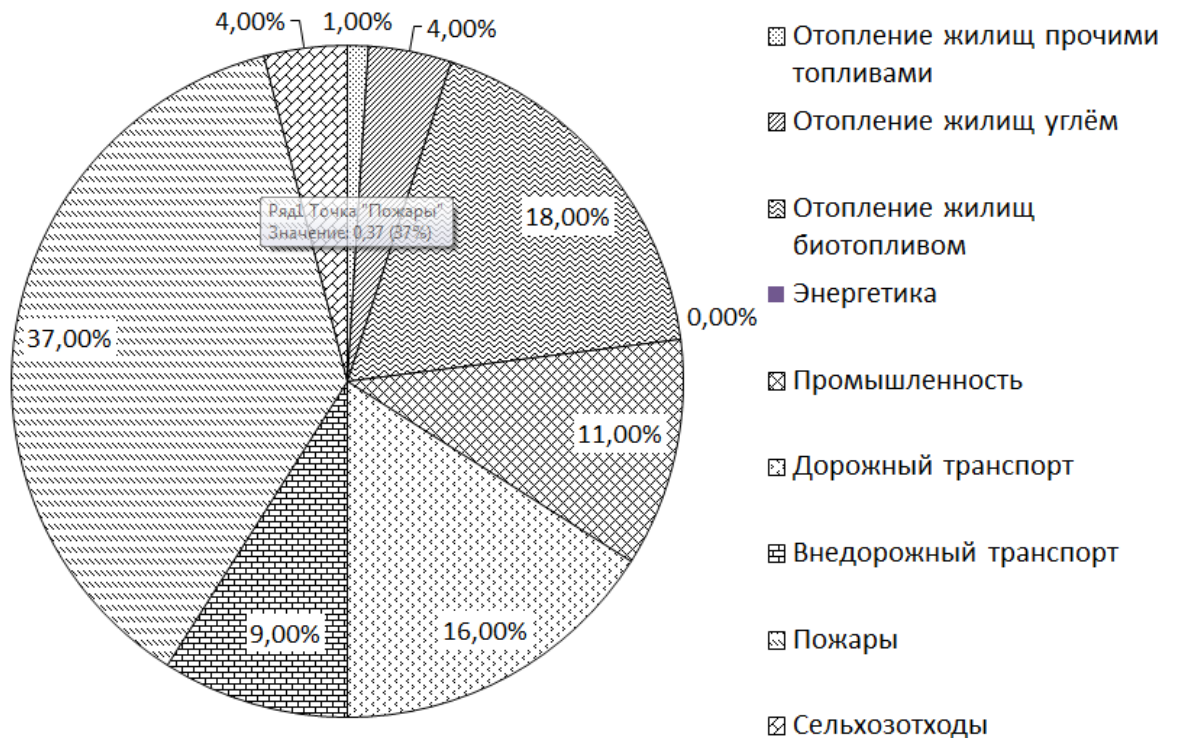


Рис. 7. Доли основных источников «черного» и «бурого» углерода в мире

Структура транспортных выбросов сажи также может существенно различаться даже в рамках одного государства (рис. 8).

Поэтому следует сделать вывод о том, что проводимые мероприятия по улучшению качества учётных данных должны включать в себя разработку и применение мер, способствующих направленному изучению качественного и количественного состава ДЧ. Такие действия будут способствовать более правильному выбору целей и проведению необходимых видов анализа.

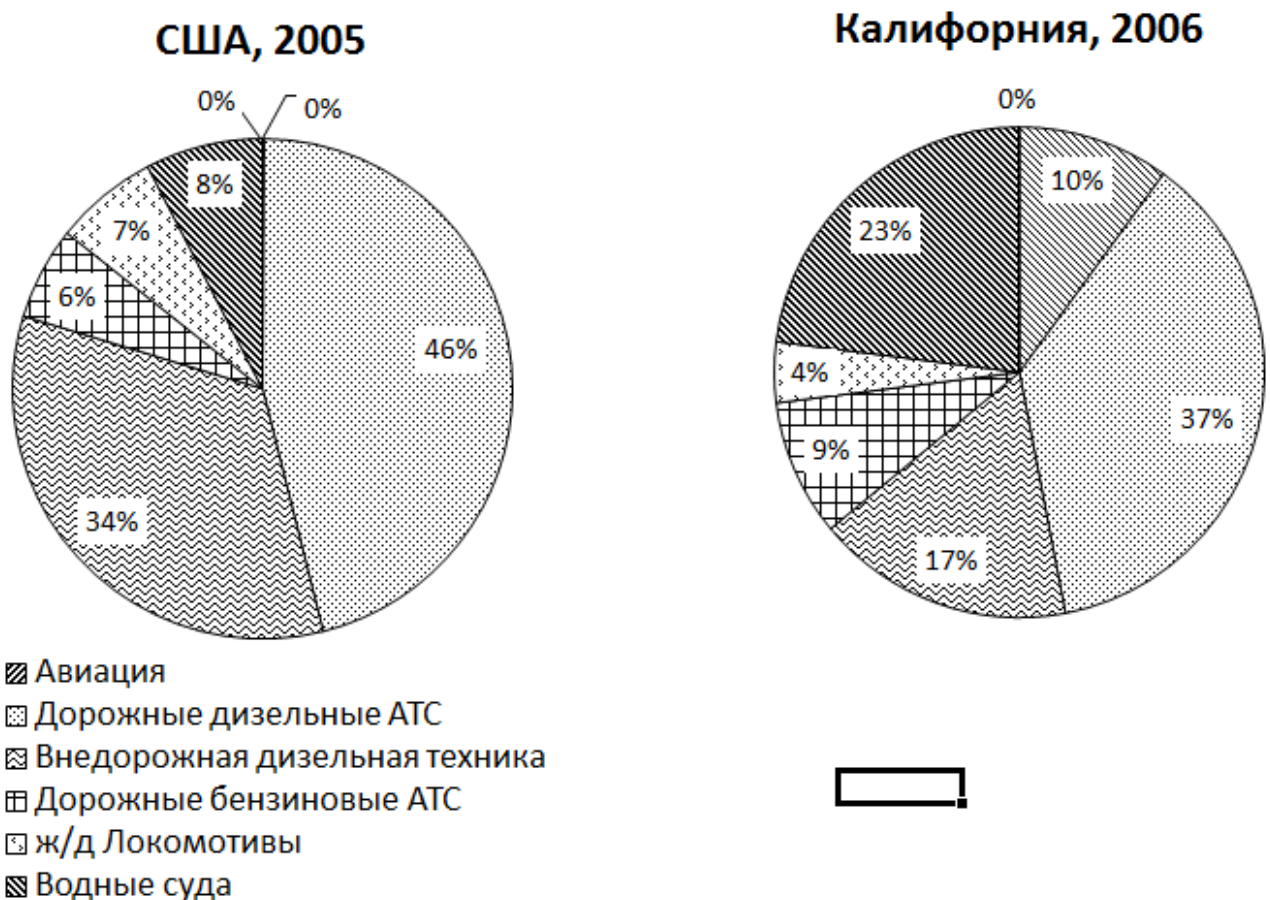


Рис. 8. Основные транспортные источники выброса «черного углерода» (сажи) в Калифорнии и США [5]

## 1.4. Гранулометрический и химический состав дисперсных частиц

### 1.4.1. Гранулометрический состав ДЧ и его характеристики

Распределение ДЧ в зависимости от их размера – важная физическая характеристика, определяющая поведение ДЧ в различных процессах.

В результате гранулометрического анализа в общем случае измеряется не размер частиц, а распределение частиц по их размерам в пробе. На практике используют дифференциальную и интегральную форму представления распределений. В первом случае распределение представляется в виде гистограммы, в которой высота столбика соответствует доле фракции с размером частиц  $q_3^*(X)$ , лежащем в некотором интервале от  $X_p$  до  $X_p + \Delta X_p$ . Во втором случае распределение описывается графиком, в котором по оси  $X$  откладывается размер частиц  $X_p$ , а по оси  $Y$  доля частиц с размером менее  $X_p$  –  $Q_3(X), \%$  (рис. 9).

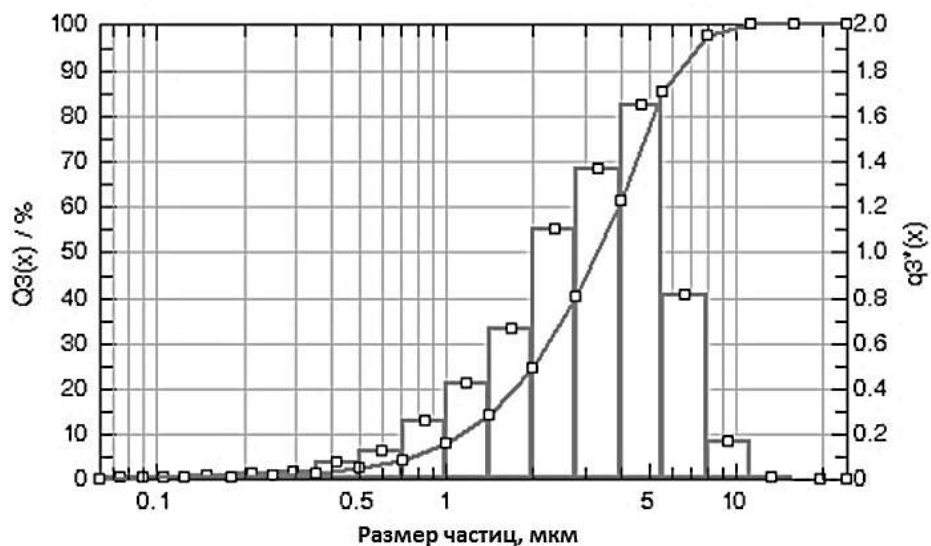


Рис. 9. Пример представления результатов гранулометрического анализа ДЧ

Поскольку размер ДЧ в атмосфере может изменяться на семь порядков величины, часто используют логарифмическую форму представления результатов. По оси абсцисс откладывают диаметр частиц  $D$  в логарифмическом масштабе, а по оси ординат –

дифференциальную концентрацию  $\Delta N/\Delta(\log D)$ , равную количеству частиц в  $1 \text{ см}^3$  воздуха, имеющих значение диаметра от  $\log D$  до  $\log(D + \Delta D)$ . Поскольку логарифмы не имеют размерности, следует представлять распределение как функцию  $\log(D/D_0)$ , где референсный диаметр  $D_0=1 \text{ мкм}$  не указан явным образом. Если  $\Delta N/\Delta(\log D)$  откладывается по оси ординат в линейном масштабе, то количество частиц с диаметром от  $D$  до  $D+\Delta D$  пропорционально площади под кривой распределения. Аналогичные соображения применяются для распределений частиц по их площади поверхности, объёму и/или массе.

Установлено, что распределение атмосферных ДЧ по размеру часто можно аппроксимировать суммой лог-нормальных распределений различных фракций. При этом вместо размерности  $\Delta N/\Delta(\log D)$  используют «дифференциальную» запись  $dN/d(\log D)$ .

Типичное количественное гранулометрическое распределение атмосферных ДЧ в сельской, пригородной, городской и городской придорожной территориях показано на графиках как с логарифмической (а), так и линейной (б) шкалой ординат (рис. 10). Из них видно, что подавляющее количество ДЧ относятся к нанодисперсному (т.е.  $< 0,1 \text{ мкм}$ ) диапазону.

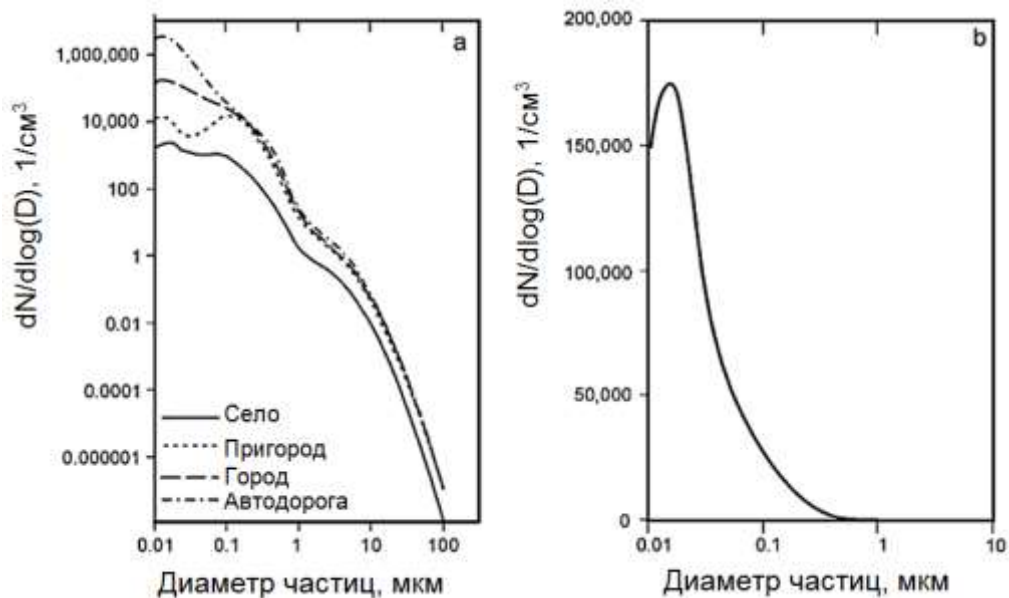


Рис. 10. Количественное гранулометрическое распределение атмосферных ДЧ в сельской, пригородной, городской и придорожной территориях

Построенные частично на тех же данных зависимости изменения объёма ДЧ от их размера показаны на следующем графике (рис. 11). Из него видно, что подавляющее количество объёма (а значит и массы) частиц занимают ДЧ размером более 0,1 мкм.

Важной особенностью данных распределений является их мультимодальность. Для типичных городских и сельских атмосферных ДЧ зависимости почти всегда носят бимодальный характер, распадаясь на две фракции: «грубую» – с размером более 1..3 мкм, и «тонкую» – с размером менее 1...3 мкм.

Типичные придорожные ДЧ, как правило, распадаются на три фракции: «зародышевую», «накопительную» и «грубую» (рис. 12).

«Зародышевая» фракция с размером частиц менее  $\cong 0,1$  мкм представляет собой главным образом вторичные ДЧ, образующиеся в атмосфере из газообразных примесей в ходе химических или физических (конденсация) процессов. Данную фракцию иногда называют «ультратонкой» или «наноразмерной».

«Накопительная» фракция с размером частиц  $\cong 0,1...2,5$  мкм представляет собой как первичные, так и вторичные ДЧ, формируемые в результате коагуляции<sup>1</sup> более мелких частиц.

«Грубая» фракция с размером частиц более  $\cong 2,5$  мкм состоит из первичных ДЧ различного происхождения, главным образом из продуктов износа дорожного полотна и продуктов выветривания горных пород.

---

<sup>1</sup> Коагуляция – явление сближения, слипания частиц дисперсной фазы в дисперсной системе под влиянием любых внешних или внутренних сил, в результате чего дисперсная система разделяется на две непрерывные фазы. Коагуляция может происходить при нагревании, замораживании, интенсивном перемешивании, пропускании электрического тока, добавлении электролитов или каких-либо других веществ.

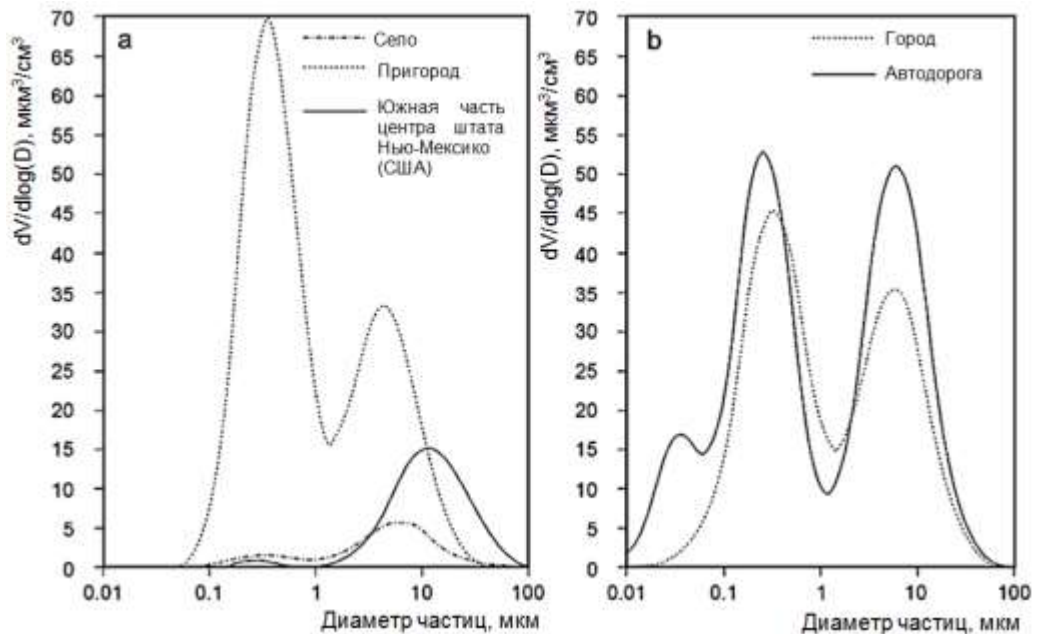


Рис. 11. Зависимости изменения объёма ДЧ от их размера для различных территорий: сельской, пригородной, городской, городской придорожной и южной части центра штата Нью-Мексико (США)

Следует отметить, что термины для обозначения различных фракций, приведённые выше, не являются эквивалентом терминов  $\text{PM}_{10}$  и  $\text{PM}_{2.5}$ , т.к. у последних определены только «правые» границы и то не явно, а через 50% эффективность прохождения через соответствующее разделительное устройство.

Также нет однозначного соответствия между частицами, попадающими под определение  $\text{PM}_{10}$  и  $\text{PM}_{2.5}$  и частицами «гигиенической» классификации (рис. 13).

Вообще термин  $\text{PM}_{10}$  появился в США в 1987 году как замена использовавшегося ранее термина (TSP) – «Общие взвешенные частицы». Смена термина произошла как для того, чтобы использовать более корректный в научном отношении термин (TSP, строго говоря, невозможно измерить), так и для обеспечения связи с гигиенической классификацией ( $\text{PM}_{10}$  почти совпадают с торакальной фракцией).

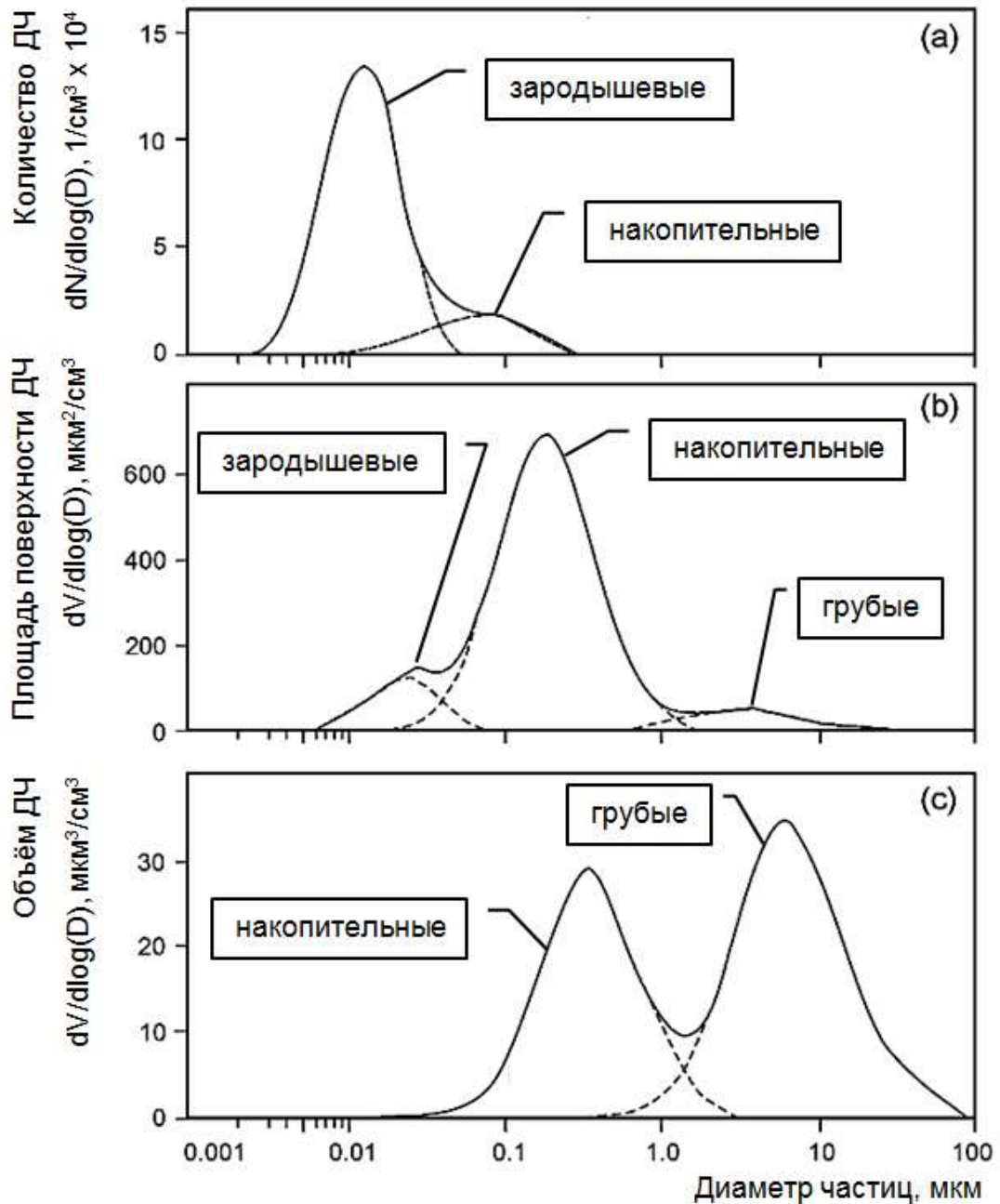


Рис. 12. Зависимости изменения количества, площади поверхности и объёма трёх фракций ДЧ (зародышевые, накопительные, грубые) от их размера

Термин  $PM_{2.5}$  появился в США в 1997 году на базе терминологии, использовавшейся при эпидемиологических исследованиях. Однако он не совсем точно согласуется с респираторной фракцией ДЧ, т.к. его использование в первую очередь связывалось с результатами мониторинга «тонкой» (анг. *fine*) фракции атмосферных ДЧ.



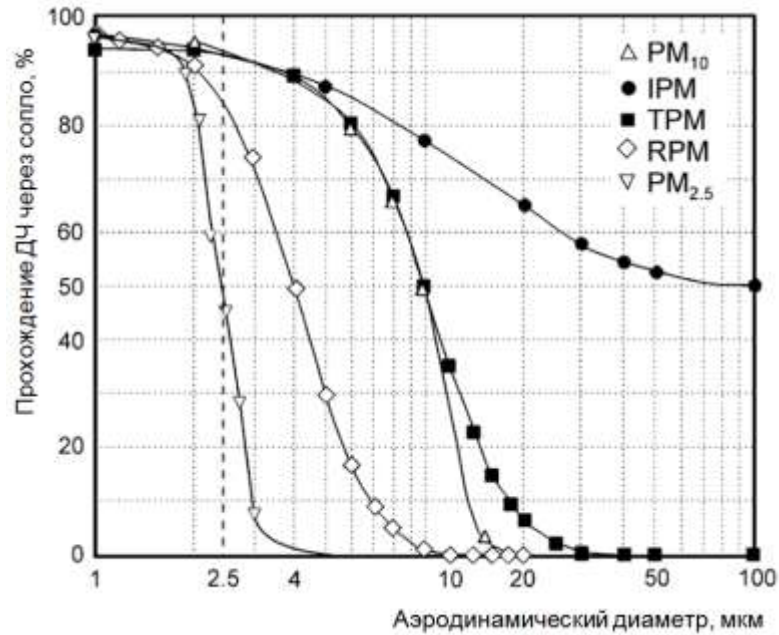


Рис. 13. Кривые прохождения пяти различных групп ДЧ через идеальное (без потери частиц) впускное сопло измерительной установки. IPM – вдыхаемая фракция, TPM – торакальная фракция, RPM – респирательная фракция

На приведённой ниже схеме показано примерное соответствие рассматриваемых терминов (рис. 14).

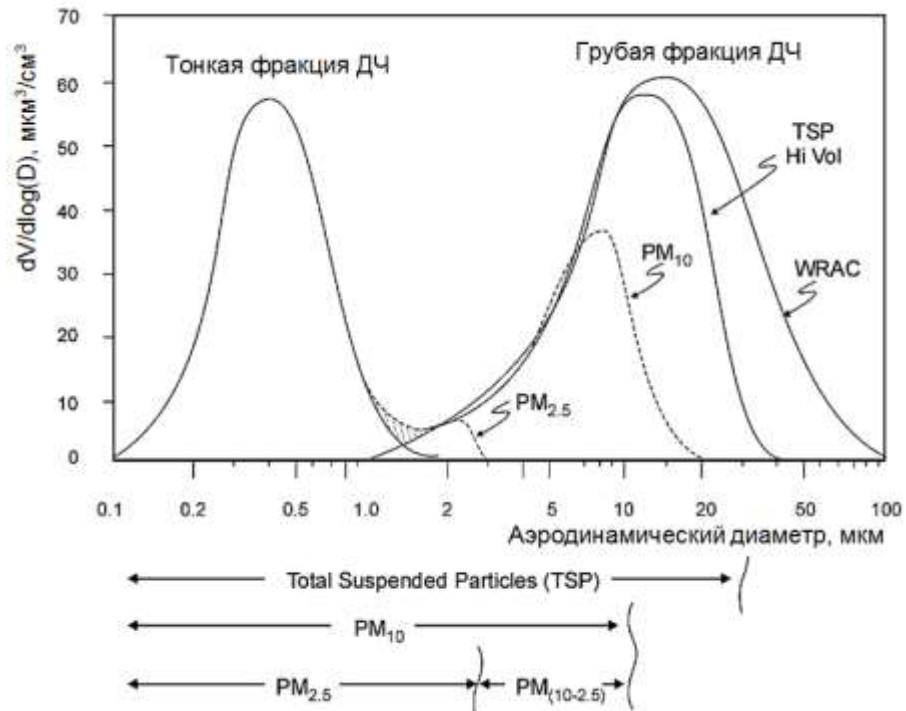


Рис. 14. Примерное соответствие терминов, используемых для описания гранулометрического состава ДЧ

Следует особо обратить внимание, что под определение  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  попадают и частицы с аэродинамическим диаметром больше, чем 10 и 2,5 мкм соответственно, т.к. в определениях этих терминов речь идёт о 50%-ной эффективности проникновения ДЧ через сортирующее устройство. Это ещё одна тонкость, которую зачастую интерпретируют ошибочно, полагая, что речь идёт только о частицах с диаметром, не превышающим 10 и 2,5 мкм соответственно.

Типичный размер ДЧ, выбрасываемых в атмосферу современными дизельными двигателями составляет 0,1 мкм. ДЧ диаметром до 0,1...1 мкм могут находиться в атмосферном воздухе в течение многих дней и недель и, соответственно, подвергаться переносу по воздуху на большие расстояния. Кроме того, эти частицы несут на своей поверхности канцерогенные компоненты. Одна частица диаметром 10 мкм имеет приблизительно ту же самую массу, как и 1 миллион частиц диаметром 0,1 мкм, но это гораздо менее опасно, поскольку наноразмерные ДЧ имеют отличную адсорбционную и проникающую способность.

#### **1.4.2. Химический состав типичных атмосферных ДЧ**

ДЧ являются, в основном, сложной гетерогенной смесью многих компонентов (рис. 15), причём их свойства (гранулометрический и химический состав) изменяются во времени и пространстве и зависят от вида и мощности рассматриваемых источников выброса ДЧ, метеорологических условий, а также множества других факторов и изучены значительно меньше по сравнению с газовыми примесями [6]. Зачастую исследования гранулометрического состава, химического состава и физических свойств ДЧ проводятся отдельно и не связаны друг с другом, что не позволяет получить комплексную картину всех характеристик ДЧ. В первую очередь это связано с разницей в методах измерения гранулометрических, физических и химических характеристик ДЧ и, соответственно, с необходимостью иметь полный спектр дорогостоящего измерительного оборудования.

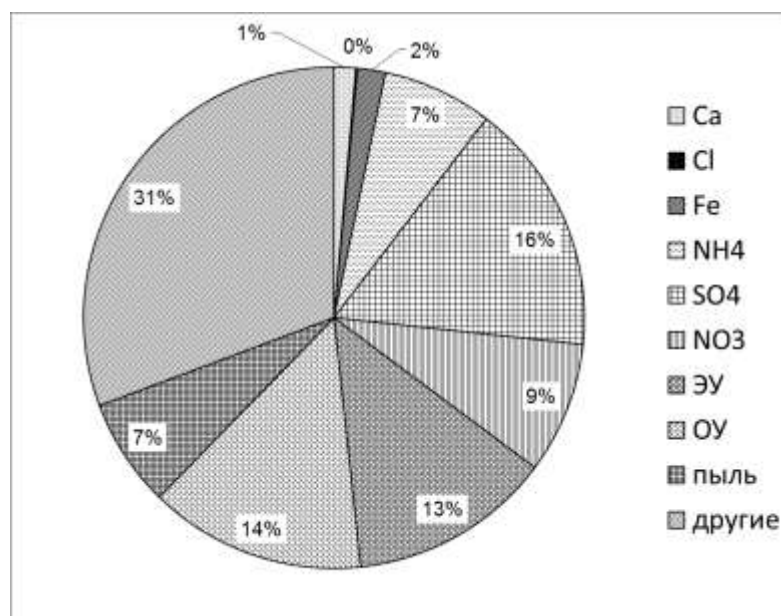


Рис. 15. Химический состав типичных «городских»  $PM_{10}$  (данные БАСТ, ФРГ)

Отдельные исследования, тем не менее, показывают, что химический состав ДЧ сильно варьируется в зависимости от их сортировки по размерам. Особенно это касается ДЧ, отобранных в атмосфере, где происходит смешивание выбросов первичных ДЧ из различных источников, а также образование вторичных ДЧ из прекурсоров различного происхождения. Например, химический анализ разных фракций ДЧ, отобранных в районе строительства автомагистрали в Фресно (Калифорния, США) показал, что в крупнодисперсной и среднедисперсной фракциях преобладающую массу имеют кремний (Si), алюминий (Al) и железо (Fe), т.е. составляющие минеральной пыли; тогда как в мелкодисперсной фракции преобладающую массу имеют элементарный углерод (ЭУ) и органический углерод (ОУ), т.е. составляющие отработавших газов ДВС и вторичных ДЧ.

В категорию «грубых» ДЧ попадают и большинство биогенных ДЧ: пыльца, споры грибов, бактерии и т.п.

В категорию «органический углерод» попадает масса углеводородных соединений, часть из которых относится к полуволетучим (анг. *semi-volatile*), т.е. эти соединения при обычных атмосферных условиях могут одновременно находиться в газообразной и жидкой

фазах. Наличие таких веществ затрудняет воспроизводимость результатов их измерения, поскольку газовая фаза может конденсироваться на пробоотборнике и фильтрующем материале измерительного прибора (положительное влияние), и, наоборот, жидкая фаза может испаряться на пробоотборнике и фильтрующем материале измерительного прибора (отрицательное влияние). Поэтому условия проведения измерений являются важным фактором, влияющим на получаемые результаты. При проведении нормативных измерений выбросов и концентраций ДЧ всегда строго придерживаются оговоренных условий.

Следует также отметить, что в настоящее время не существует точных аналитических методов идентификации всех органических соединений, присутствующих в составе ДЧ. Поэтому доля «прочих» или «неопознанных» соединений достаточно велика.

В Европе примерно 33% массы частиц  $PM_{10}$  и 50%  $PM_{2,5}$  составляют *неорганические* ДЧ – аммоний ( $NH_4^+$ ), нитраты ( $NO_3^-$ ) и сульфаты ( $SO_4^{2-}$ ). Примерно 20% массы частиц  $PM_{10}$  и 30%  $PM_{2,5}$  составляют *органические* ДЧ – летучие углеводороды, способные существовать как в жидком, так и газообразном состоянии, что затрудняет их четкую идентификацию. Отмечается связь между эпизодами повышенных концентраций органических ДЧ и повышенной концентрацией озона, поскольку они образуются в цепи аналогичных химических реакций [3].

### **1.5. Частицы «черного углерода» в составе ДЧ. Их влияние на изменение климата**

Согласно подсчетам МГЭИК, результат положительного антропогенного воздействия на атмосферу с 1750 года составил, в среднем,  $1,6 \text{ Вт/м}^2$  (от 0,6 до 2,4), что послужило причиной увеличения средней глобальной температуры на  $0,8^\circ\text{C}$  ( $\pm 0,2$ ) со второй половины XIX века [7] (рис. 16).

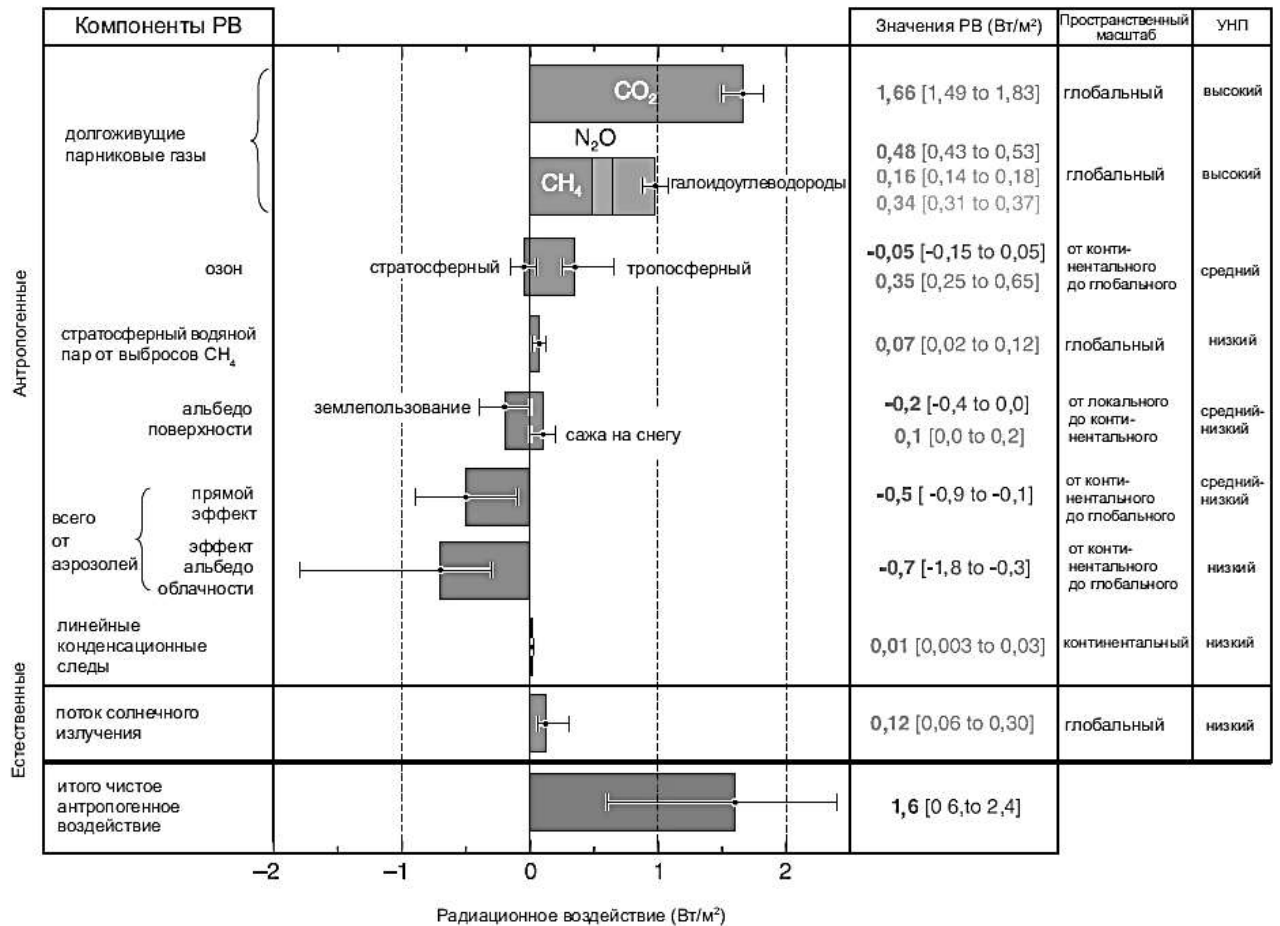


Рис. 16. Компоненты глобального радиационного воздействия (РВ) и уровень научного понимания (УНП) в 2005 году [8]

ДЧ могут воздействовать на климат двумя способами: **непосредственно**, путём рассеивания или поглощения излучения, и **косвенно**, действуя в качестве ядер конденсации, вокруг которых формируются облака, или путём изменения оптических свойств и продолжительности жизни облаков.

### Непосредственное воздействие ДЧ на климатическую систему Земли

ДЧ размером свыше 0,1 мкм могут отражать или рассеивать солнечный свет, изменяя оптические характеристики атмосферы, а также осаждаться на поверхности криосферы, тем самым участвуя в изменении общего альbedo<sup>1</sup> земной поверхности.

<sup>1</sup> Альbedo – доля солнечной радиации, отражённая поверхностью или предметом, зачастую выражаемая в процентах.

Понятие «**чёрный углерод**» (анг. *black carbon*) относится к любым ДЧ, которые образуются в процессе горения и обладают ярко выраженными светопоглощающими свойствами. Однако основной компонент таких частиц – **сажа** (или **элементарный углерод** или иногда **неорганический углерод**), поэтому в дальнейшем эти термины будут использоваться как синонимы. Частицы с менее выраженными светопоглощающими свойствами определяются как «**бурый углерод**» (анг. *brown carbon*), хотя данный термин не корректен, т.к. данными свойствами обладают не только органические, но и неорганические (например, летучая зола) ДЧ, достаточно сложного состава. Наконец, ДЧ с наименее выраженными светопоглощающими свойствами иногда называют «**органическим углеродом**», что также некорректно, т.к. наряду с органическими составляющими в их состав входят неорганические – сульфаты, нитраты и т.п. Размеры таких частиц различны, однако, в целом они значительно меньше 2,5 мкм, чаще всего не более 0,1 мкм. Данные вещества всегда являются составной частью выбросов ДЧ в атмосферу в результате сгорания. Тем не менее, их количество зависит от типа горючего, вида горения, эффективности технологий или мер по контролю выбросов.

Термины «черный углерод», «бурый углерод» и «органический углерод» – крайне неудачные термины, вносящие дополнительную путаницу в и без того запутанную сферу изучения ДЧ. Следовало бы использовать термины «**полностью светопоглощающие ДЧ**», «**частично светопоглощающие ДЧ**» и «**светоотражающие ДЧ**».

Наряду с другими аэрозольными частицами, сажа вымывается из атмосферы через несколько тысяч километров от источника загрязнения, поэтому её тепловой эффект сравнительно недолговечен. Срок нахождения частиц сажи в атмосфере обычно не превышает одной недели. Однако этот показатель может достигать и трёх недель в зависимости от типа сгорания и местоположения выбросов. В отличие от сажи срок существования углекислого газа в атмосфере намного длиннее. Большая часть  $\text{CO}_2$ , выбрасываемого сегодня, будет

оказывать влияние на климат в течение последующих 30...100 лет, а иногда и дольше.

Частицы сажи являются важными примесями, способствующими разогреву атмосферы и последующим изменениям климата. Это связано с их способностью поглощать световую энергию. Согласно подсчетам МГЭИК, положительное тепловое воздействие сажи может достигать  $0,34 \text{ Вт/м}^2 (\pm 0,25)$ . Результаты исследований, упоминающиеся в докладе МГЭИК, показывают, что разогревающие свойства сажи могут усиливаться, если её частицы становятся частью или смешиваются с другими веществами, обладающими светорассеивающей способностью, например, с сульфатами. Тем не менее модели, используемые для расчетов МГЭИК, не учитывают такой эффект. Поэтому вполне вероятно, что приводимые выше цифры занижены.

Последствием разогрева атмосферы является не только увеличение температуры, но и изменение режима осадков, а также снижение видимости в приземном слое. Струи выбросов ДЧ могут подавлять конвективные потоки и стабилизировать атмосферу, тем самым препятствуя выпадению осадков. Выбросы ДЧ затуманивают поверхность Земли и затрудняют процессы испарения, что мешает формированию облаков.

Благодаря разогревающим свойствам, сажа также провоцирует изменения в отражательной способности или альbedo светлых поверхностей, таких как снег и лёд. При обычных условиях такие поверхности отражают значительную часть солнечного света. Однако частицы сажи, располагающиеся на или над ними, способны абсорбировать большое количество солнечной энергии и выделять её в виде тепла. Такой эффект может приводить к снижению количества отраженной солнечной энергии, а также может вызывать исчезновение облаков и таяние снега и льда. Таким образом, запускается механизм положительной обратной связи, при котором сокращение площади снежных и ледяных поверхностей способствует дальнейшему разогреванию атмосферы, в результате которого таяние снега и льда происходит ещё быстрее. Согласно подсчетам МГЭИК, в результате

снижения эффекта альбедо тепловое воздействие сажи может достигать  $0,1 \text{ Вт/м}^2 (\pm 0,1)$ .

Суммарное тепловое воздействие сажевых частиц с учётом изменения отражательной способности светлых поверхностей, по данным МГЭИК, составляет  $0,44 \text{ Вт/м}^2 (\pm 0,35)$ . Это ставит сажу на третье место после углекислого газа и метана среди веществ, оказывающих влияние на изменение климата.

Сажа выбрасывается в атмосферу вместе с другими загрязняющими веществами, которые отражают свет и тем самым снижают её разогревающие свойства. Сюда относятся первичный и вторичный органический углерод, сульфаты и нитраты, которые образуются в различных количествах в зависимости от характера горения и типа горючего. Суммарный эффект таких выбросов будет зависеть от явлений переноса сажи и её осаждения на снежных или ледяных поверхностях. Таким образом, даже если выбросы сажи сопровождаются выбросами веществ с отрицательными тепловыми характеристиками, их суммарный разогревающий эффект всё равно может быть положительным в случае, если достаточное количество сажи осаждается в Арктике или на поверхности горных ледников.

МГЭИК рассчитала ПГП для всех основных парниковых газов на периоды 20, 100 и 500 лет ( $\text{ПГП}_{20}$ ,  $\text{ПГП}_{100}$  и  $\text{ПГП}_{500}$  соответственно), поскольку выбор горизонта времени является необходимым требованием к применению данного показателя. Однако в случае с частицами сажи такой выбор может оказаться проблематичным, т.к. значения ПГП будут варьировать. Это объясняется тем, что коротко- и долгоживущие примеси обладают различными разогревающими способностями. Разогревающий эффект сажи может полностью прекратиться через 20 лет, в то время как тепловое воздействие  $\text{CO}_2$ , который является «долгоживущим» газом, уменьшится за этот период лишь частично. Это объясняет, почему  $\text{ПГП}_{100}$  для сажи будет намного меньше, чем  $\text{ПГП}_{20}$ .

Сажа оказывает существенное влияние на климат. Об этом говорят значения её ПГП (табл. 1).



Потенциал глобального потепления (ПГП) некоторых примесей,  
вычисленный на основе данных МГЭИК [7]

Примесь	ПГП <sub>20</sub>	ПГП <sub>100</sub>	ПГП <sub>500</sub>
<b>Сажа</b>	<b>1600</b>	<b>460</b>	<b>140</b>
Метан	72	25	7,6
Закись азота	289	298	153
Оксиды серы	-140	-40	-12
Органический углерод	-240	-69	-21
Углекислый газ	1	1	1

Примечания. 1) Методика вычислений, применявшаяся в случае сажи, была использована также для органического углерода и оксидов серы. Значения для сажи, органического углерода и оксидов серы не публиковались МГЭИК и являются неофициальными. 2) МГЭИК относит к категории «технического углерода» сажу, частицы древесного угля и устойчивый к высоким температурам органический углерод. Однако последние два наименования поглощают на единицу массы в 5...10 раз меньше солнечного света, чем сажа, поэтому значение их ПГП будет меньше.

Подход, использованный для определения ПГП для сажи, органического углерода и оксидов серы в работе [7], можно считать консервативным, т.к. он учитывает ПГП только для прямого воздействия сажи и исключает не прямое воздействие и эффект альбедо.

Так, согласно более поздним американским исследованиям, сажа обладает ПГП<sub>20</sub>=4000, и ПГП<sub>100</sub>=1500...2240. Учитывая это обстоятельство, а также объёмы выбросов сажи в атмосферу, можно говорить о том, что сажа является второй по значимости парниковой примесью после CO<sub>2</sub>.

Использование показателя ПГП подразумевает, что тепловой эффект сравниваемых парниковых агентов распределяется равномерно по всей атмосфере и не зависит от местоположения выбросов. Однако если учитывать короткий срок жизни частиц сажи и их региональную концентрацию, то данное предположение не выдерживает критики. Короткоживущие аэрозоли распространяются на небольшие расстояния и имеют ярко выраженное региональное воздействие на атмосферу, иногда называемое «горячей точкой». Местоположение и

продолжительность воздействия будут зависеть от местных условий, которые оказывают влияние на срок жизни и распространение веществ. Из этого следует, что две различные порции выбросов сажи с одинаковым ПГП не обязательно будут производить одинаковый тепловой эффект, т.е. значение ПГП для сажевых частиц не всегда может быть представлено в CO<sub>2</sub>-эквиваленте.

Региональное тепловое воздействие сажи на атмосферу может оказывать влияние на климат как в региональном, так и в глобальном масштабе. Тепловой эффект может распространяться далеко за пределы местоположения агента. В совокупности множественные очаги разогрева создают глобальную проблему.

МГЭИК признает ограниченность использования ПГП в случае короткоживущих парниковых агентов и в докладе 2007 года призывает разработать для них новые показатели.

Показателем, альтернативным ПГП, является потенциал изменения глобальной температуры (ПГТ). Он представляет собой соотношение изменения температуры в результате воздействия импульсных выбросов парникового агента к изменению температуры от импульсных выбросов углекислого газа. Долго- и короткоживущие агенты со сходными значениями ПГТ будут оказывать равносильное воздействие на изменение среднегодовой глобальной температуры. Таким образом, показатель ПГТ позволяет рассчитывать тепловое воздействие сажи в CO<sub>2</sub>-эквиваленте с большей точностью, чем ПГП (табл. 2).

*Таблица 2*

Потенциал изменения глобальной температуры (ПГТ) некоторых примесей [9]

Примесь	ПГТ <sub>20</sub>	ПГТ <sub>100</sub>
<b>Сажа</b>	<b>470</b>	<b>64</b>
Метан	57	4
Закись азота	303	265
Оксиды серы	-71	-10
Органический углерод	-41	-5,7
Углекислый газ	1	1

### 1.5.2. Косвенное воздействие ДЧ на климатическую систему

Дисперсные частицы могут являться причиной косвенного радиационного воздействия на климатическую систему, выполняя функцию ядра конденсации или изменяя оптические свойства и продолжительность жизни облаков. Различают два вида косвенного воздействия:

- первое – радиационное воздействие, обусловленное повышением содержания ДЧ антропогенного происхождения, являющихся причиной увеличения концентрации капелек воды в жидкой фазе и уменьшения их размеров, что ведёт к увеличению альбедо облаков. Этот эффект также известен под названием «**эффект Туми**» или «**эффект альбедо облаков**»;
- второе – радиационное воздействие, обусловленное повышением содержания ДЧ антропогенного происхождения, являющихся причиной уменьшения размеров капелек воды, что снижает вероятность выпадения осадков и тем самым изменяет толщину облачного покрова и продолжительность жизни облаков. Этот эффект также известен под названием «**эффект Альбрехта**» или «**эффект продолжительности жизни облаков**».

### 1.6. Характеристики поведения ДЧ в атмосфере. Время жизни в атмосфере

В состав ДЧ входят мелкодисперсные и нанодисперсные ДЧ с объединяющим термином «тонкие» ДЧ. Образование и поведение данных фракций в атмосфере различно.

#### Образование нанодисперсной («зародышевой») фракции ДЧ в атмосфере

Наиболее важный параметр, характеризующий образование и рост ДЧ в атмосфере, – степень насыщенности паров примесей-прекурсоров  $S$ , определяемая как отношение парциального давления примеси  $p$  к равновесному давлению насыщенного пара данной примеси над плоской поверхностью,  $p_0$ :  $S=p/p_0$ . Чтобы начался процесс конденсации,

необходимо, чтобы парциальное давление превышало давление насыщенного пара. Однако при наличии в воздухе ДЧ давление насыщенных паров будет отличаться от  $p_0$  по крайней мере по двум причинам: во-первых, поверхность ДЧ не плоская, а выпуклая, что увеличивает давление насыщенных паров, облегчая конденсацию, и во-вторых, ДЧ как правило гетерогенны, т.е. содержат различные примеси, что приводит к сложному суммарному воздействию на давление насыщенных паров исследуемой примеси. Например, наличие нелетучей соли в морских аэрозолях уменьшает давление насыщенных паров воды, что препятствует её конденсации.

Конденсируемая примесь может оседать на поверхности уже существующих ДЧ или образовывать новые ДЧ. Преобладание того или иного процесса зависит от наличия в воздухе ДЧ, точнее от суммарной площади поверхности этих ДЧ. В случае если эта площадь достаточно большая (например, в городском воздухе), конденсат оседает на поверхности существующих ДЧ, увеличивая их размеры и массу. Если же в воздухе практически не содержится ДЧ (например, в удалённых, «чистых» территориях), образуются новые ДЧ в результате случайных флуктуаций парциального давления примеси.

В атмосфере в первую очередь происходит конденсация примесей, имеющих низкое равновесное давление насыщенных паров. Выделяют четыре класса примесей, наиболее подверженных конденсации при обычных условиях:

- частицы, содержащие металлы. Источниками выброса таких частиц являются процессы сжигания топлив и масел, содержащих металлы в качестве примесей;
- элементарный углерод или сажа. Источниками выброса ЭУ являются процессы горения углеводородных топлив или материалов;
- сульфаты и нитраты. Образуются в атмосфере в результате реакций между выбрасываемыми оксидами серы и азота, аммиаком и водяным паром;

- органический углерод. Образуется в атмосфере в результате реакций между различными углеводородами.

Кроме конденсации газообразных примесей, существует ещё два механизма формирования «зародышевых» ДЧ: адсорбция<sup>1</sup> газообразных примесей на поверхности существующих частиц и растворение газообразных примесей<sup>2</sup> в водяной плёнке на поверхности существующих частиц. Последнее обстоятельство показывает, что на процессы формирования ДЧ оказывает существенное влияние относительная влажность воздуха.

### **1.6.2. Образование мелкодисперсной («накопительной») фракции ДЧ в атмосфере**

В результате процессов коагуляции и продолжающейся конденсации «зародышевые» частицы укрупняются и формируют «накопительную» фракцию ДЧ. Однако поскольку процессы коагуляции и конденсации по мере увеличения размеров ДЧ становятся менее эффективными, дальнейшего роста частиц из «накопительной» в «грубую» фракцию не происходит.

### **1.6.3. Процессы переноса ДЧ в атмосфере и описывающие их математические модели**

Время пребывания ДЧ в атмосфере зависит от их размеров и плотности, состояния атмосферы (скорости ветра, температурной стратификации атмосферы, процессов конвекции или инверсии). Крупные частицы обычно не переносятся в верхние слои атмосферы и оседают в течение нескольких часов вблизи источников их образования с рассеиванием у земной поверхности в подветренную сторону. Мелкие частицы (размер частицы меньше 1 мкм) имеют время пребывания в нижних слоях атмосферы 10...20 суток, что достаточно для их

---

<sup>1</sup> Адсорбция – процесс перехода растворенного вещества или газа из объёмной фазы в поверхностный слой. Адсорбент – жидкость или твёрдое тело, способное сгущать на своей поверхности газ или растворённое вещество, т.е. осуществлять адсорбцию.

<sup>2</sup> Водорастворимых, например, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>.

распространения на большие расстояния от источников образования. При этом за счёт перемещений воздушных потоков они могут проникать в верхние слои тропосферы и из них в стратосферу.

В стратосфере время жизни наиболее мелких частиц составляет около трёх лет, в тропосфере оно гораздо меньше – от нескольких месяцев до дней, в зависимости от физико-химических свойств ДЧ. Время жизни аэрозолей промышленного происхождения близко к этой величине и приблизительно равно 30 дням, а малогигроскопичных и нерастворимых частиц (до 5 мкм) – 2...4 месяца [10].

Для оценки концентраций ДЧ в атмосфере могут использоваться широко распространённые модели расчёта турбулентной диффузии<sup>1</sup> различной степени сложности:

а) упрощённая модель расчёта концентраций ДЧ с постоянными коэффициентами поглощения различными поверхностями;

б) модель средней сложности с переменными коэффициентами диффузии и поглощения;

в) модели, учитывающие влияние на рассеивание ЗВ различных природно-климатических факторов, рельефа местности, застройки территории, характеристик подстилающих поверхностей, процессов, происходящих в атмосфере. Одна из наиболее достоверных отечественных моделей реализована, например, в программно-методическом комплексе ZONE [11].

Использование моделей турбулентной диффузии для оценки концентраций ДЧ (как для газообразных веществ) правомерно, исходя из достаточно продолжительного времени их пребывания в атмосфере.

Методы оценки распространения ДЧ в атмосфере связаны с описанием переноса и стока транспортного загрязнения за счёт осаждения, вымывания осадками и пр. [12] и связаны с использованием различных расчётных моделей рассеяния (от простых – скрининговых

---

<sup>1</sup> Диффузия – самопроизвольный процесс выравнивания концентрации молекул, ионов или коллоидных частиц под влиянием их теплового движения. Процесс диффузии идёт самопроизвольно, поскольку он сопровождается увеличением энтропии системы (равномерное распределение вещества в системе отвечает её наиболее вероятному состоянию).

для описания общих принципов распространения, до более сложных для детальной проработки профилей загрязнения). В большинстве случаев концентрация ДЧ рассматривается как функция мощности источника загрязнения и зависит от расстояния до него. С учётом этого для оценки уровня загрязнения принято выделять четыре зоны:

- зона выброса – дорога с движущимися по ней АТС и объекты дорожного сервиса;
- придорожная зона – территория вблизи дороги, где возможны накопления выбросов от автомагистрали (уличные тротуары до застройки, лесополосы);
- зона влияния – территория непосредственного влияния (пространства, где уровень транспортного загрязнения способен нанести вред);
- фоновая зона – территория, на которой вклад транспорта в уровень загрязнения отсутствует или ничтожно мал.

Наличие большого количества моделей распространения ДЧ в атмосфере позволяет сгруппировать их по возможности оценки уровней воздействия на население в различных зонах (табл. 3).

Таблица 3

#### Сферы использования различных моделей расчёта концентраций ДЧ

Тип	Характеристика	Зона воздействия		
		выброса	придорожная	влияния
Параметрические	Статистические	+	+	+
	Рецепторные	-	+	+
	Скрининговые	-	+	+
	Гауссовы	-	+	+
	Уличных каньонов	+	+	-
	Блочные	+	+	-
Численные		+	+	+

Наиболее распространёнными для оценки уровня загрязнения в зоне выброса являются статистические модели.

Важной особенностью в оценке формирования транспортного загрязнения, в том числе ДЧ, является то, что примеси перераспределяются в окружающей среде под действием её объектов (подстилающих поверхностей, движущихся автомобилей, древесно-

кустарниковой растительности и т.п.). В таких случаях говорят об учёте стока загрязнения (например, осаждении на ограждающих поверхностях, включая растительность), изменении свойств (например, химического и физического преобразования). Трансформацию ДЧ связывают с солнечной активностью, климатическими особенностями, взаимодействием с другими компонентами выбросов и т.п.

#### **1.6.4. Процессы удаления ДЧ из атмосферы**

Удаление (сток) ДЧ из атмосферы происходит, в основном, в результате вымывания частиц осадками, в результате седиментации, а также в результате улавливания зелёными насаждениями и другими живыми организмами.

Одним из главных процессов удаления ДЧ из атмосферы является очищение воздуха осадками. Капли облаков формируются вокруг ДЧ и, выпадая осадками, увлекают их с собой. Кроме того, падающая дождевая капля сталкивается с «грубыми» ДЧ, поглощает их и удаляет из атмосферы. «Зародышевые» ДЧ достаточно малы, чтобы диффундировать в падающую дождевую каплю и вместе с ней удаляться из атмосферы. «Накопительные» ДЧ также практически не удаляются дождевыми осадками из атмосферы.

При оценке удаления ДЧ из воздуха осадками важную роль отводят их виду (дождь, снег, туман и т.д.) и интенсивности.

Менее эффективный механизм удаления ДЧ из атмосферы – седиментация или осаждение под действием силы тяжести. Вклад седиментации в общую скорость удаления ДЧ из атмосферы в умеренных широтах составляет примерно 10...20%. Конденсационный и коагуляционный рост частиц увеличивает их размеры и скорость осаждения. Сажевые частицы не взаимодействуют с кислородом воздуха и поэтому удаляются только за счёт коагуляции и осаждения, которые идут очень медленно.

Роль зелёных насаждений в улавливании ДЧ связывается с процессами адсорбции ДЧ на поверхности листьев, а также с процессами газообмена, протекающими в ходе фотосинтеза и



клеточного дыхания [13]. Однако удаление растениями ДЧ в реальной городской среде должным образом пока не формализовано.

### **1.7. Характеристика автотранспорта как источника ДЧ**

Основными источниками выбросов ДЧ, связанными с функционированием автомобильного транспорта, являются:

- отработавшие газы двигателей АТС;
- износ автомобильных шин;
- абразивный износ и коррозия материалов в конструкции автомобиля (тормозные механизмы, сцепление и т.п.);
- износ дорожного покрытия;
- пыление при движении АТС по дорогам с грунтовым покрытием и обочинам;
- пыление, связанное с выносом грунта, налипшего на колёса и кузов автомобиля при движении/парковке по территориям без твёрдого покрытия, при выезде на дороги с твёрдым покрытием;
- пыление перевозимого груза, а также процессы его погрузки и разгрузки;
- строительство и ремонт объектов АТК;
- применение смесей и растворов для борьбы с образованием льда на дорогах;
- процессы уборки дорог и т.п.

#### **1.7.1. Состав и физико-химические свойства ДЧ в ОГ ДВС**

В терминологии, используемой для сертификации ДВС, для определения ДЧ, улавливаемых из ОГ в ходе проверочных испытаний, используется термин «взвешенные частицы».

**Взвешенные частицы** – любая субстанция, улавливаемая каким-либо конкретно указанным фильтрующим материалом после разбавления отработавших газов чистым отфильтрованным разбавителем при температуре в пределах 315 К (42°С) – 325 К (52°С); к ним относятся прежде всего углерод, конденсированные углеводороды и сульфаты в соединении с водой.

Данный термин представляется не совсем удачным, т.к. указывает на форму существования ДЧ – «взвешенные», что вызывает необходимость толкования этого термина через целый ряд дополнительных уточнений, характеризующих как саму дисперсную фазу, так и дисперсионную среду. В данном случае правильнее было бы использовать более общий термин – «дисперсные частицы». Кроме того, в состав ДЧ, входящих в состав ОГ ДВС, входят нитраты, частицы металлов и другие составляющие (рис. 17).

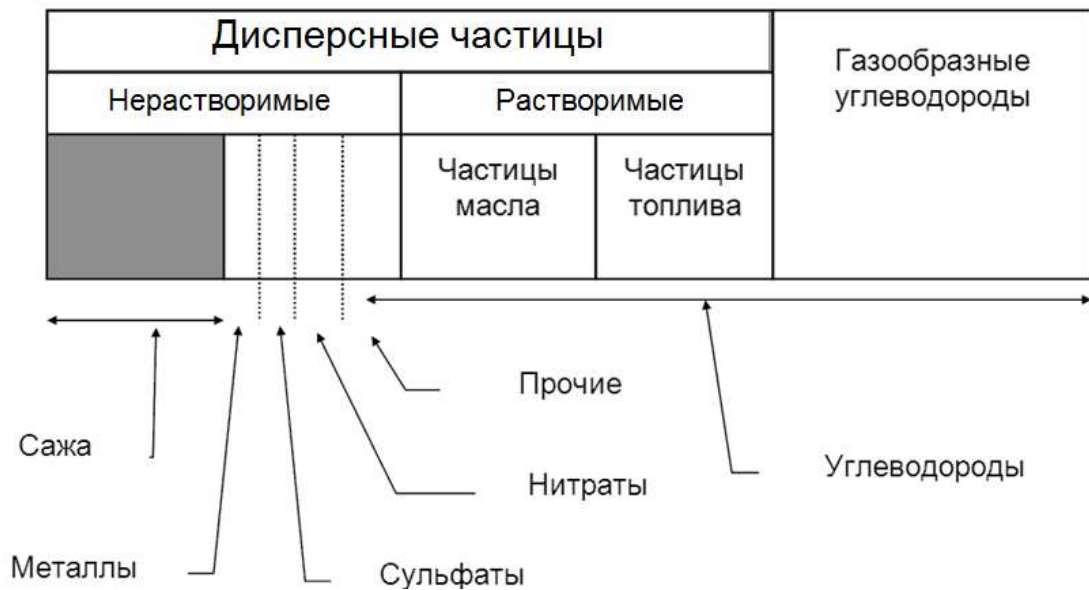


Рис. 17. Состав ДЧ, выбрасываемых с ОГ ДВС

Как общее количество, так и доли различных составляющих ДЧ, содержащихся в ОГ ДВС, зависят от целого ряда факторов, к которым относятся:

- способ организации рабочего процесса (ДВСПЗ или ДВСВС);
- характеристики, определяющие протекание рабочего процесса (состав рабочей смеси как в среднем по камере сгорания, так и его локальное распределение по объёму камеры сгорания, температура и её распределение по камере сгорания, угол опережения зажигания или впрыска топлива, характер распыления топлива, степень турбулизации заряда и т.п.);
- характеристики используемого топлива (элементарный состав, т.е. весовые доли углерода, водорода, кислорода, серы, азота и других химических элементов, химический состав, т.е. весовые

доли тех или иных органических и неорганических химических соединений, наличие примесей, в том числе катализаторов и т.п.);

- наличие и характеристики устройств очистки ОГ (нейтрализаторов, фильтров, адсорберов или абсорберов).

Например, состав ДЧ типичного дизеля с наддувом уровня «ЕВРО-2» состоит на 68...75% из нерастворимых частиц и на 25...32% – из растворимых [14].

Упрощённая схема формирования ДЧ в ОГ ДВС включает в себя процессы формирования первичных ядер конденсации, состоящих из сажи, ЛОС, сульфатов и нитратов, и последующего роста ДЧ в процессах конденсации, адсорбции и коагуляции (рис. 18).

Как уже отмечалось, гранулометрический состав ДЧ в ОГ ДВС чётко распределяется на три фракции: «зародышевую», «накопительную» и «грубую» (рис. 19). Каждая фракция имеет свой характерный химический состав.

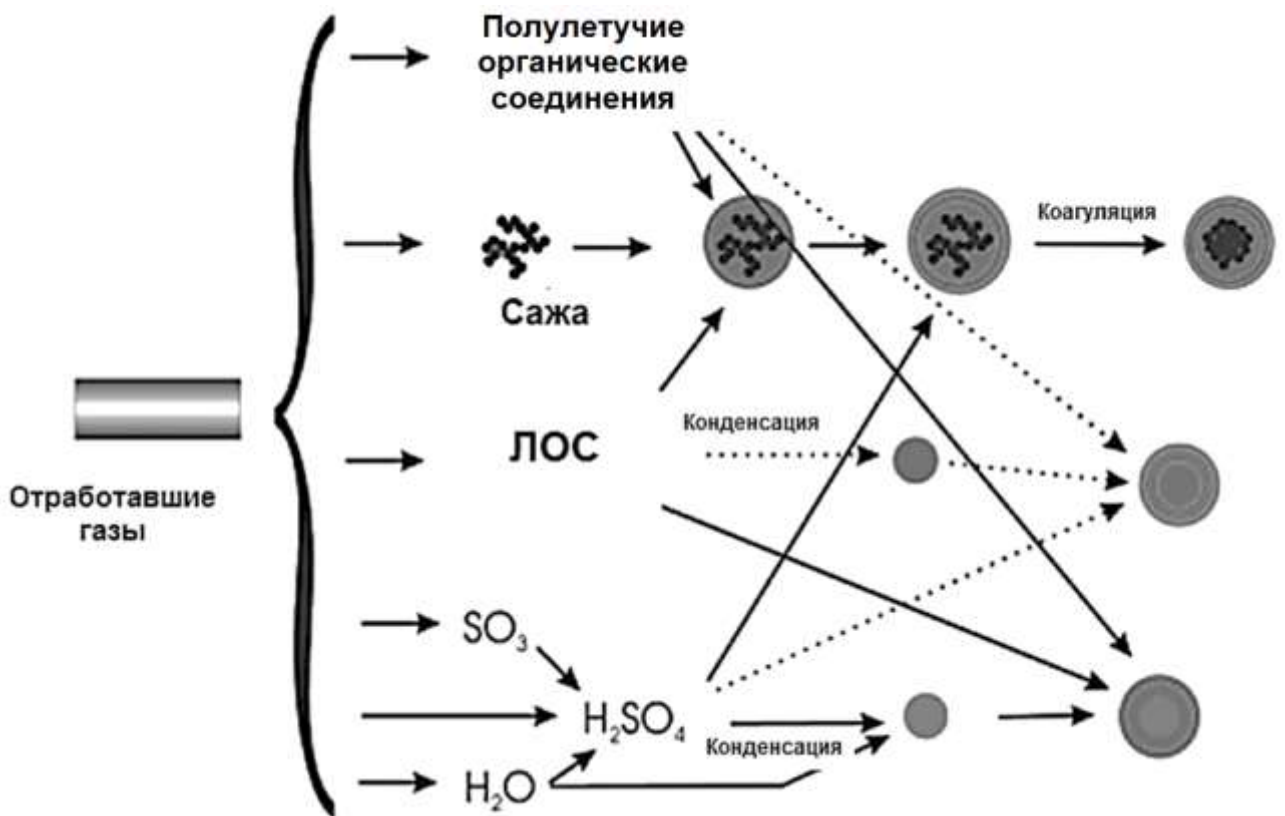


Рис. 18. Схема образования ДЧ в ОГ ДВС [15]

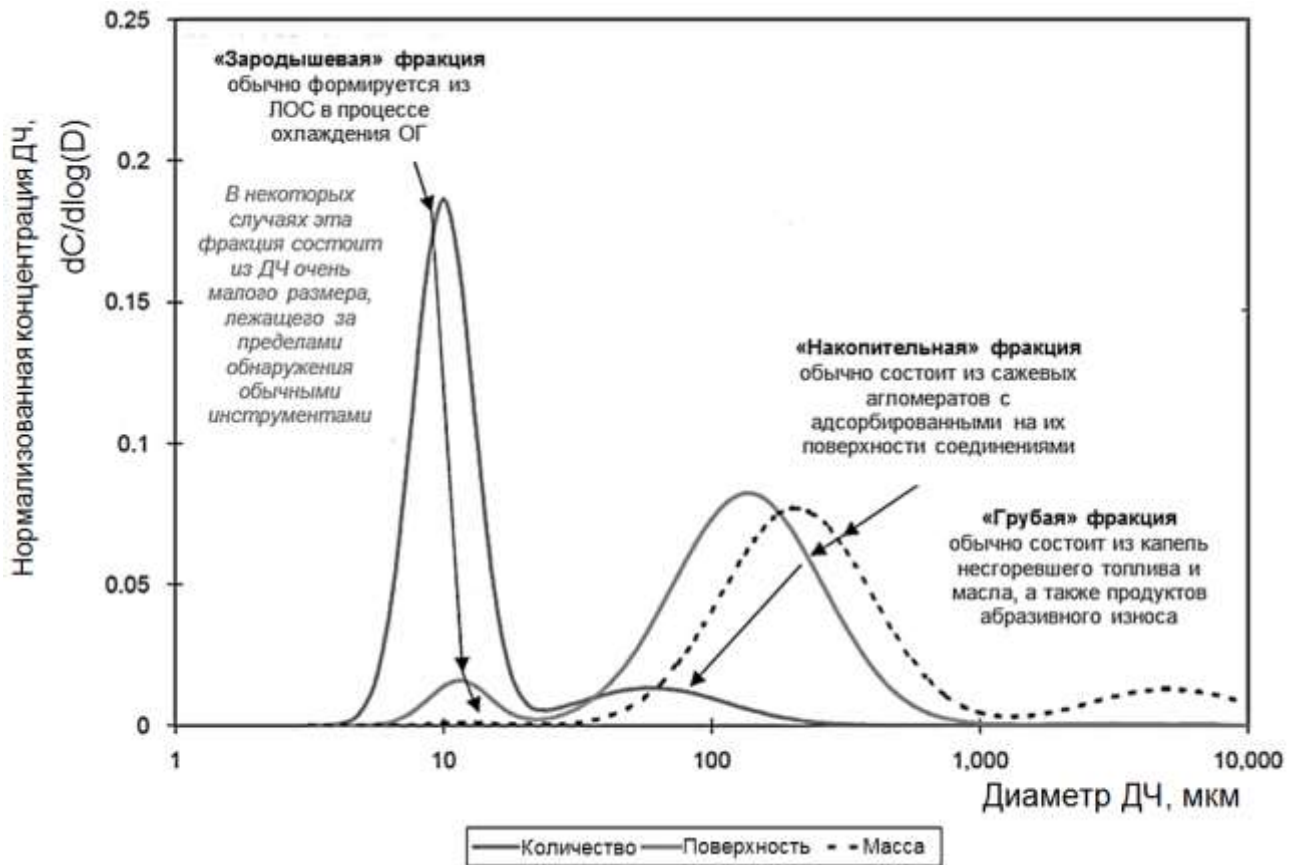


Рис. 19. Распределение ДЧ в ОГ ДВСВС по количеству (Number), площади поверхности (Surface) и массе (Mass) [16]

Сажа (твёрдый углерод) является основным компонентом нерастворимых<sup>1</sup> ДЧ.

Частица сажи – это агломерат пакетов (кристаллитов), которые в свою очередь состоят из набора отдельных сеток (пластинок) графитовых шестиугольников, в вершинах которых находятся атомы углерода (расстояния между ними 1,42 Å), но, в отличие от графита, слои в саже не плоские, а изогнутые, что и обуславливает сферическую поверхность частиц (рис. 20).

Образование сажи представляет собой объёмный процесс термического разложения (пиролиза) углеводородов в газовой (паровой) фазе в условиях сильного недостатка (отсутствия) окислителя (кислорода).

<sup>1</sup> В органических растворителях, например, бензоле.

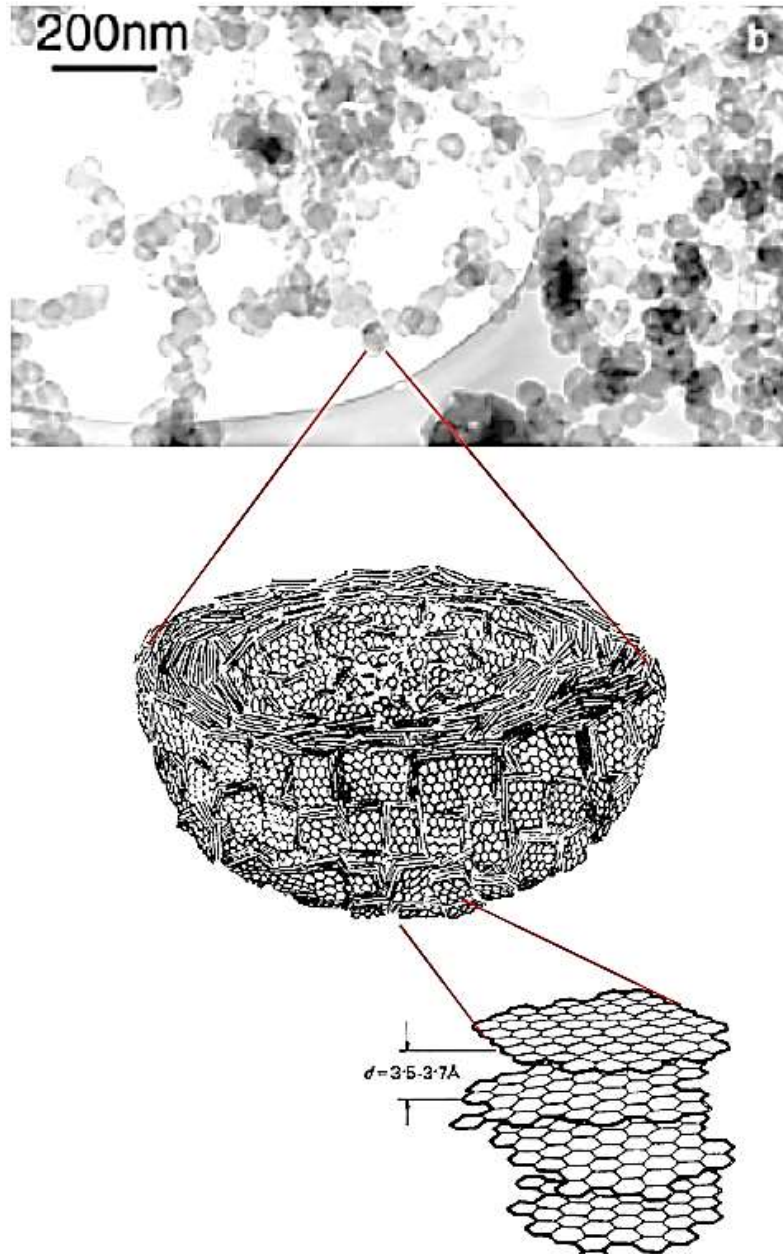


Рис. 20. Частицы сажи и их кристаллическая структура [17]

Стехиометрическое (теоретически необходимое) количество сухого воздуха (кг), необходимое для полного окисления 1 кг топлива можно рассчитать по формуле<sup>1</sup>

$$l_0 = \frac{4,32 \cdot 16 \cdot \left(2 + 0,5 \frac{H}{C} - \frac{O}{C} + 2 \frac{S}{C} + \frac{N}{C}\right)}{\left(12 + \frac{H}{C} + 16 \frac{O}{C} + 32 \frac{S}{C} + 14 \frac{N}{C}\right)}, \quad (1)$$

где  $H, C, O, S, N$  – элементарный состав топлива, % массы.

<sup>1</sup> По SAE J1829 MAY 92.

Соотношение количеств воздуха и топлива в рабочей смеси обычно характеризуется коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$

$$\alpha = \frac{G_A}{G_F \cdot l_0}, \quad (2)$$

где  $G_A$  – масса сухого воздуха в рабочей смеси, кг;

$G_F$  – масса топлива в рабочей смеси, кг;

$l_0$  – стехиометрический коэффициент из формулы (21).

Когда действительное воздушно-топливное соотношение рабочей смеси, поступающей в ДВС, выше стехиометрического, то такая смесь обладает избытком воздуха и называется «бедной» ( $\alpha > 1$ ). Наоборот, когда действительное соотношение ниже стехиометрического, сгорание топлива неполное и смесь «богатая» ( $\alpha < 1$ ).

Реакция пиролиза углеводородов, приводящая к образованию сажи, протекает при очень богатых рабочих смесях и может быть выражена уравнением



которое, однако, не описывает действительного механизма, приводящего к образованию твердого углерода.

Выделение сажи в процессе сгорания может быть разделено на три основные фазы [18]:

- образование зародыша;
- рост зародышей в первичные частицы сажи;
- коагуляция первичных сажевых частиц и образование агломератов.

Выделение сажи из пламени происходит в диапазоне  $\alpha = 0,33 \dots 0,7$  [19]. При наличии в отрегулированных двигателях с принудительным воспламенением смеси (ДВС ПВ) практически гомогенной рабочей смеси вероятность появления таких обогащённых зон незначительна. Нет условий для роста и коагуляции первичных частиц, так как высокая температура рабочей смеси после прохождения горячего пламени способствует интенсивному выгоранию образовавшейся сажи. У двигателей с воспламенением от сжатия (ДВС ВС) локальный состав смеси по объёму камеры сгорания может принимать значения от нуля

(капли ещё неиспарившегося топлива) до бесконечности («чистый» воздух на периферии камеры сгорания), поэтому переобогащённые топливом зоны образуются в обязательном порядке, и в них в полной мере реализуются процессы сажеобразования.

Количество образовавшейся сажи в значительной степени зависит от температуры в зоне пиролиза углеводородов. С ростом температуры это количество резко увеличивается, так как скорость реакции (3) контролируется её кинетикой. Подобным образом влияет и увеличение давления.

Установлено, что образование сажи зависит от элементарного и химического состава топлива. Чем выше молекулярный вес предельных и непредельных углеводородов с прямыми цепями, тем выше скорость образования сажевых частиц [18]. Это можно объяснить тем, что прочность одной и той же связи между атомами зависит от длины молекулы. Так, при увеличении числа атомов углерода в молекуле от 2 до 5 прочность связи между группами СН у алканов уменьшается от 333 до 268 кДж/моль [20]. Выявлено также, что образование сажи тем больше, чем выше отношение С/Н в топливе [21].

В процессе расширения газов в цилиндре ДВСВС к частицам сажи поступает кислород (вследствие движения газов и диффузии кислорода), т.е. создаются условия, благоприятные для выгорания сажи. Поэтому одновременно с процессом образования, а также и после образования сажевых частиц происходит процесс их выгорания в реакциях с радикалами ОН или кислородом. Исследования образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля, выполненные методом спектрального анализа [22], показали, что значительная часть сажи выгорает в процессе рабочего такта ДВС.

В основном при  $\alpha > 1$  (в ДВСВС) происходит прямое окисление сажи кислородом. Скорость выгорания сажи значительно меньше скорости выгорания газообразных продуктов неполного сгорания (СО и СН). Скорость выгорания сажи существенно зависит от размеров частиц (их поверхности). Было определено, что вся образовавшаяся в пламени сажа может выгореть только в том случае, если размеры частиц не

будут превышать  $100 \text{ \AA}$  (0,01 мкм). Сажа в отработавших газах дизелей представляет собой агломерационные образования неправильной формы с линейными размерами 0,3...100 мкм. Большая часть сажевых образований имеет размеры 0,4...5 мкм [23].

Таким образом, выделение сажи с отработавшими газами дизеля зависит как от процессов её образования, так и от процессов её выгорания.

Оптимальные регулировки двигателя являются эффективным средством для уменьшения выделения сажи. Однако решения в этой области носят компромиссный характер. Например, уменьшение угла опережения впрыска топлива приводит к снижению выбросов  $\text{NO}_x$ , но выбросы сажи и расход топлива при этом увеличиваются [24].

Другой пример в данной области – рециркуляция отработавших газов (РОГ) двигателя автомобиля, которая в настоящее время широко применяется для уменьшения выделения  $\text{NO}_x$ . РОГ обеспечивает существенное уменьшение выделения  $\text{NO}_x$ , однако при этом ухудшаются показатели экономичности, растёт выделение сажи, СО и СН.

В состав ДЧ кроме прочего входят соединения практически всех металлов, которые попадают в топливо вместе с присадками и примесями, а также при его контакте с металлическими поверхностями ДВС (смыв продуктов абразивного износа).

На выброс ДЧ с ОГ ДВС влияет также наличие серы в топливе. Чем больше в топливе серы, тем выше выбросы сульфатов и связанной с ними воды [25].

Оксиды азота  $\text{NO}_x$ , содержащиеся в ОГ ДВС, могут реагировать с кислородом и водой, образуя азотную кислоту, которая, в свою очередь реагируя с металлами или их оксидами, образует нитраты. Следовательно, количество нитратов в составе ДЧ зависит от образования  $\text{NO}_x$  и наличия металлических частиц в ОГ.

Некоторые характеристики рабочих процессов ДВС очень сильно изменяются в зависимости от режима их работы (рис. 21). Под установившимся режимом работы ДВС обычно понимается сочетание



частоты вращения выходного вала двигателя и крутящего момента на этом валу. Режим работы фильтра-нейтрализатора определяется расходом ОГ через данное устройство и их температурой.

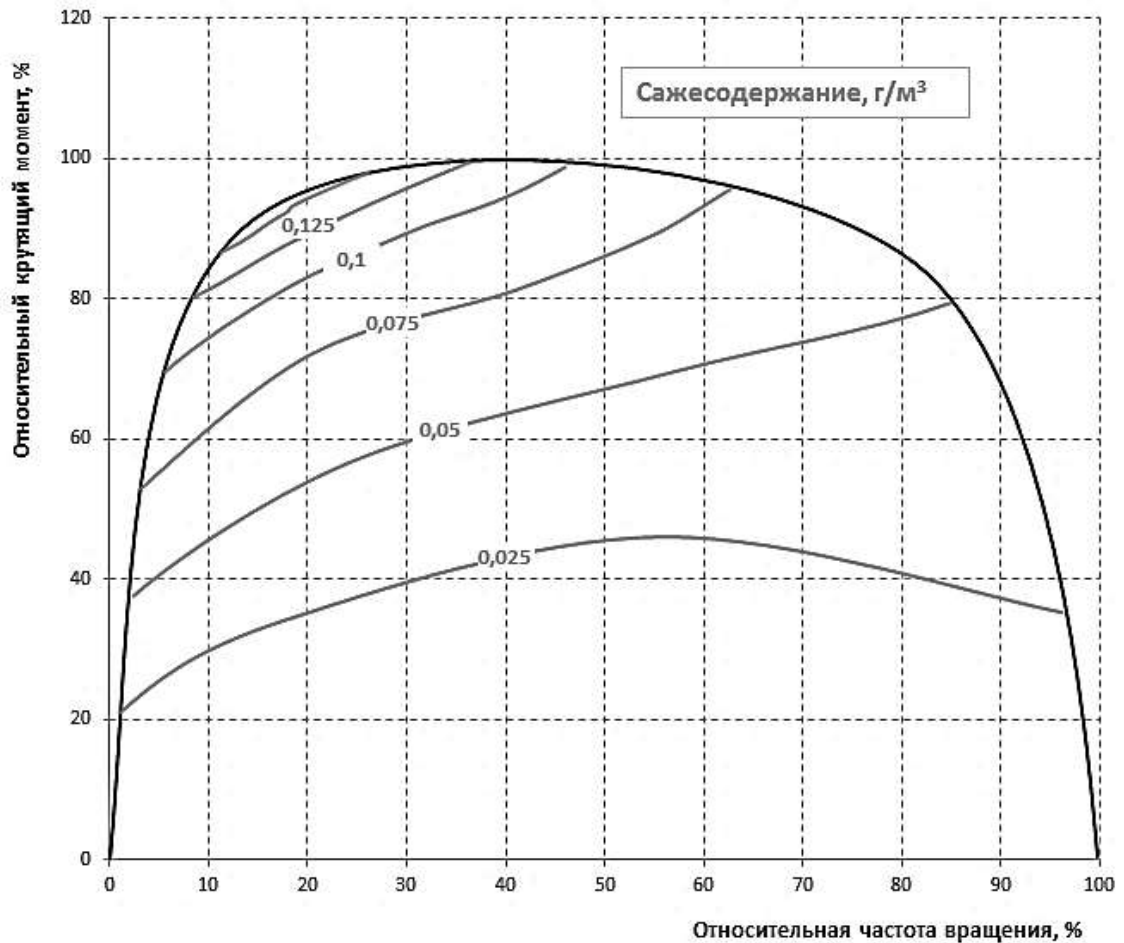
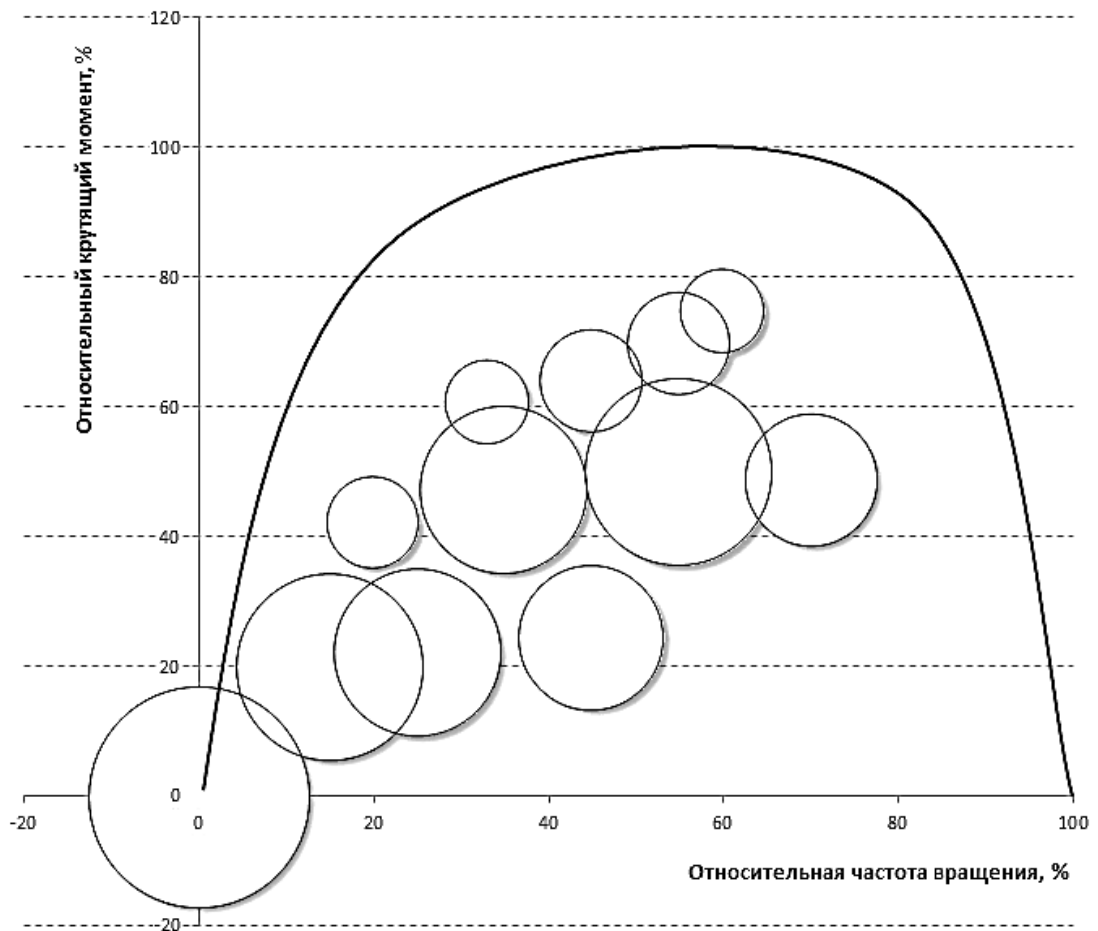


Рис. 21. Типичная многопараметровая характеристика ДВСВС уровня ЕВРО-1 по концентрации в ОГ сажи, г/м³ [26]

Для обеспечения оптимальных регулировок на различных режимах работы двигателя в настоящее время используются возможности бортовых компьютеров, которые учитывают не только процессы образования токсичных веществ в цилиндрах двигателя, но и процессы их нейтрализации (очистки) в системах снижения токсичности<sup>1</sup> ОГ. Тем не менее, зависимость выбросов ДЧ от режима работы ДВС остаётся достаточно существенной.

<sup>1</sup> Токсичность – способность вещества вызывать нарушения физиологических функций организма, в результате чего возникают симптомы интоксикаций (заболевания), а при тяжёлых поражениях – его гибель.

Формирование показателей токсичности АТС (пробеговых выбросов) происходит в зависимости не только от многопараметровой токсической характеристики ДВС, но и от того, насколько часто ДВС работает в той или иной зоне многопараметровой характеристики ДВС (рис. 22).



*Рис. 22. Распределение времени работы ДВС (размер «пузырей») в области многопараметровой характеристики при движении легкового АТС в европейском смешанном ездовом цикле*

Режим работы двигателя оказывает большое влияние и на химический состав ДЧ, например, доля элементарного углерода (сажи или чёрного углерода) может меняться от 46% до 79% (рис. 23).

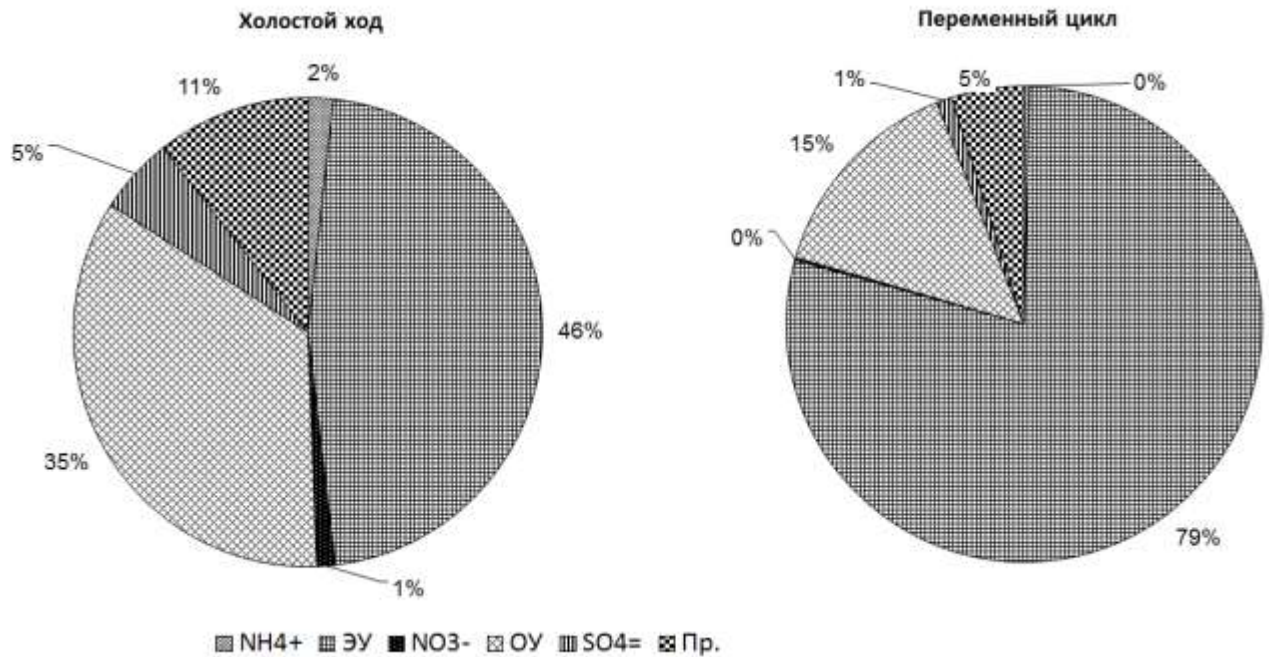


Рис. 23. Зависимость химического состава ДЧ в ОГ ДВС/СВ от режима его работы (холостой ход и переменный цикл). Источник: SPECIATE (США)

На величину выброса и на состав ДЧ оказывают существенное влияние технологии очистки ОГ ДВС (табл. 4). При сравнении величины удельных выбросов ДЧ с ОГ ДВС выпуска 1998 и 2007 гг. наблюдается 50-кратное снижение массы выбросов ДЧ и сдвиг в химическом составе с элементарного углерода – сажи (ЭУ) в сторону сульфатов ( $SO_4$ ) и органического углерода (ОУ).

В автомобильном парке любой страны присутствуют АТС, соответствующие различному уровню сертификационных требований к выбросам ЗВ. Разные страны мира устанавливают свои графики применения нормативов на выбросы ЗВ с ОГ АТС. С учётом того, что срок эксплуатации некоторых категорий АТС может превышать 20...30 лет, а также учитывая процессы экспорта/импорта, в каждой стране формируется довольно разнообразный «экологический» спектр АТС. Доли АТС того или иного экологического класса зависят не только от графика перехода на более жёсткие уровни нормирования, но и от политики обновления парка, если таковая существует.

Кроме того, фактические выбросы ЗВ с ОГ АТС зависят не только от уровня его сертификации, но и от того, насколько полно и грамотно проводится техническое обслуживание, ремонт, заправка необходимыми эксплуатационными материалами. Тот факт, что выбросы ДЧ с ОГ ДВС очень сильно (на порядки) зависят от исправности ДВС, очевиден. Всё это обуславливает крайнюю сложность оценки величины и состава выбросов ДЧ с ОГ парка АТС.

Таблица 4

Средние удельные выбросы ПАУ и Нитро-ПАУ 4 двигателей 2007 года выпуска и одного двигателя 2000 года выпуска в ходе испытаний в переходном цикле FTP (США), мг/л.с.ч.

ПАУ и нитро-ПАУ	ДВС 2007 года выпуска, мг/л.с.ч.	ДВС 2000 года выпуска, мг/л.с.ч.	Снижение выбросов, %
Нафталин	0,0982000 ± 0,0423000	0,4829	80
Аценафтилен	0,0005000 ± 0,0005000	0,0524	98
Аценафтен	0,0004000 ± 0,0001000	0,0215	93
Флуорен	0,0015000 ± 0,0009000	0,0425	96
Фенантрен	0,0077000 ± 0,0025000	0,0500	85
Антрацен	0,0003000 ± 0,0001000	0,0121	97
Флуорантен	0,0006000 ± 0,0006000	0,0041	85
Пирен	0,0005000 ± 0,000400	0,0101	95
Бензо(α)пирен	<0,0000001	<0,0003	>99

### 1.7.2. Состав и физико-химические свойства ДЧ от износа автомобильных шин

В результате взаимодействия колеса с дорожным покрытием образуются ДЧ, представляющие собой продукты износа материалов шины и дорожного покрытия. В обоих случаях основным механизмом образования ДЧ служат срезающие усилия, возникающие во время относительного перемещения поверхностей шины и дорожного полотна. Вторичным механизмом является испарение материалов с поверхности трения/скольжения при высоких температурах, характерных для трения.

Износ шин является комплексным физико-химическим процессом. Различают три основных вида износа шин [27]:

- усталостный (гистерезисный или механо-химический),

- абразивный и
- посредством «скатывания».

При **усталостном износе** разрушение поверхностного слоя протектора шины происходит после его многократных деформаций в результате качения колеса под нагрузкой. В результате многократно повторяющихся воздействий происходит разрушение и отделение частиц износа с поверхности трения. Такой процесс разрушения поверхности трения рассматривается как фрикционно-контактная усталость материала. Этот вид износа является основным для автомобильных шин.

**Абразивный износ** происходит при трении двух поверхностей и проявляется в образовании на поверхности протектора разрывов и трещин в результате резкого и длительного торможения или разгона автомобиля, при движении с большими скоростями, на поворотах.

У мягких резин, особенно при повышенных нагрузках, наблюдается предрасположенность к износу посредством «скатывания». При длительном скольжении резин в одном направлении образуется рисунок истирания. При «скатывании» образуется система параллельных чередующихся гребней и впадин, расположенных перпендикулярно направлению истирания.

На интенсивность износа шин влияют следующие факторы: конструкция шины, рисунок протектора, состав резины, скорость движения, техническое состояние подвески автомобиля, нагрузка на колесо, давление воздуха в шине, температура окружающего воздуха и шины, стиль вождения, тип и состояние дорожного покрытия, наличие осадков и т.п.

Износ передних шин на переднеприводном автомобиле составляет от 69% до 85% от общего износа покрышек транспортного средства.

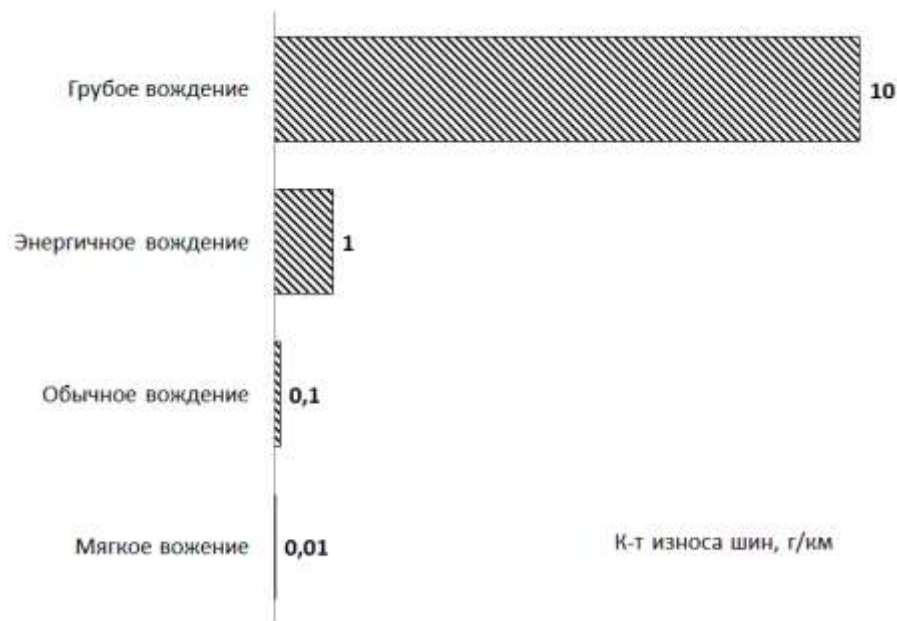
Срок службы стандартной автомобильной шины составляет 50000...60000 км, на протяжении которого её суммарный вес сокращается на 10%. Срок службы шин грузовиков обычно составляет около 100000 км, в зависимости от интенсивности использования грузовика и нагрузки на шину. Кроме того, некоторые шины в данной

категории транспортных средств оснащены восстановленным протектором.

Пробеговые выбросы продуктов износа шин (коэффициенты износа) АТС могут меняться на порядки (рис. 24).

Суммарное количество материала износа шины на протяжении её срока службы варьируется в зависимости от конкретного транспортного средства и может составлять от нескольких сот грамм для двухколесных транспортных средств, 1...1,5 кг для легковых автомобилей и вплоть до 10 кг для грузовиков или автобусов.

Изношенный материал покрышек выбрасывается в виде ДЧ самого различного размера. В рамках работы [28] были собраны остатки с дорожного покрытия на полигоне для испытания покрышек. Были обнаружены ДЧ размером вплоть до 200 мкм. Подобные частицы не остаются взвешенными в воздухе и поэтому не представляют большого интереса с точки зрения загрязнения воздуха, но при этом они вносят наибольший вклад (по весу) в суммарный износ покрышек.



*Рис. 24. Коэффициенты износа для шин АТС малой грузоподъемности, полученных разными исследователями [29]*

Вероятным механизмом образования мелких частиц является испарение и последующая конденсация материала, тогда как частицы более крупных размеров образуются в результате механизма износа. В

рамках исследования TNO были сделаны выводы о следующем распределении ДЧ по размерным фракциям:  $PM_{10}$  – 100%, из них  $PM_{2,5}$  – 70%,  $PM_1$  – 10% и  $PM_{0,1}$  – 8%.

Частицы от износа шин в основном состоят из соединений, которые используются при их производстве: бутадиенстирольный каучук ( $\approx 75\%$ ), натуральный каучук ( $\approx 15\%$ ), и полибутадиен ( $\approx 10\%$ ). В целях получения необходимых эксплуатационных характеристик во время производственного процесса в это сочетание также добавляются металлические или органические присадки. Одной из самых важных присадок является окись цинка (ZnO), выступающая в качестве вулканизирующей добавки. Обычно концентрация ZnO в протекторе покрышки варьируется в диапазоне от 1,2% (легковые автомобили) до 2,1% (грузовики).

Средние данные по составу шинной пыли внесены в базу данных SPECIATE, созданную Агентством по охране окружающей среды США с целью накопления и упорядочения многочисленных данных, касающихся состава ДЧ различного происхождения (рис. 25).

В составе ДЧ от износа шин обнаруживают бензо( $\alpha$ )пирен ( $\approx 3,9$  млн<sup>-1</sup>), входящий в перечень Протокола по стойким органическим загрязнителям ЕЭК ООН.

В середине 1970-х началось использование в резиновых смесях т.н. **силики** – высокодиспергированного диоксида кремния, модифицированного присадками, повышающими его адгезию с каучуками. С середины 1990-х началось массовое производство шин (особенно зимних) с силикой. Силика вводится в состав протекторных резин с целью одновременного улучшения сцепных качеств и снижения сопротивления качению<sup>1</sup>. Одна из первых торговых марок силики, производимая фирмой Degussa с 1971 года – S-69 или бис-3-(триэтоксилпропил)-тетрасульфат  $((C_2H_5O)_3 - Si - CH_2 - CH_2 - CH_2 - S_x - CH_2 - CH_2 - CH_2 - Si - (OC_2H_5)_3)$ .

<sup>1</sup> Силика также входит в состав мастик, используемых для нанесения дорожной разметки.

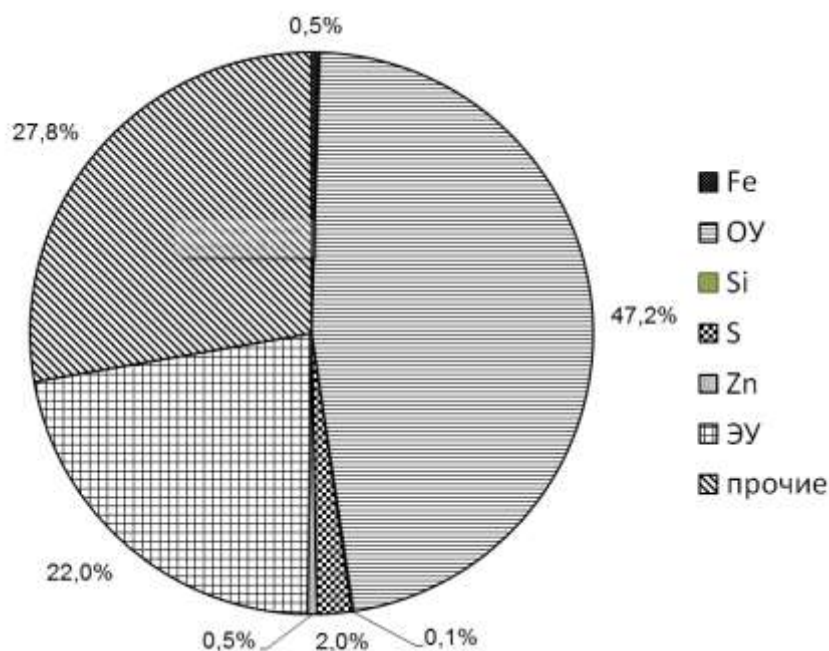


Рис. 25. Усреднённые данные по химическому составу шинной пыли, полученные в США в конце 1990-х

Одна из наиболее широко известных современных марок силики – SCA 9872 – состоит на 72% из силана<sup>1</sup> и на 28% из силиката кальция.

Доля силики, заменяющей технический углерод, может быть различной и даже доходить до 100%, однако в этом случае для улучшения электропроводимости резины в состав смеси добавляют специальные добавки, например смесь amino- и сульфонилцирконатов.

Химический и гранулометрический состав пыли, образующейся при истирании шин с силикой, авторам найти не удалось. Можно лишь предположить, что часть элементарного углерода будет замещена диоксидом кремния. Учитывая, что диоксид кремния – наиболее вероятная причина такого опасного заболевания, как силикоз, в этой области необходимы дополнительные исследования.

### 1.7.3. Состав и физико-химические свойства ДЧ от износа тормозных механизмов АТС

ДЧ, образующиеся в результате износа тормозных механизмов, представляют собой продукты износа материалов фрикционных

<sup>1</sup> Соединения кремния с водородом общей формулы  $Si_nH_{2n+2}$ .



накладок и металла, из которого изготовлены тормозные диски или тормозные барабаны.

Тормозные фрикционные накладки обычно состоят из четырёх основных компонентов – обвязки, волокон, уплотняющих присадок и модификаторов трения. В качестве обвязок используются различные модифицированные фенолформальдегидные смолы. Волокна могут быть подразделены на металлические, минеральные, керамические или арамидные (органические) и включают сталь, медь, латунь, титанат калия, стекло, асбест, органический материал и кевлар. Уплотняющие присадки обычно являются дешевыми материалами, такими как барий и серноокислая сурьма, каолиновые глины, магний, оксиды хрома и металлические порошки. Состав модификаторов трения может быть неорганическим, органическим или металлическим. Основным модификатором трения является графит, но помимо него также используют порошок акажу<sup>1</sup>, резиновую муку и технический углерод. В прошлом тормозные накладки дисковых тормозов включали асбестовые волокна, но на сегодняшний день в Европейском автопарке практически не осталось транспортных средств, в которых используется эта технология.

На величину износа тормозов большое влияние оказывает конструкция как автомобиля в целом (расположение центра тяжести, количество осей и т.п.), так и собственно тормозной системы, материал фрикционных накладок и тормозных дисков/барабанов. Показатели интенсивности износа также зависят от стиля вождения, степени загруженности автомобиля, типа ездового цикла (городской, пригородный, магистральный и т.п.), продольного профиля дороги, влажности воздуха и наличия осадков, состояния дорожного покрытия (наличия абразивных частиц) и других факторов.

Предполагается, что срок службы тормозных фрикционных накладок для легковых автомобилей составляет 30...50 тыс. км, грузовиков и туристических междугородних автобусов составляет около 60 тыс. км.

---

<sup>1</sup> Необыкновенно твёрдое, светло-красное дерево, растущее в Африке и в Индии.

Не весь изношенный материал тормозных механизмов выбрасывается в воздух в виде ДЧ. Небольшое количество тормозной пыли остаётся (оседает) на транспортном средстве. Степень выброса/оседания зависит от конструкции тормозных механизмов (дисковые или барабанные), интенсивности торможения, скорости, при которой происходит торможение, состояния поверхностей деталей автомобиля (влажность, замасливание) и т.п. При этом от 35 до 90% материала суммарного износа выбрасывается в атмосферу. От 3% до 30% остатков ДЧ тормозов остаётся на дороге, от 16 до 22% остаётся на колесе, а от 8 до 25% – на тормозном и рулевом/подвесном оборудовании.

В соответствии с данными Агентства по охране окружающей среды США, около 98% (по массе) ДЧ от износа тормозов являются  $PM_{10}$ , которые по гранулометрическому составу распределяются следующим образом:  $PM_{2,5}$  – 40%,  $PM_1$  – 10%,  $PM_{0,1}$  – 8%.

Таким образом, при нормальных условиях вождения большая часть ДЧ износа тормозов может рассматриваться в качестве  $PM_{10}$ , а значительная часть – в качестве  $PM_{2,5}$ . Существует вероятность того, что при высоких температурах, вызванных торможением, некоторое количество материала тормозных накладок дисковых тормозов может испаряться с последующей конденсацией и, таким образом, вносить вклад в тонкодисперсную фракцию ДЧ.

Химический состав ДЧ, образующихся в результате износа тормозных механизмов в большой степени зависит от их производителя, применения (легковой, грузовой, гоночный автомобиль и т.д.) и заданных свойств. Как правило, тормозные накладки состоят из металлов, связанных друг с другом с помощью материалов на основе кремния. Однако встречается и другая рецептура. Кроме того, пока не существует единого подхода к проведению данных исследований. Поэтому результаты анализов химического состава ДЧ от износа тормозных механизмов, произведённых разными авторами, отличаются большим разбросом (табл. 5).

В составе ДЧ от износа тормозных механизмов обнаруживают и некоторые СОЗ: бензо(α)пирен ( $\cong 0,74 \text{ млн}^{-1}$ ), бензо(β)флуорантен ( $\cong 0,42 \text{ млн}^{-1}$ ), бензо(к)флуорантен ( $\cong 0,62 \text{ млн}^{-1}$ ) и т.п.

Таблица 5

Химический состав ДЧ от износа тормозных механизмов по данным SPECIATE (США)

Химический состав ДЧ	Обозначение	Массовая доля, %		
		Мин.	Макс.	Сред.
Барий	Ba	0,92	12,16	5,62
Медь	Cu	0,04	14,09	3,41
Элементарный углерод	ЭУ	0,21	2,61	1,14
Железо	Fe	4,00	52,91	27,78
Магний	Mg	1,91	13,80	3,94
Органический углерод	ОУ	8,79	33,81	11,34
Кремний	Si	1,03	13,14	5,23
Сера	S	0,64	4,23	2,06

#### 1.7.4. Состав и физико-химические свойства ДЧ от износа дорожного покрытия

В результате взаимодействия колеса с дорожным покрытием образуются ДЧ, представляющие собой продукты износа как материала шины, так и материала дорожного покрытия. В обоих случаях основным механизмом образования ДЧ служат срезающие усилия, возникающие во время относительного перемещения поверхностей. Вторичным механизмом является испарение материала с поверхности при высоких температурах, являющихся последствием контакта и трения.

Износ дорожного покрытия существенно зависит от его конструкции, вида и качества используемых материалов, характеристик транспортного потока, метеорологических условий и т.п.

К основным факторам износа асфальтобетонных покрытий относятся механические воздействия от движения автомобилей, изменяющиеся во времени влияния метеорологических условий (влажность, температура, осадки) и влияние условий эксплуатации. При высокой интенсивности движения АТС основным фактором износа покрытия является механическое (физико-механическое) воздействие, а

при малой интенсивности износ покрытия может происходить под влиянием физико-химического воздействия окружающей среды.

К механическим воздействиям относятся трение качения, трение скольжения и ударная нагрузка от колес автомобиля, вызванная неровностями дорожных одежд.

Дорожные одежды по типам покрытия классифицируются на:

- **капитальные** (цементобетонные, асфальтобетонные из горячих плотных смесей I и II марок, асфальтобетонные из холодных смесей I марки, дегтебетонные из горячих плотных смесей I марки);
- **облегчённые** (асфальтобетонные из горячих смесей III марки, асфальтобетонные из холодных смесей II марки, дегтебетонные из горячих и холодных смесей II марки, из каменных материалов, обработанных органическими вяжущими материалами, переходные с поверхностной обработкой);
- **переходные** (щебёночные, гравийные, булыжные из колотого камня, грунтовые, укрепленные вяжущими материалами);
- **низшие** (из малопрочных каменных материалов и шлаков, грунтовые, улучшенные различными местными материалами).

Наибольший объём выделения минеральной пыли связан с износом покрытий дорожных одежд (щебёночных, гравийных) – в результате выбивания колесами автомобиля из покрытий отдельных щебенки в сухой период года, сметания мелких частиц с покрытий ветром и воздушными вихрями при движении транспортных средств или смывания их водой. Для усовершенствованных покрытий наиболее характерен износ от истирания их поверхности шинами.

Износ дорожных покрытий зависит от твердости, прочности и поверхностной активности каменного материала, гранулометрического состава смеси, количества и вязкости битума, степени уплотнения и остаточной пористости материала покрытия, наличия на поверхности пылевидных, глинистых и песчаных частиц, соотношения между скольжением и качением колеса, формы, степени изношенности протектора шины, жесткости шины, состава транспортного потока и

режимов движения автомобилей, степени неровности и шероховатости покрытия и т.д.

Влияние гранулометрического состава асфальтобетона является довольно существенным в механизме его износа. Более стабильный гранулометрический состав способствует увеличению прочностных свойств асфальтобетона и, следовательно, повышает его износостойкость. Однородность асфальтобетона и оптимальное содержание минерального порошка в его составе также уменьшает износ. При недостаточном количестве или избытке минерального порошка в смеси износ увеличивается. Если минеральный порошок имеет плохую адгезию с битумом, износ резко повышается.

Содержание щебня также влияет на износ асфальтобетона. Чем больше в асфальтобетоне щебня, тем выше его износостойкость. Можно полагать, что при содержании в составе асфальтобетона щебня свыше 50% его износ будет определяться в основном прочностью каменного материала. Наименее износостойкими являются песчаные фракции, особенно из кремнистых пород.

На износ асфальтобетона очень существенное влияние оказывает тип, вязкость и качество вяжущего материала в его составе, а также точное дозирование вяжущего. Чем выше вязкость и адгезия<sup>1</sup> битума, тем выше износостойкость асфальтобетона. Избыток битума в составе асфальтобетона повышает его износостойкость, но при повышении температуры может привести к уменьшению его сдвигоустойчивости.

Одной из причин, ускоряющих процесс износа дорожной одежды, является воздействие агрессивных растворов. Происходит это, главным образом, в результате химических изменений, происходящих в битуме, причём эти изменения наступают гораздо раньше, чем физическое разрушение асфальтобетона, т.е. наступает старение битума.

---

<sup>1</sup> Адгезия – явление, когда две взаимно нерастворимые жидкости, либо жидкость и твёрдое тело, либо два твёрдых тела приводятся в тесный контакт друг с другом и под действием межмолекулярных или иных (например, электрических) сил прочно прилипают друг к другу так, что для их разделения надо приложить известное усилие, т.е. произвести работу.

На износ покрытий в значительной мере влияет состояние проезжей части. Пыль и грязь способствуют большему износу, воздействуя на поверхность дороги при движении автомобилей как абразивный материал.

Выброс ДЧ с поверхности асфальтобетона зависит от степени его увлажнения. Вода способствует ослаблению прочных связей частиц минеральной части асфальтобетона, которые скреплены тонкой пленкой битума, тем самым происходит более интенсивный отрыв и унос частиц в момент его истирания, особенно при небольших значениях положительных температур (близких к нулю). Износ асфальтобетона значительно зависит от температуры. С понижением температуры до 0°С износ асфальтобетона уменьшается, и наоборот, при увеличении температуры до +20°С износ асфальтобетона несколько увеличивается. Это связано с тем, что при отрицательной температуре асфальтобетон переходит в упругое состояние и все его прочностные показатели возрастают, а при увеличении температуры до +20°С асфальтобетон переходит в более пластичное состояние и все его прочностные характеристики уменьшаются.

Обработка песком в целях улучшения сцепления с дорожным покрытием в зимнее время (рассеивание песочной смеси на поверхности дороги) и использование шипованных шин являются источниками высоких выбросов ДЧ, которые образуются в результате процесса, известного как «эффект наждачной бумаги».

Износ дорожного покрытия увеличивается вместе с уровнем влажности и от 2 до 6 раз выше для влажной дороги, по сравнению с сухой. Кроме того, он также увеличивается после посыпания дороги солью, так как поверхность остается влажной на протяжении более продолжительного периода времени.

Скорость транспортного средства, давление в шине и температура окружающего воздуха также оказывают влияние на интенсивность износа дорожного покрытия. По мере снижения температуры шины становятся менее упругими (эластичными), что приводит к увеличению интенсивности износа дорожного покрытия.

Значимым источником загрязнения атмосферного воздуха ДЧ, включая  $PM_{10}$ , в крупных городах России является вынос почвы обочин, газонов и других территорий на дорогу колесами автомобилей.

Как показали результаты обследований, из-за парковки автомобилей на газонах, на обочинах, других незадернованных местах в среднем ежегодно на одном колесе легкового автомобиля на дорогу выносится до 2 кг почвы. Отмечается, что при движении такие автомобили выделяют с каждого колеса 0,134 г/км частиц, в том числе 0,0067 г/км частиц размером менее 10 мкм. Химический состав таких частиц напрямую зависит от химического состава почвы, налипшей на колесо. Учитывая высокую степень загрязнения городских почв тяжелыми металлами и стойкими углеводородами, следует признать, что данный механизм образования ДЧ требует более серьёзного изучения.

Около 70% (по весу) ДЧ от износа дорог варьируется по размеру в диапазоне от 0,35 мкм до 2,8 мкм со средним значением около 0,7 мкм.

Химический состав продуктов износа дорожного покрытия зависит от материалов дорожного покрытия. Наибольшее количество пыли создаётся на грунтовых и гравийных дорогах. Дороги с покрытием из зернистых материалов (гравийные) образуют пыль, состоящую, в основном, из диоксида кремния. На грунтовых дорогах пыль состоит на 90% из кварцевых частиц, остальную долю составляют оксиды алюминия, железа, кальция и др. На дорогах с асфальтобетонным покрытием в состав пыли дополнительно входят продукты износа вяжущих битумсодержащих материалов, частицы краски от дорожной разметки.

Анализ исследований «эффекта наждачной бумаги» с использованием стационарного имитатора дорожных условий показал, что более 90% всех уловленных частиц  $PM_{10}$  представляют собой алюмосиликаты и, таким образом, являются материалом износа дорожного покрытия и сцепляющего грунта.

Химический состав дорожного смёта приведён в работе [30] (табл. 6).

## Химический состав дорожного смёта вдоль автомагистрали

Компоненты	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Органические вещества	Прочие
Содержание, % по массе	71,8±2,3	7,4±1,1	3,2±0,9	2,7±1,0	1,7±0,3	7,6±0,8	5,6±0,7

Как уже отмечалось, химический состав ДЧ, образующихся при износе дорожного покрытия, зависит от размеров исследуемой фракции. Поскольку и в случае «дорожных» частиц нет общепризнанной методики исследований, публикуемые результаты характеризуются большим разбросом и требуют индивидуальной интерпретации. Как правило, публикуются данные о химическом составе ДЧ, отобранных вблизи той или иной дороги, что предполагает наличие в пробе и продуктов износа дороги, и продуктов износа шин и тормозных механизмов, и частиц из ОГ ДВС, и фоновую составляющую. Поэтому для уточнения состава ДЧ, образующихся при износе дорожного покрытия, необходима в первую очередь разработка и стандартизация методов исследований.

**Контрольные вопросы**

1. По каким признакам и как классифицируются дисперсные частицы?
2. Назовите природные источники поступления дисперсных частиц в атмосферу.
3. Назовите антропогенные источники поступления дисперсных частиц в атмосферу.
4. Какую долю от общих антропогенных выбросов дисперсных частиц различных фракций составляют выбросы, приходящиеся на сферу транспорта?
5. Перечислите характеристики гранулометрического состава дисперсных частиц.
6. Что такое «аэродинамический» диаметр дисперсных частиц?
7. Что такое «диффузионный» диаметр дисперсных частиц?



8. Как соотносятся между собой такие показатели размеров фракций дисперсных частиц, как WRAC, TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>0,1</sub>?
9. Из каких трёх фракций состоят типичные придорожные дисперсные частицы? Каковы механизмы образования этих фракций? Каков их типичный химический состав? Каковы характеристики распределения количества, суммарной площади поверхности и объёма этих фракций?
10. Каков химический состав типичных городских дисперсных частиц? От каких факторов он зависит?
11. Что такое «чёрный углерод»? Перечислите термины, употребляющиеся в качестве его синонимов.
12. В чём заключается непосредственное воздействие дисперсных частиц на климатическую систему?
13. В чём заключается косвенное воздействие дисперсных частиц на климатическую систему? Что такое «эффект Туми» и «эффект Альбрехта»?
14. Что такое ПГП? Каковы оценки этой величины для дисперсных частиц в 20-летнем, 100-летнем и 500-летнем интервале прогнозирования?
15. Что такое ПГТ? Каковы оценки этой величины для дисперсных частиц в 20-летнем и 100-летнем интервале прогнозирования?
16. Каковы процессы поведения различных фракций дисперсных частиц в атмосфере?
17. Каковы процессы удаления различных фракций дисперсных частиц из атмосферы?
18. Что представляют собой дисперсные частицы в составе отработавших газов автомобилей? Приведите характеристики их дисперсионного и химического состава.
19. Каковы механизмы образования дисперсных частиц в отработавших газах автомобилей? Какие факторы влияют на эти механизмы?
20. Что представляют собой дисперсные частицы, образующиеся в результате износа шин автомобилей? Приведите характеристики их дисперсионного и химического состава.

21. Каковы механизмы образования дисперсных частиц, образующихся в результате износа шин автомобилей? Какие факторы влияют на эти механизмы?
22. Что представляют собой дисперсные частицы, образующиеся в результате износа тормозов автомобилей? Приведите характеристики их дисперсионного и химического состава.
23. Каковы механизмы образования дисперсных частиц, образующихся в результате износа тормозов автомобилей? Какие факторы влияют на эти механизмы?
24. Что представляют собой дисперсные частицы, образующиеся в результате износа дорожного покрытия? Приведите характеристики их дисперсионного и химического состава.
25. Каковы механизмы образования дисперсных частиц, образующихся в результате износа дорожного покрытия? Какие факторы влияют на эти механизмы?

## 2. САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЧ НА ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ, РИСКИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

### 2.1. Виды воздействия ДЧ на здоровье населения

ДЧ оказывают на здоровье населения прямое и косвенное воздействие.

#### 2.1.1. Прямое воздействие ДЧ на здоровье населения

Прямое влияние ДЧ на организм человека многообразно. В зависимости от гранулометрического, морфологического и химического состава ДЧ могут оказывать следующие виды негативного действия:

- фиброгенное<sup>1</sup>;
- токсическое;
- мутагенное<sup>2</sup>, в том числе эмбриотоксическое<sup>3</sup> и тератогенное<sup>4</sup>;
- гонадотропное<sup>5</sup>;
- раздражающее,
- аллергическое, в том числе фотосенсибилизирующее<sup>6</sup>;
- канцерогенное,
- радиоактивное.

---

<sup>1</sup> Фиброгенное воздействие – это воздействие, при котором в лёгких происходит разрастание соединительной ткани, нарушающее нормальное строение и функции органа.

<sup>2</sup> Мутагенное действие химических веществ – изменение наследственных свойств организма, которые проявляются у его потомства.

<sup>3</sup> Эмбриотоксическое действие – раннее (в период до 4 недель беременности) побочное токсическое действие химических веществ на плод, не связанное с их влиянием на процесс развития органов. Чаще всего результатом является формирование грубых пороков развития, что приводит к прерыванию беременности.

<sup>4</sup> Тератогенность – способность физических, химических или биологических факторов вызывать нарушения процесса эмбриогенеза, приводящие к возникновению врождённых уродств (аномалий развития) у людей или животных.

<sup>5</sup> Гонадотропное действие химических веществ – нарушение репродуктивной функции человека (сперматогенеза у мужчин и овогенеза у женщин).

<sup>6</sup> Фотосенсибилизация – явление повышения чувствительности организма (чаще кожи и слизистых оболочек) к действию ультрафиолетового или видимого излучений.

В основе действия лежит резорбтивно-химический эффект (переход активных примесей из ДЧ в жидкую тканевую среду в результате растворения или экстракции) [31].

Наряду с ДЧ, на организм человека действуют другие многочисленные экологические факторы, в том числе связанные с загрязнением воздуха. Совместное действие всех экологических факторов на организм человека до конца не изучено, однако существуют доказательства того, что ДЧ играют в этих процессах весьма значимую роль.

### *Механизм проникновения ДЧ в организм человека*

Доля ДЧ, вдыхаемых человеком, зависит от свойств частиц, скорости и направления движения воздуха вблизи человека, интенсивности вдыхания, характера вдыхания (через нос или рот). Вдыхаемые частицы могут оседать в какой-либо области дыхательных путей или могут быть выдохнуты. Область оседания и вероятность выдоха частиц зависят от свойств частиц, особенностей строения дыхательных путей, характера дыхания и других факторов.

Частицы жидкостей или растворимые компоненты твёрдых частиц могут абсорбироваться тканями в области оседания. Частицы могут вызывать повреждение ткани вблизи области оседания, если они коррозионные, радиоактивные или другие, способные вызывать различные виды повреждений. Нерастворимые частицы, кроме дыхательных путей, могут попадать и в другие области организма человека, где они могут быть абсорбированы или вызывать биологическое воздействие.

Вероятность вдыхания и оседания частиц различна в зависимости от физического состояния человека, а также различна реакция организма на оседание частиц и его очистку. Несмотря на это, возможно установить нормативы долей взвешенных в воздухе частиц в зависимости от их размера при отборе проб в целях санитарно-гигиенического контроля. Эти нормативы являются соотношениями между аэродинамическим диаметром частиц и массовой долей

взвешенных частиц, которые должны быть собраны, измерены и отнесены к фракциям частиц, попадающих в различные области дыхательных путей при усредненных условиях. Измерение, проводимое в соответствии с этими нормативами, позволяет более точно установить соотношение между измеренной концентрацией частиц и риском возникновения заболеваний.

По мере уменьшения размера ДЧ они проникают всё глубже в организм человека (табл. 7, рис. 26). Есть данные, что частицы размером меньше 0,1 мкм могут проходить через мембраны клетки и мигрировать в другие органы, включая мозг (диаметр эритроцита составляет 7 мкм).

Таблица 7

Места накопления ДЧ в организме человека в зависимости от их характерного размера

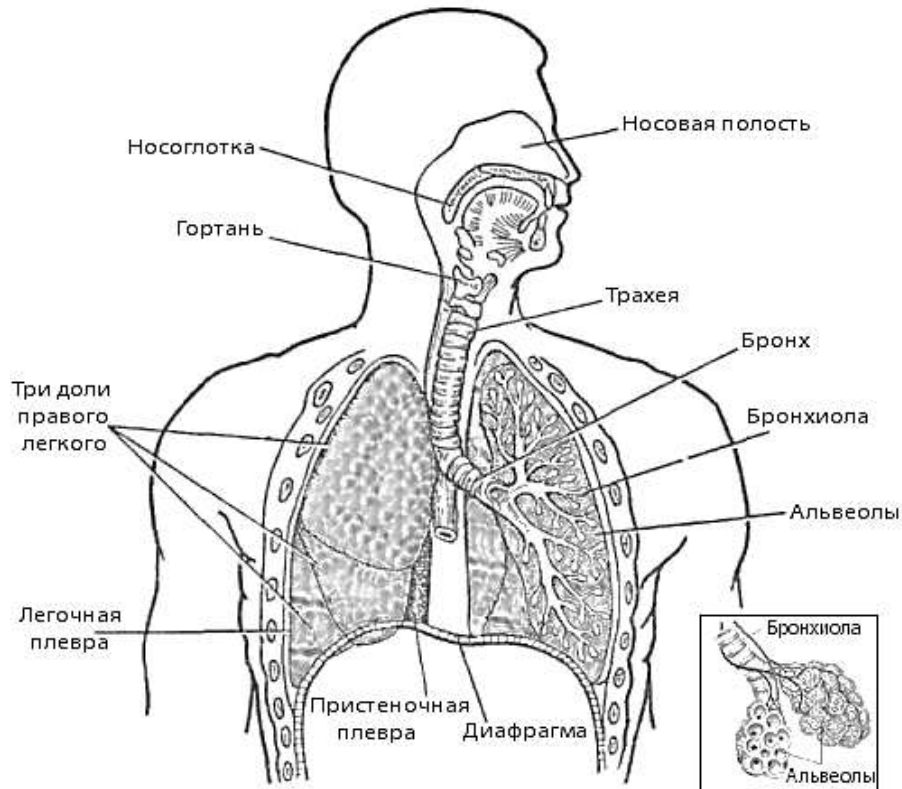
Размер частиц	Отделы дыхательной системы
8...10 мкм	Полость рта
5...8 мкм	Глотка и гортань
3...5 мкм	Трахеи, бронхи
2,5...3 мкм	Бронхиолы
0,5...2,5 мкм	Альвеолы

Диспергирование напрямую определяет проявления биологической активности химических соединений: чем выше дисперсность, тем более активно вещество. Очень мелкие (менее 1 мкм) ДЧ на альвеолярном эпителии практически не адсорбируются, а в большом количестве выдыхаются. Мелкодисперсные ДЧ размером до 5 мкм оседают, главным образом, на стенках альвеол и бронхиол. Как и для газов, резорбция<sup>1</sup> ДЧ тоже зависит от растворимости химических агентов в жирах и в воде. Липидорастворимые<sup>2</sup> частицы легко и быстро проходят через биомембраны. Характер и интенсивность резорбции водорастворимых молекул зависят от размеров, наличия заряда и

<sup>1</sup> Резорбция – поглощение, всасывание веществ при их переработке живым организмом.

<sup>2</sup> Жирорастворимые.

других свойств ДЧ [32]. Десорбция<sup>1</sup> молекул газов, адсорбированных на поверхности ДЧ, во влажной среде организма может оказывать провоспалительное действие, или быть ответственной за те или иные виды резорбтивных эффектов.



*Рис. 26. Строение дыхательной системы человека: воздух входит в дыхательную систему через нос и рот, далее следует через глотку и гортань в трахею, разветвляющуюся на два бронха, которые ведут в лёгкие и ветвятся на бронхиолы, заканчивающиеся альвеолами, где происходит газообмен*

С помощью протоколов (нормативов) по отбору проб устанавливают, что вдыхается только та доля ДЧ, которые находятся около носа и рта. Эта доля называется *вдыхаемой фракцией*. Для некоторых веществ, входящих в состав частиц, даже субфракции, попадающие в дыхательные пути за пределы гортани, являются особо опасными для здоровья.

Механизмы самоочищения лёгких от пылевых частиц удаляют 97...98% осевшей в них пыли.

<sup>1</sup> Десорбция – удаление адсорбированного вещества с поверхности адсорбента.

Устройства, используемые для отбора проб, должны соответствовать протоколу (нормативу) по отбору проб, соответствующему области дыхательных путей, где осаждение частиц исследуемого вещества может привести к биологическому воздействию. Например, выбирают протокол (норматив) по **вдыхаемой фракции**, если вещество может привести к болезни независимо от области оседания; по **торакальной фракции**, если областью оседания были проводящие пути легких (bronхи); по **респираторной фракции**, если областью оседания был участок газообмена от дыхательных бронхиол до альвеол.

У детей и взрослых с определенными заболеваниями дыхательных путей трахеобронхиальная область является более чувствительной к частицам малого аэродинамического диаметра по сравнению со здоровыми взрослыми. В данном случае необходимо устанавливать второй норматив по **респираторной фракции** для групп населения повышенного риска. Также второй норматив для групп населения повышенного риска устанавливают для **трахеобронхиальной фракции**.

Одним из важнейших свойств вдыхаемых человеком ДЧ является наличие на их поверхности электрических зарядов. ДЧ приобретают заряд в результате трения вещества с поверхностью частей машин, трения и соударения их друг с другом или адсорбцией ионов в атмосфере. Заряд ДЧ может быть различным и в значительной мере зависит от химической природы вещества. Отрицательными зарядами отличаются металлическая пыль и основные окислы, положительными зарядами – неметаллическая пыль и кислотные окислы [33]. Дисперсионные аэрозоли имеют большую величину заряда, чем аэрозоли конденсации.

Существует мнение [34], что ДЧ, несущие на себе заряд, задерживаются в органах дыхания в большем количестве, чем нейтральные пылевые частицы (примерно в 2...4 раза), при этом степень задержки ДЧ в дыхательных путях может достигать 70%. Пылевые частицы положительной полярности задерживаются лёгочной

тканью в большей мере, чем частицы отрицательные. Фагоцитоз более активен при электроотрицательной пыли.

### *Сердечно-сосудистые и респираторные заболевания*

Результаты систематической оценки данных, проведённой в 2004 г. Европейским центром ВОЗ по окружающей среде и охране здоровья, показывают, что  $PM_{2,5}$  оказывают серьезное воздействие на состояние здоровья, увеличивая число смертных случаев, связанных с сердечно-сосудистыми и респираторными заболеваниями, а также злокачественными новообразованиями легких.

К числу последствий, связанных с длительным воздействием ДЧ, относятся: усиление симптомов заболеваний нижних дыхательных путей и хронической обструктивной болезни легких, ухудшение легочной функции у детей и взрослых и сокращение ожидаемой продолжительности жизни, преимущественно в связи со смертностью от сердечно-лёгочных нарушений и, по-видимому, рака легких.

Особенно уязвимыми являются чувствительные группы людей, страдающих заболеваниями лёгких или сердца, а также люди пожилого возраста и дети. Например, воздействие ДЧ отрицательно влияет на развитие лёгких у детей, приводя, в частности, к обратимым нарушениям лёгочной функции, а также к хроническому замедлению темпов роста лёгких и долговременной недостаточности лёгочной функции.

Результаты большого числа краткосрочных и долгосрочных эпидемиологических исследований показывают, что экспозиция по воздуху, загрязненному ДЧ, связана с повышением риска преждевременной смерти от пневмокардиальных заболеваний.

В Гарвардском исследовании изучали 8000 человек из 6 городов с различными уровнями загрязнения воздуха в течение 14...16 лет. Было установлено статистически значимое повышение смертности на 26% в наиболее загрязнённых городах по сравнению с наименее загрязнёнными. Большая часть этой повышенной смертности приходится на долю пневмокардиальных заболеваний. Связь между



загрязнением воздуха и повышенной смертностью сохранялась даже после внесения поправок, связанных с индивидуальными факторами риска, включая курение, пол, индекс массы тела, образование, профессию, гипертонию и диабет. Наиболее устойчивую зависимость установили для повышенных уровней таких загрязнителей как  $PM_{2,5}$  и сульфаты.

Американское онкологическое общество изучало 500 тыс. человек из всех 50 штатов в течение более 16 лет. Установили повышение количества пневмокардиальных смертей на 6% для каждых  $10 \text{ мкг/м}^3$  повышения среднегодового уровня  $PM_{2,5}$ . Между уровнем  $PM_{2,5}$  и негативным воздействием на здоровье человека существует линейная зависимость без каких-либо признаков «безопасного» порогового уровня. Дальнейший анализ полученных данных показал повышение риска смертности от сердечно-сосудистых заболеваний на 12% при увеличении уровня  $PM_{2,5}$  на  $10 \text{ мкг/м}^3$ , причём наибольший вклад в это повышение риска вносит атеросклероз сосудов сердца. Кроме того, повышается риск аритмии и остановки сердца.

В Нидерландах изучали 5 тыс. взрослых в течение 8 лет и установили, что экспозиция по загрязнителям воздуха, связанных с автомобильным транспортом, более тесно связана с повышением смертности, чем общие фоновые уровни загрязнения воздуха в городах. Риск пневмокардиальной смерти увеличивается почти вдвое для людей, проживающих около оживленных магистралей, по сравнению с людьми, которые живут на определенном расстоянии от них.

В городах Европы и США изучали краткосрочные последствия загрязнения воздуха. Они также указывают на аналогичную связь между риском пневмокардиальных смертей и загрязнением воздуха пылевидными частицами. Суточная пневмокардиальная смертность увеличивалась на 0,6% для каждых  $10 \text{ мкг/м}^3$  повышения уровня  $PM_{2,5}$ .

Анализ этих данных и данных других исследований, в которых рассматривались более длительные периоды времени между уровнями загрязнения воздуха и риском смерти от сердечно-сосудистых заболеваний, показывает, что установленная связь не просто отражает

ускорение смерти людей, которые уже близки к естественной смерти. Механистические исследования указывают, что загрязнение воздуха дисперсными частицами приводит к краткосрочным и долгосрочным последствиям, способствуя развитию сердечно-сосудистых заболеваний, а также вызывая острые сердечные приступы.

### *Болезни системы кровообращения*

Исследование в США показало, что загрязнение воздуха частицами  $PM_{2,5}$  было связано с более быстрым утолщением двух внутренних слоёв сонной артерии. Снижение уровня загрязнения воздуха мелкодисперсными частицами в долгосрочном периоде было связано с более медленной прогрессией утолщения стенок рассматриваемого сосуда. Приняв во внимание прочие факторы риска, такие как курение, обнаружили, что толщина сонной артерии увеличивается в среднем на 0,014 мм за год. Утолщение двух внутренних слоев ткани этого ключевого кровеносного сосуда, который подает кровь в голову, шею и мозг, происходит гораздо быстрее после нахождения в зоне высокой концентрации ДЧ, загрязняющих воздух.

Образованию или развитию атеромы (холестериновых бляшек) способствуют изменения в обмене холестерина, приводящие к отложению липидов под поверхностью клеток эндотелия, выстилающих стенки артерий, воспалительные процессы, повреждение клеток эндотелия и/или утоньшение клеток гладкой мускулатуры в стенках артерий.  $PM_{2,5}$  способны накапливаться, вызывая воспаление сосудов и атеросклероз. Частицы меньше чем 0,1 мкм, могут быть даже более опасны для сердечно-сосудистой системы, поскольку способны проникать в большой круг кровообращения. Наноразмерные ДЧ от транспортных средств могут приводить к изменению артерий, вредя защитным качествам так называемого «хорошего холестерина».

ДЧ в воздухе имеют сложную природу и могут вызывать сердечно-сосудистые заболевания посредством различных механизмов. Вдыхание мелкодисперсных ДЧ вызывает местную лёгочную и системную воспалительную реакцию, окислительный стресс, что в свою

очередь ведёт к вегетативным дисфункциям, повреждению сосудов и атеросклерозу. Этот фактор ухудшает и реологические свойства (текучесть) крови, увеличивая концентрацию фибриногена, активируя тромбоциты и стимулируя синтез сосудосуживающих веществ (эндотелинов). Экспозиция по ДЧ приводит к повышению вязкости крови. Снижается изменчивость сердечного ритма, что повышает риск последующего развития аритмии и других патологий сердца. Все эти факторы могут вносить свой вклад в повышение риска сердечно-сосудистых заболеваний.

Ещё одним возможным механизмом влияния мелкодисперсных ДЧ на развитие сердечно-сосудистых заболеваний является способность ДЧ адсорбировать лёгкие аэроионы.

### *Болезни органов дыхания*

Одним из недостаточно изученных факторов поражения организма человека ДЧ является возможное биологическое воздействие, связанное с инфекционными агентами, которые могут находиться на поверхности или в объёме ДЧ. К инфекционным агентам можно отнести непосредственно микроорганизмы (бактерии, грибы, вирусы), а также их фрагменты.

Поскольку микроорганизмы оседают на ДЧ (пылебактериальная смесь), некоторые из них довольно быстро погибают под действием солнечного света и дефицита влаги. В таком состоянии одни возбудители заболеваний могут сохраняться в воздухе помещений 2...3 часа (грипп, дифтерия), а некоторые – в течение 3...4 месяцев (туберкулез) [35].

В ходе исследований выявлена положительная корреляционная связь ( $r = +0,69$ ) между уровнем  $PM_{2,5}$  и количеством микробных тел (возбудителей заболеваний верхних дыхательных путей, гнойно-септических инфекций – стафилококков, стрептококков, синегнойной палочки, кишечной палочки, грибов и т.п.) в пробах атмосферного воздуха вдоль автомобильной дороги. Полученные результаты

подтверждают возможность существования воздушно-пылевого пути передачи инфекции в атмосфере с высоким уровнем ДЧ.

Известно, что ингаляционным путём может быть инициирован инфекционный процесс в том случае, если инфекционный агент находится во вдыхаемом воздухе в достаточно высокой концентрации, а организм высокочувствителен или ослаблен.

Существует зависимость степени фиброгенного действия кварцевой пыли от величины частиц. Наибольшее развитие коллогенного фиброза<sup>1</sup> в лёгких вызывают частицы размером 1...2 мкм. Кварцевая пыль, у которой размер частиц 1...0,5 мкм, а также меньше 0,5 мкм, оказалась менее фиброгенной, чем фракция в 1...2 мкм, хотя и не в такой степени, как пылевые частицы крупнее 2 мкм.

Снижение степени фиброза, вызванного кварцевой пылью менее 1 мкм, обусловлено повышением степени аморфизации поверхности частиц (разупорядочение кристаллической решетки кварца). Для конденсатов двуокиси кремния снижение степени фиброза отмечается при введении частиц менее 0,05 мкм (в связи с возрастанием скорости элиминации частиц из лёгочной ткани вследствие более высокой растворимости).

Это происходит потому, что как размер частиц, так и аморфизация их пограничного слоя могут оказывать непосредственное влияние на концентрацию активных химических центров на поверхности кремнезёма. Изучение пыли другой химической природы (нерастворимых чёрных промышленных саж) установило, что и для них имеется граница дисперсности, за пределами которой наблюдается снижение степени кониозоопасности<sup>2</sup>. Таким образом, можно сделать вывод, что ДЧ фиброгенны тем больше, чем выше их цитотоксичность<sup>3</sup> и чем медленнее они выводятся из лёгких.

---

<sup>1</sup> Фиброз – разрастание соединительной ткани с появлением рубцовых изменений в различных органах, возникающее, как правило, в результате хронического воспаления.

<sup>2</sup> Кониоз – общее название болезней, вызываемых воздействием пыли на организм.

<sup>3</sup> Цитотоксичность – это способность химических веществ (включая медикаменты, вирусы и антитела) повреждать клетки тканей.

Механизм повреждающего действия пыли можно представить поэтапно [36]: немногочисленные крупные частицы размером более 2 мкм не захватываются клеточными элементами и в свободном виде «прорываются» сквозь стенку альвеолы. Образуется травматический дефект ткани, вокруг которого проявляется некроз<sup>1</sup>. В капиллярах, окружающих участок повреждения, возникают обширные очаги тромбоза<sup>2</sup>. Частицы кварца от 2 до 0,5 мкм оказывают цитотоксический эффект, разрушая фагоцитировавших<sup>3</sup> макрофагов<sup>4</sup>. Полное разрушение наблюдается при наличии в цитоплазме уже 2...4 таких частиц. Наиболее мелкодисперсные частицы (0,3...0,02 мкм) не вызывают некротических изменений цитоплазмы, даже накапливаясь по 10...20 пылинок в фаголизосомах макрофага, хотя и вызывают её «рабочую» гипертрофию.

### *Микроэлементозы*

В настоящее время введен термин *микроэлементоз*, объединяющий все патологические процессы, вызванные избытком, дефицитом или дисбалансом микроэлементов. В основу их классификации положен принцип, согласно которому на первое место выдвигается фактор этиологии (причины возникновения патологии) и характер его проявления. Промышленные регионы с особо интенсивным загрязнением окружающей среды могут стать зонами сильных техногенных микроэлементозов. Одной из особенностей микроэлементов является их способность накапливаться в организме. Поэтому перенасыщение ими воздуха и почвы может привести к значительным концентрациям в организме человека.

---

<sup>1</sup> Некроз – это патологический процесс, выражающийся в местной гибели ткани в живом организме в результате какого-либо экзо- или эндогенного её повреждения.

<sup>2</sup> Тромбоз – прижизненное формирование внутри кровеносных сосудов свёртков крови, препятствующих свободному потоку крови по кровеносной системе

<sup>3</sup> Фагоцитоз – процесс, при котором клетки (простейшие, либо специально предназначенные для этого клетки крови и тканей организма – фагоциты) захватывают и переваривают твёрдые частицы.

<sup>4</sup> Макрофаги – это особенные клетки крови, которые необходимы для нормальной активности защитных сил организма.

Воздухоносная система является вторым по значению путём поступления микроэлементов в организм человека. Аэрогенный путь актуален для алюминия, кремния, никеля, кадмия, цинка, мышьяка, золота, свинца и т.д. Значение микроэлементов в таких патологиях, как ринит, фарингит, бронхит, как правило, недооценивается, и объясняется другими патогенными факторами. При хронических поражениях дыхательных путей металлами возникает атрофия эпителиального покрова, проявляются риниты. Бериллий обладает уникальной способностью к аллергизации организма. Причем именно хронические формы ингаляционных интоксикаций исследованы неполно [37].

Дефицит многих микроэлементов может возникать для одних элементов в результате дисбаланса с другими. Микроэлементные токсикозы – реальное явление в современных экологических условиях, результат постоянного загрязнения сред жизни вследствие выбросов в атмосферу солей и оксидов металлов.

Ряд микроэлементов образует пары или триады, которые оказывают синергическое (действующее совместно) или антагонистическое действие на различные физиологические и патологические показатели: Cu и Zn, Fe и Mn, Fe и Zn, Cd и Cu.

Микроэлементный статус тесно связан с возникновением и прогрессированием злокачественных опухолей. Повышение частоты онкологических заболеваний связывается с дефицитом Mg, Se, Mo и, напротив, с повышенным уровнем As, Cd, Ni, Cu, Mn, V, Sr, сульфатов.

Влияние микроэлементов на обменные процессы реализуется, прежде всего, через их воздействие на генетический аппарат клетки. Связываясь с нуклеотидами, ионы металлов вызывают существенные изменения в структуре нуклеиновых кислот. Поэтому дефицит, избыток и дисбаланс микроэлементов в организме человека может приводить к различным генетическим нарушениям на уровне половых клеток в виде генных, хромосомных или геномных мутаций. Нарушение обмена микроэлементов (как недостаток их, так и избыток) в организме беременной женщины может вызывать различные пороки развития.

*Цитогенетические и иммуотоксические эффекты*

*Мутагенная активность веществ, составляющих ДЧ.* Под мутагенной активностью химических факторов в настоящее время понимают их способность оказывать повреждающее действие на генетические структуры организма и увеличивать частоту мутаций в соматических<sup>1</sup> и половых клетках человека [38]. Соматические мутации затрагивают жизнедеятельность настоящего организма, а половые мутации проявляются в последующих поколениях. Мутации хромосом в половых или зародышевых клетках ведут к образованию неполных гамет<sup>2</sup>, в результате которых может произойти рождение детей с хромосомными аномалиями или синдромами.

Мутагенной активностью обладают несколько тысяч химических соединений. Исследованиями доказано, что факторы химического происхождения на несколько порядков превышают активность физических факторов (ионизирующая радиация), часто обладают значительно более специфическим и тонким действием на структуру клетки, зависящим от природы объекта и стадии развития клетки [39].

Характеризуя механизм генотоксичности, следует отметить, что некоторые химические вещества реагируют непосредственно с ДНК, но большинство из них требуют метаболической активации. Генотоксичность передаётся и в результате взаимодействия побочных продуктов или соединений с межклеточными липидами, белками или кислородом.

Последствия повреждения ДНК зависят от дозы токсиканта. Высокие дозы вызывают цитостатический эффект (гибель пула делящихся клеток), дистрофические изменения в клетке, более низкие – канцерогенное, тератогенное действие. Неблагоприятные эффекты мутагенеза определяются также и тем, в клетках какого типа он реализуется: половых или соматических, стволовых и делящихся или созревающих и зрелых. Результатами грубых мутаций половых и

---

<sup>1</sup> Соматические клетки – клетки, составляющие тело (сому) многоклеточных организмов и не принимающие участия в половом размножении.

<sup>2</sup> Гаметы – репродуктивные клетки, имеющие гаплоидный (одинарный) набор хромосом и участвующие в гаметном, в частности, половом размножении.

делящихся клеток развивающегося плода являются: стерильность особи, врождённая патология у потомства, тератогенез, гибель плода. Мутации стволовых и делящихся соматических клеток сопровождаются структурно-функциональными нарушениями тканей с непрерывной физиологической регенерацией (система крови, иммунная система, эпителиальные ткани) и канцерогенезом. Повреждение токсикантом ДНК зрелой соматической клетки не приводит к пагубным последствиям для организма [40].

Установлено, что наиболее респираторные фракции ДЧ, загрязняющих атмосферный воздух в городах, размером менее 10 мкм обладают генотоксической активностью, способствуют повышению уровня ДНК-аддукторов<sup>1</sup> и вызывают хромосомные повреждения [41]. Очевидно, что причиной подобных эффектов могут быть тяжёлые металлы и бенз(α)пирен. Последний, помимо мутагенного эффекта, обладает ещё и значительной эстрогенной<sup>2</sup> активностью, тератогенным, и эмбриотоксическим действием. Он опасен для человека даже при малой концентрации, поскольку обладает свойством биоаккумуляции<sup>3</sup>. Будучи химически сравнительно устойчивым, бенз(α)пирен может долго мигрировать из одних объектов в другие. В результате многие объекты и процессы окружающей среды, сами не обладающие способностью синтезировать бенз(α)пирен, становятся его вторичными источниками.

Международная группа экспертов отнесла бенз(α)пирен к числу агентов, у которых наблюдались также другие эффекты, помимо канцерогенеза. Так, например, было обнаружено повреждающее действие на сперму и развитие яйцеклетки, что позволяет воспринимать бенз(α)пирен, как репротоксикант.

Из перечня металлов, обладающих мутагенной активностью и стабильно присутствующих в атмосферном воздухе (в виде ДЧ), почве (в ионообменной и непрочно адсорбированной формах), подземных

---

<sup>1</sup> ДНК-аддукт – соединение какой-либо молекулы с ДНК.

<sup>2</sup> Эстроген – это гормон, вырабатываемый у женщин в яичниках.

<sup>3</sup> Биоаккумуляция – накопление организмом химических веществ, поступающих из окружающей среды в концентрации большей, чем они находятся в окружающей среде.



водах и водах открытых водоемов (в виде взвешенных частиц, коллоидных частиц и растворенных соединений), наиболее распространенными являются марганец, никель и хром. Данные металлы входят в список приоритетных загрязняющих веществ, принятый ЕС в 1982 г. и Агентством по охране окружающей среды США (US EPA). Они относятся к 1-му и 2-му классам опасности.

Оценка качества атмосферного воздуха в городах РФ за период 2009...2011 годов, выполненная по данным Федерального информационного фонда социально-гигиенического мониторинга (ФИФ СГМ), свидетельствует, что марганец и его соединения, хром (VI), никель и его соединения входят в перечень приоритетных загрязнителей атмосферного воздуха от промышленных предприятий и автотранспорта [42]. Загрязнение атмосферного воздуха металлами на уровне до двух ПДК<sub>сс</sub> является опасным для развития хромосомных изменений. Никеля оксид вошел в перечень ведущих загрязнителей атмосферного воздуха, превышающих ПДК в 5 раз и более в 2009...2011 годах.

Анализ загрязнения атмосферного воздуха городских поселений Российской Федерации по отдельным примесям показал, что из перечня веществ, обладающих мутагенной и репротоксикантной активностью, наибольший удельный вес проб атмосферного воздуха с уровнем загрязнения, превышающим гигиенические нормативы, отмечается по сероуглероду, формальдегиду, бенз(α)пирену [42]. Источником загрязнения химическими мутагенами (в первую очередь металлами) атмосферного воздуха может являться загрязнённая почва.

К наиболее распространенным в почвах города веществам, обладающим мутагенной активностью, можно отнести кадмий, марганец, медь, мышьяк, никель, свинец, цинк, бенз(α)пирен [40].

Наиболее активными мутагенами являются формальдегид, никель и его соединения. Индекс мутационной активности данных соединений составляет 7...15 [43]. Известно, что хром, кадмий проявляют синергизм в реализации геноповреждающего действия [44]. Выявлена также зависимость изменений хромосомного аппарата как у взрослого, так и у детского населения от уровня содержания в крови химических веществ,

обладающих мутагенными свойствами. Установлено, что у детей с повышенным содержанием в крови формальдегида, бензола, марганца, хрома, свинца частота встречаемости полиморфных изменений в 5,4 раза превышает средние популяционные показатели. Вклад химических веществ, обладающих мутагенной активностью, в формирование хромосомных изменений по типу полиморфных составляет 10...28 % [45].

*Репротоксичность и тератогенность химических соединений, входящих в состав ДЧ.* Репродуктивная токсичность включает два больших класса: действие на репродуктивную способность и действие на развивающийся организм [46]. Под репротоксичностью химических соединений понимают способность вызывать нарушение репродуктивного здоровья (репродуктивные токсиканты) или внутриутробного развития плода. В странах Евросоюза понятием «токсичный для репродукции» определяется вредное воздействие на половую функцию и фертильность<sup>1</sup> взрослых мужчин и женщин, а также на развитие потомства. Повышение уровня мутаций у одного человека в 2 раза увеличивает вероятность рождения у него ребёнка с наследственным дефектом на 10%, что указывает на реальную возможность угрозы генетических последствий загрязнения объектов среды обитания мутагенными веществами [41].

Репродуктивная система мужчин является одной из наиболее уязвимых мишеней при действии неблагоприятных факторов внешней среды в силу особенностей её морфофункциональной организации, в частности, наличия огромного количества недифференцированных и постоянно делящихся клеток в половых железах, что сопровождается не только развитием бесплодия, но и увеличением риска невынашивания беременности у женщин и формированием у потомства аномалий развития [47].

Впервые в 1992 году в ряде исследований была доказана связь между возрастанием риска мужского бесплодия и увеличением

---

<sup>1</sup> Фертильность – способность половозрелого организма производить жизнеспособное потомство.

показателей загрязнения окружающей среды у мужчин двух поколений. При анализе образцов спермы мужчин из 21 промышленно развитой страны Европы и Соединенных Штатов Америки за период с 1938 по 1990 год количество сперматозоидов снизилось на 50% (приблизительно на 1% в год). Поскольку были обследованы мужчины двух поколений, авторами сделан вывод о том, что отмеченные изменения связаны не с генетическими нарушениями, а с неблагоприятным воздействием химических факторов окружающей среды. Расширенный анализ аналогичных данных за 1934...1996 годы подтверждает указанную тенденцию. Авторами исследования показано, что снижение концентрации сперматозоидов у мужчин в США составило приблизительно 1,5% в год, а в европейских странах и в Австралии – приблизительно 3% в год.

По данным научного Центра акушерства, гинекологии и перинатологии им. В.И. Кулакова РАМН, частота нарушений репродуктивной функции мужчин в структуре бесплодного брака составляет 47,2%. Удельный вес «мужского фактора» в семейном бесплодии за последние годы повысился с 30% до 50% и продолжает расти [48].

Нарушения в репродуктивной системе мужчин при воздействии ряда тяжёлых металлов (хрома, никеля, кадмия) могут происходить из-за повреждения механизмов нейроэндокринного контроля тестикулярной функции (прежде всего эффекты, связанные с синтезом и секрецией тестостерона) или функций центральной нервной системы (эффекты, связанные с гонадотропинами) [40].

Имеющиеся данные свидетельствуют о мощном генотоксическом прессинге химических факторов среды обитания на женщин репродуктивного возраста. Мутации в половых клетках приводят к повышению частоты наследственной патологии. Мутации в клетках эмбриона ведут к снижению приспособленности будущего ребенка, повышению частоты врожденных пороков развития, гибели эмбриона, задержке внутриутробного развития. Мутации в соматических клетках

повышают частоту возникновения злокачественных новообразований, нарушают иммунитет, обуславливают преждевременное старение [49].

Наиболее выраженное воздействие химических мутагенов регистрируется на организм беременных женщин, фетоплацентарный комплекс<sup>1</sup>, эмбрион и плод. В результате тератогенного действия – нарушения эмбрионального развития плода, возрастает риск формирования врождённых пороков развития у плода и новорожденного, основой которых могут являться хромосомные нарушения.

В районах с загрязнённым атмосферным воздухом беременность и роды чаще протекают с осложнениями. Дети рождаются с низкой массой тела, а также с функциональными отклонениями со стороны сердечно-сосудистой и дыхательной систем. В странах с развитым здравоохранением в больницах общего профиля дети с наследственной патологией составляют 15...20 %. Среди умерших в возрасте до 1 года 30% составляют пациенты с врожденными аномалиями. По генетическим причинам не вынашивается за год 25% беременностей, появляется на свет 250 тысяч детей с генетическими дефектами, в том числе 100 тысяч с тяжёлой наследственной инвалидностью. Сопоставление частоты врожденных пороков развития (ВПР) в городах с развитой химической промышленностью по сравнению с сельской местностью позволило установить превышение этой патологии в 3 раза у детей, родившихся на урбанизированных территориях [40]. Более высокие цифры распространённости ВПР обнаруживаются также и в загрязнённых районах Москвы по сравнению с относительно «чистыми».

Отрицательное действие токсичных веществ на плод может быть связано с попаданием их в ткани эмбриона и плода из крови беременной женщины вследствие их способности преодолевать плацентарный барьер. Известно более чем 600 химических веществ, способных проникать от матери к плоду через плаценту и в той или иной степени отрицательно влиять на его развитие. В промышленно развитых

---

<sup>1</sup> Фетоплацентарный комплекс – это совокупность двух самостоятельных организмов, объединённых общей целью, задачей и конечным результатом – обеспечением нормального развития плода.

регионах с высоким уровнем химического загрязнения объектов окружающей среды средняя популяционная частота самопроизвольных абортс варьируется от 6% до 18%. Не менее 50% всех случаев самопроизвольных абортс вызваны мутационными причинами [50].

Появление в составе ДЧ органических примесей непросто спрогнозировать. Так, в исследованиях, проведенных в США, обнаружена способность ДЧ адсорбировать антипирен<sup>1</sup> – пентабромдифениловый эфир (PBDEs), вызывающий возникновение у людей репродуктивных и неврологических расстройств. Производители электроники начали использовать его ещё в 1970-х с целью предотвращения самовозгорания техники, и были уверены, что появление антипирена в воздухе маловероятно. Огнезащитные составы на основе эфиров дифенила (PBDEs) широко используются для повышения огнестойкости бытовых вещей во многих областях. Это и производство электрических приборов, имеющих интегральные схемы, пластмассовые детали, и внутренняя отделка автомобилей, железнодорожных вагонов, самолётов, и производство стройматериалов (пенных наполнителей, изоляционных плит), изготовление мебели, штор, ковров, упаковочных материалов на основе пенополиуретана. В небольших количествах PBDEs входит также в состав тканей, красок, лаков, изделий из резины. Весовое содержание в этих продуктах составляет от 5% до 30%. Попадает как в атмосферу, так и на почву, но сосредотачивается, в конечном итоге, преимущественно в почве.

В окружающей среде PBDEs в основном сорбируется на ДЧ, что может привести к очень широкому его распространению. Воздействие на человека происходит через пищу и ингаляционным путём. Согласно оценке риска, проведённой в ЕС, в течение предполагаемого десятилетнего срока службы изделия ежегодно в результате испарения в окружающую среду попадает приблизительно 3,9% PBDEs, содержащегося в изделии. Причём более высокий коэффициент выброса характеризует виды использования, предполагающие

---

<sup>1</sup> Антипирен – компонент, добавляемый в материалы органического происхождения с целью обеспечения огнезащиты. Антипирены замедляют воспламенение и горение в связи с тем, что содержат замедлители горения.

интенсивную степень износа, такие как антикоррозионное покрытие днищ автомобилей и подошвы для обуви. Согласно оценке рисков ЕС, в течение всего срока службы этих продуктов коэффициент выброса составляет порядка 2...10%. С учетом этого в регионе ЕС, по оценкам, ежегодно в почву попадает 15,86 тонны, а в атмосферу – 0,021 тонны PBDEs [51].

Подробная токсикологическая оценка PBDEs проведена в Проекте характеристики рисков ЮНЕП [51]. Воздействие низких концентраций PBDEs на человека ингаляционным путём показало, что PBDEs накапливается в крови, грудном молоке и жировых тканях. PBDEs проявляет свойства репротоксиканта и тератогена, при этом он обнаружен в крови 97% женщин в США. У детей средние концентрации вещества в крови были в 3,2 раза выше, чем у их матерей. Антипирен оказывает влияние на гормональный статус (гормоны щитовидной железы и эстрогены). У беременных женщин изменяются показатели гормонов щитовидной железы настолько, что представляет угрозу для формирования центральной нервной системы (ЦНС) ребенка.

EPA также отметило, что PBDEs отрицательно влияет на развитие умственных способностей. Эффекты, связанные со снижением интеллекта, были особенно очевидны у детей в четырёхлетнем возрасте. Опыты на мышах показали, что даже единственная доза может вызывать стойкие изменения в поведении, включая гиперактивность.

### *Канцерогенный эффект*

Типичные вещества, адсорбируемые на поверхности ДЧ – полициклические ароматические углеводороды (PAHs), нитропроизводные PAHs и серосодержащие PAHs. Примеры PAHs, наиболее часто извлекаемых из сажи, включают бенз(α)пирен, 1,12-бензоперилен, коронен (известный как супербензол, поскольку имеет 6 бензольных колец – C<sub>24</sub>H<sub>12</sub>), флуорантен и пирен.

Обнаружена способность частиц PM<sub>2,5</sub> вызывать рак лёгкого. Причиной этого могут быть как физические, так и химические факторы.

Радиоактивная пыль (содержащая радиоактивные элементы или сорбировавшиеся на поверхности частиц дочерние продукты распада радона и торона) оказывает опосредованное воздействие благодаря тому или иному виду излучения. По оценкам экспертов Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) и других организаций здравоохранения, риск смертности от рака лёгкого из-за воздействия радона и продуктов его распада, содержащихся в атмосфере зданий, составляет 10...14 % от общего числа случаев.

Труднорастворимые радиоактивные изотопы длительно задерживаются в легких и лимфатических узлах, облучая их ткани; легкорастворимые абсорбируются в кровь и становятся источником внутреннего облучения других тканей. Скорость выведения радиоактивных аэрозолей из организма различна, быстрее выделяются хорошо растворимые вещества. Особенно опасны попавшие в организм долгоживущие изотопы, которые в течение всей жизни могут быть источником ионизирующего излучения [52].

В настоящее время считается, что негативное воздействие на здоровье человека объясняется действием многих компонентов  $PM_{2,5}$ , связанных с черным углеродом, например, органических веществ, таких как ПАУ, которые известны своими канцерогенными и прямыми токсическими эффектами на клетки, а также действием металлов и неорганических солей. Недавно Международное агентство по исследованию рака (IARC) классифицировало выхлопные газы дизельных двигателей (состоящие главным образом из ДЧ) как канцерогенные (группа 1) для человека. В этот же список входят некоторые ПАУ и родственные им вещества, а также продукты сгорания твёрдых видов топлива в бытовом секторе.

Ранее IARC относило чёрный углерод (сажу) так же, как и бенз(α)пирен, к группе 2В (возможно канцерогенный для человека). Очевидно, что опухоли инициировались не самой сажей, а адсорбированными на её поверхности ПАУ. Итогом токсикологической оценки сажи стали выводы о возможной канцерогенности для человека, и убедительной канцерогенности для экспериментальных животных.

Согласно данным IARC, не все полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), адсорбированные чёрным углеродом, вызывают онкологию. Тем не менее, некоторые из них могут оказывать опосредованное действие. Так пирен, не являясь канцерогеном, способен усиливать канцерогенное действие бенз(а)пирена. Сам же бенз(а)пирен классифицируется IARC как мутаген и канцероген.

Мелкодисперсные продукты износа шин могут вызывать аллергические реакции, бронхиальную астму, онкологические заболевания разной этиологии и патогенеза, а при контакте со слизистой оболочкой и кожным покровом – конъюнктивит и ринит. Международным агентством по исследованию рака, а в нашей стране – Федеральным центром Госсанэпиднадзора – предприятия резиновой и шинной промышленности включены в список канцерогеноопасных.

Установлено, что в шинной пыли присутствует более 140 химических соединений различной степени токсичности, но особенно опасны для здоровья человека полиароматические углеводороды и летучие канцерогены N-нитрозамины [53].

Выполненные в 1997...2001 годах исследования химического состава шинной пыли и мелкодисперсного аэрозоля, взятых от протекторов различных шин отечественного и импортного производства [53], позволили определить, что в килограмме шинной пыли и мелкодисперсных ДЧ количество летучих N-нитрозаминов достигает 70 мкг.

Источником N-нитрозаминов и ПАУ в резинах являются высокоароматические нефтяные масла, используемые в качестве пластификаторов при производстве резин. Наличие летучих N-нитрозаминов в резинах объясняется двумя причинами: присутствием примесей в ингредиентах резиновых смесей и возникновением их в процессе её вулканизации. Вследствие своей летучести канцерогены в виде N-нитрозаминов, вызывающих рак, способны выделяться из шинных резин в окружающую среду, как при эксплуатации шин в виде пыли и мелкодисперсных ДЧ, так и в газообразном виде даже при хранении резиновых изделий [53].



## 2.1.2. Косвенное воздействие ДЧ на здоровье населения

### *Влияние ДЧ на аэроионный состав воздуха*

Респирабельная фракция ДЧ является активным поглотителем отрицательно заряженных молекул кислорода. Эти молекулы притягиваются к ДЧ, а потому не выполняют своих биологических функций. Число лёгких аэроионов резко уменьшается, как только в воздухе появляются ДЧ. Они адсорбируют лёгкие аэроионы (АИ) и таким образом увеличивают число тяжёлых частиц (их количество находится в прямом соответствии со степенью загрязнения атмосферы) [34].

В нижних слоях атмосферы основными ионизаторами воздуха являются радиоактивные вещества земной коры и космические лучи. Под их воздействием у поверхности земли в одном кубометре воздуха образуется 1,5...1,9 пар ионов в секунду. Первоначально возникающие ионы представляют собой отдельные молекулы с одним или несколькими элементарными зарядами, так называемые *лёгкие ионы*. Время жизни лёгкого иона весьма непродолжительно. Вокруг него образуется комплекс из нейтральных молекул. Обычно образование комплекса молекул с единичным зарядом происходит, когда нейтральные молекулы имеют большой дипольный момент и легко поляризуются. В зависимости от количества молекул, окружающих ион, он может быть как лёгким, так и средним. Время жизни этих ионов мало. Более устойчиво состояние иона, который образуется при присоединении лёгких и средних ионов к нейтральным аэрозольным частицам. Образующийся в этом случае ион называют тяжёлым [2].

Чистый воздух содержит больше лёгких ионов, загрязненный – больше тяжёлых ионов. Так, количество лёгких ионов на берегах горных рек и водопадов достигает 40 тысяч в 1 см<sup>3</sup> воздуха, в сельской местности – 2...3 тысячи/см<sup>3</sup>, в промышленных городах их число снижается до 40 в 1 см<sup>3</sup> [35].

Установлено, что лёгкие ионы оказывают положительное действие на организм и являются показателями санитарного благополучия воздуха. Для гигиенической оценки аэроионного режима существует

показатель загрязнённости воздуха, который определяется отношением суммы тяжёлых аэроионов положительной и отрицательной полярности к сумме положительных и отрицательных лёгких АИ. Чем меньше величина показателя загрязнённости воздуха, тем более благоприятен аэроионный режим. При величине, равной 50 и более, воздух надо считать загрязнённым. Концентрация лёгких АИ обеих полярностей зависит от степени урбанизации местности и от экологического состояния окружающей человека среды обитания. На курортах и в горной местности концентрация лёгких АИ несколько выше нормы, но полезное действие остаётся, а в крупных городах на улицах с интенсивным движением транспорта концентрация лёгких АИ ниже нормы и может приближаться к нулю. Это свидетельствует о загрязнённости атмосферного воздуха. Отрицательные АИ более чувствительны к примесям в сравнении с положительными АИ [54].

Известно, что некоторая часть отрицательных АИ при дыхании оседает на стенках верхних дыхательных путей, трахеи, бронхов и бронхиол. Однако около 80% из них достигает альвеол, где совершается газообмен. Заряжая электроотрицательно стенки воздухоносных путей, они отталкиваются от них и легче достигают альвеолярных мешочков. Одновременно они раздражают рецепторы этих путей и благотворно влияют на тонус ЦНС, в частности, на дыхательный центр, что проявляется углублением и урежением дыхания, а также усилением газообмена в лёгких. Положительные АИ вызывают противоположный эффект [34].

Все жидкости организма (цитоплазма клеток, межклеточная жидкость, лимфа и кровь) являются электростатическими коллоидами, т.к. их частицы несут отрицательный заряд. Такой же заряд имеют плазма и все форменные элементы крови, что создает электрораспор между ними и препятствует их столкновению друг с другом и агрегации, а это создает оптимальные условия для циркуляции и микроциркуляции крови.

Поступление в кровоток отрицательных АИ увеличивает отрицательные заряды элементов крови и электрораспор между

форменными элементами крови и белками плазмы. Кровь, обогащенная АИ кислорода, омывает все клетки организма, увеличивает их отрицательный заряд и поддерживает золеобразное (жидкое) состояние их цитоплазмы и оптимальный уровень метаболизма. Отрицательные АИ обеспечивают стабильное состояние клеток и предотвращают их электроразрядку, а следовательно, коагуляцию протоплазмы с переходом из золя в гель.

Положительные АИ уменьшают отрицательный заряд форменных элементов крови, белков плазмы и мембран всех клеток организма, что снижает устойчивость электростатических систем и способствует их коагуляции – изменению коллоидного состояния цитоплазмы в сторону геля, приводящему к ухудшению метаболизма.

Обнаружено, что после 30 минут дыхания воздухом с избытком отрицательных АИ потребление кислорода кишечной стенкой возрастает примерно на 50%. Данный факт объясняет эффективность лечения АИ кислорода язвенной болезни желудка и 12-перстной кишки. Положительные АИ угнетают окислительные процессы. Особенно восприимчивы к действию АИ мозг, печень и почки [55].

В экспериментах доказано, что отрицательные АИ кислорода меняют потенциал цельной активной крови в отрицательную сторону. Скорость оседания эритроцитов (СОЭ) при ингаляции АИ отрицательного знака, как правило, замедлялась, ибо увеличение электрораспора между эритроцитами замедляет их агрегацию, а тем самым оседание. Электрический заряд коллоидов плазмы тоже меняется, и при вдыхании отрицательных АИ они становятся более стабильными. Методом электрофореза обнаружено, что АИ кислорода увеличивают отрицательный заряд коллоидов скелетных мышц, а это говорит о существовании электрообмена между кровью и тканями [55].

Экспериментально установлено, что АИ кислорода благотворно влияют на состояние нервной системы, кровяное давление, тканевое дыхание, обмен веществ, на физико-химические свойства крови, соотношение белковых фракций плазмы, кроветворение, сахар крови, электрокинетический потенциал эритроцитов, митогенетический режим

тканей, изоэлектрические точки тканевых коллоидов. Такая универсальность физиологического действия АИ кислорода объясняется тем, что они влияют на основные электрообменные и физико-химические процессы, нормализуя их интенсивность.

Ряд авторов [56] предполагают, что организм получает отрицательные АИ не только из воздуха, но и генерирует их в своих структурах. По этой гипотезе биокаталитическая «вспышка» отрицательного заряда происходит в протеогликановом слое сурфактанта лёгких при электрообмене между каталитически вырабатываемыми здесь отрицательными зарядами и положительными, которые приносятся в лёгкие кровью с углекислым газом, азотом и водой. За счёт этих эндогенных отрицательных зарядов происходит активация вдыхаемого кислорода с превращением его в соединение, подобное отрицательным АИ. По такому же типу вспышки, но уже с другими видами сурфактанта осуществляется внутренний тканевый электрообмен во всём организме, необходимый для оптимального протекания внутриклеточного метаболизма.

Видимо, клетки животных и человека можно сравнить с аккумуляторами. Как и технические аккумуляторы, они постепенно разряжаются и требуют постоянной подзарядки. Такую подзарядку они получают за счёт электронов, приносимых АИ кислорода, т.е. за счёт дыхания. Однако если воздух содержит мало отрицательных АИ, то электрический заряд клеток падает, что нарушает их метаболизм и является причиной разных заболеваний. Отрицательные АИ, будучи донаторами электронов, действуют на окружающие молекулы и поднимают их энергетические уровни. Как известно, биокатализаторы ускоряют течение биохимических реакций. Присутствие даже ничтожного количества катализаторов создаёт особое состояние реагирующих веществ, стимулируя течение обменных процессов. При благоприятных условиях одна молекула биокатализатора способна превращать до 100 тыс. молекул субстрата в секунду, а это ведёт к лавинообразному нарастанию реакций. Следовательно, для активации биохимических процессов нет нужды в ионизации всех реагирующих

молекул. Исходя из этого, А.Л. Чижевский полагает, что все окислительно-восстановительные реакции в организме связаны с электрохимическими явлениями. Однако до настоящего времени полностью механизмы влияния АИ кислорода на метаболизм не расшифрованы и требуют дальнейшего изучения.

### *Влияние ДЧ на уровень дефицита солнечного света*

Чёрный углерод является самым сильным светоабсорбирующим компонентом ДЧ. При высоких концентрациях это может приводить к дефициту солнечного света. Поскольку Россия расположена в зоне низкой инсоляции, практически все её жители входят в группу риска дефицита витамина D.

Гиповитаминоз D играет основную роль в развитии рахита у детей. Долговременный дефицит витамина D может приводить к увеличению заболеваемости раком, увеличивает вероятность развития остеопороза. В последнее время опубликованы результаты исследований, увязывающих недостаток витамина D с ослаблением иммунитета, повышенным риском развития сердечно-сосудистых заболеваний.

## **2.2. Нормирование содержания ДЧ в атмосферном воздухе**

В апреле 2010 года постановлением Главного государственного санитарного врача РФ были утверждены гигиенические нормативы для концентраций в атмосферном воздухе  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$ .

В международной практике используются различные величины ПДК ДЧ (табл. 8).

Из данной таблицы видно, что нормативы, утвержденные в РФ, существенно мягче, чем рекомендованные ВОЗ и ЕС.

Обращает на себя внимание, что в России, наперекор общемировой практике, нормируется также и содержание частиц за 20-минутный период осреднения, несмотря на то, что отбор необходимой массы мелкодисперсных частиц за такой маленький период времени при использовании основного – гравиметрического метода измерений – инструментально практически не обеспечен. Это

создаёт определённые трудности при проведении измерений и трактовке результатов и может рассматриваться только как дань отечественной системе нормирования, опирающейся, прежде всего, на критерии ПДК<sub>МР</sub>.

Таблица 8

Предельно допустимые концентрации РМ<sub>10</sub> и РМ<sub>2,5</sub> в разных странах

	Параметр	ПДК <sub>МР</sub> , мг/м <sup>3</sup>	ПДК <sub>СС</sub> , мг/м <sup>3</sup>	ПДК <sub>СГ</sub> , мг/м <sup>3</sup>
РФ	РМ <sub>10</sub>	0,3	0,060	0,040
	РМ <sub>2,5</sub>	0,16	0,035	0,025
ВОЗ	РМ <sub>10</sub>	-	0,050	0,020
	РМ <sub>2,5</sub>	-	0,025	0,010
ЕС	РМ <sub>10</sub>	-	0,050	0,040
	РМ <sub>2,5</sub>	-	-	-
США	РМ <sub>10</sub>	-	0,15	-
	РМ <sub>2,5</sub>	-	0,035	0,015

Результаты исследований, охватывавших большие группы населения, указывают на сильную зависимость между концентрациями РМ<sub>2,5</sub> и показателями смертности и не позволяют определить пороговую концентрацию, ниже которой присутствие РМ<sub>2,5</sub> в окружающей среде не оказывает воздействия на состояние здоровья, т.е. безопасный уровень. После тщательного изучения новейших научных данных рабочая группа ВОЗ пришла к выводу, что если пороговая концентрация РМ<sub>2,5</sub> существует, то она располагается в нижней части диапазона наблюдаемых в настоящее время концентраций РМ<sub>2,5</sub> в Европейском регионе [57]. В более поздних публикациях ВОЗ ещё раз отметила, что нет никаких данных, которые бы подтверждали наличие какого-либо безопасного уровня экспозиции или порога, ниже которого не наступает никаких негативных последствий для здоровья.

### **2.3. Оценка рисков заболеваемости населения при наблюдаемых уровнях ДЧ**

По данным ВОЗ, вклад факторов окружающей среды в состояние здоровья составляет 25...30%. Воздействие атмосферного воздуха

ежегодно приводит к смерти от 200 до 570 тысяч человек, и на долю этого фактора приходится около 0,4...1,1% всех случаев смерти в год.

В структуре распространённости болезней у детей, проживающих в промышленных центрах России и зарубежных стран, на первом ранговом месте находятся заболевания органов дыхания (риниты, бронхиты, пневмонии), заболевания иммунной системы, патологии нервно-психического развития, врожденные аномалии развития, рост новообразований [58].

Причины этого, несмотря на всю очевидность ситуации, не так просто обнаружить. Конечно, существуют санитарно-гигиенические нормативы, которые определяют качество окружающей среды по отношению к здоровью человека. Однако при всей стройности этого подхода к предупреждению загрязнения окружающей среды очевидны существенные просчёты [59].

Во-первых, даже теоретически невозможно разработать санитарно-гигиенические и экологические нормативы для всех химических веществ во всех средах. Анализ того, как изменяются с течением времени значения предельно допустимых концентраций, свидетельствует об их относительности, вернее – об относительности наших знаний о безопасности или опасности тех или иных веществ.

Кроме того, многие факторы, такие как состояние здоровья, возраст, ёмкость лёгких и время, проведённое в загрязнённой среде, могут повлиять на эффект, производимый загрязняющими веществами на здоровье. Возможность учёта этих параметров, столь сложна, что большинство методик сводится к сравнению загрязнения с пороговой величиной, которая предполагает здоровый организм, на практике встречающийся не часто.

Не меньше проблем возникает с пространственной точностью измерений. Сеть стационарных постов контроля должна иметь возможность оценить динамику загрязнения воздуха с изменением расстояния от источника выброса и, как следствие, изменение ожидаемого эффекта от воздействия. Так, специалисты западногерманского кардиологического центра университетской клиники

в Эссене проверили сосуды у 4814 мужчин и женщин старше 50 лет. У 88% они диагностировали различные степени атеросклероза. При сопоставлении адреса проживания с картой города было обнаружено, что сокращение расстояния от дома до оживленной автострады на каждые 100 метров на 10% увеличивало риск развития атеросклероза.

Во-вторых, даже при решении первой задачи остаётся нерешённым вопрос о комбинированном<sup>1</sup>, комплексном<sup>2</sup> и сочетанном<sup>3</sup> воздействии.

Население мегаполиса подвергается, как правило, одновременному воздействию широкого спектра токсических веществ в различных агрегатных состояниях. Перечислить все смеси токсичных веществ, встречающихся в воздухе, практически невозможно. Еще сложнее установить все химические вещества, одновременно находящиеся в окружающей среде. Для преодоления этих проблем рекомендуется при гигиеническом нормировании сложных паро-газо-аэрозольных смесей основываться на трех принципах.

1. Выбор ведущего компонента паро-газо-аэрозольной смеси.
2. Суммация эффектов, вызываемых компонентами смеси, обладающими однонаправленным действием. При действии комбинаций веществ, обладающих разнонаправленным действием, например наркотиков и раздражающих газов, оценку степени их опасности возможно проводить по предельно допустимой концентрации наиболее токсичного компонента.
3. Максимально возможный анализ всех компонентов смеси.

Однако даже в этом случае результат не будет соответствовать реальности. Причиной этого является широкий спектр нерешённых проблем при оценке риска от воздействия токсичного компонента среды. Данный факт становится более очевидным на примере выявления мутагенной активности химических веществ. Генотоксичные компоненты

---

<sup>1</sup> Одновременное или последовательное действие нескольких веществ при одном и том же пути поступления.

<sup>2</sup> Поступление вредных веществ в организм различными путями и с различными средами – с воздухом, водой, пищей, через кожные покровы и т.д.

<sup>3</sup> Сочетание всего многообразия физических, химических и биологических факторов окружающей среды на здоровье человека и состояние экосистемы.



городской среды являются одной из основных причин заболеваемости населения, включая воздействие на репродуктивную систему, тератогенный и канцерогенный эффекты.

Существует представление, согласно которому проникновение в организм даже единственной молекулы генотоксиканта (в отличие от токсикантов с иным механизмом токсического действия) может привести к пагубным последствиям. Дело в том, что химическое повреждение единичной молекулы ДНК в единичной клетке макроорганизма при стечении обстоятельств может стать причиной образования целого клона клеток с изменённым геномом. Вероятность такого события мала, но возможна. Такой характер действия веществ на биосистемы называется беспороговым.

Вредное генетическое действие химических веществ трудноуловимо – попытки оценить генетическую опасность химических веществ, находящихся в объектах среды обитания, наталкиваются на очень серьёзные трудности.

1. Химические мутагены проходят через метаболическую систему организма и самыми непредсказуемыми путями превращаются в другие соединения. При этом они могут потерять свою мутагенную активность, а могут приобрести такие мутагенные свойства, которые отсутствовали у исходного соединения. Не меньшую опасность представляют не мутагенные химические вещества, которые, включившись в метаболизм, превращаются в мутагены [60].

2. Другие трудности оценки риска связаны с поглощением, распределением по разным системам и органам и выделением или, если выделение невозможно, накоплением этих веществ. Ксенобиотики могут проявлять узкую специфичность в отношении организмов и даже клеток одного и того же организма. Химические агенты, которые проявляют мутагенные свойства при использовании тест-объекта в эксперименте, не обязательно окажутся мутагенными для человека. И наоборот, вещества, не вызывающие мутации в контрольных опытах, могут вызывать их после метаболических превращений [61].

3. Необходимо учитывать комбинированное действие мутагенов (это не просто суммарный эффект в их действии). Иногда при комбинированном действии наблюдается изменение спектра мутаций, причём каждый мутаген в отдельности не обладает способностью к индукции мутаций определенного типа [62].

4. Зависимость доза–эффект далеко не всегда просматривается точно. Благодаря функционированию репаративных<sup>1</sup> систем клетки к возникновению мутаций приводит лишь небольшая часть повреждений ДНК. Поэтому частота реакций между повреждающим агентом и ДНК не связана простой зависимостью с их мутагенной активностью. Как видно, большинство первичных изменений в ДНК, вызываемых мутагенами, сами по себе ещё не мутации, т.е. не являются изменениями в последовательности нуклеотидов. Эта последовательность может быть изменена только после прохождения поврежденной молекулы через этап репликации<sup>2</sup>. Вставка нуклеотида, закрепляющаяся в обеих нитях молекулы после ещё одной репликации, – это уже мутация, обозначаемая как «сдвиг рамки считывания» (анг. *frame shift*). Сшивки в молекуле ДНК обычно летальны, так как не позволяют осуществлять нормальную репликацию из-за невозможности расплетения нитей в месте сшивки [63].

5. Некоторые химические вещества способны вызывать мутации лишь тех клеток, которые находятся в определенной фазе цикла, это так называемые циклоспецифичные вещества. Другие действуют на генетический аппарат независимо от того, в каком периоде клеточного цикла находится клетка (циклонеспецифичные). Такая особенность определяется механизмом токсического действия веществ. К числу циклонеспецифичных принадлежат мутагены, способные вызывать химическое повреждение ДНК. Все остальные мутагены являются циклоспецифичными.

---

<sup>1</sup> Репарация – особая функция клеток, заключающаяся в способности исправлять химические повреждения и разрывы в молекулах ДНК.

<sup>2</sup> Репликация – процесс синтеза дочерней молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты на матрице родительской молекулы ДНК.

Таким образом, вероятность того, что конкретное химическое вещество вызовет генетическое нарушение или врожденные пороки развития, в конечном счёте зависит от большого количества переменных, включая уровень воздействия химического вещества на организм, распределение и удержание химического вещества по мере попадания в организм, эффективность систем метаболической активации и детоксикации в тканях-мишенях, а также способности химического вещества или его метаболитов создавать критические макромолекулы внутри клетки.

### ***Контрольные вопросы***

1. Перечислите виды прямого воздействия ДЧ на организм человека.
2. В чём заключается фиброгенное действие ДЧ на организм человека?
3. В чём заключается токсическое действие ДЧ на организм человека?
4. В чём заключается мутагенное, в том числе эмбриотоксическое и тератогенное действие дисперсных частиц на организм человека?
5. В чём заключается гонадотропное действие ДЧ на организм человека?
6. В чём заключается аллергическое, в том числе фотосенсибилизирующее действие ДЧ на организм человека?
7. В чём заключается канцерогенное действие ДЧ на организм человека?
8. В чём заключается радиоактивное действие ДЧ на организм человека?
9. Опишите механизм проникновения ДЧ в организм человека.
10. Охарактеризуйте вдыхаемую фракцию, торакальную фракцию, респирабельную фракцию, трахеобронхиальную фракцию дисперсных частиц.
11. Опишите влияние ДЧ на сердечно-сосудистые и респираторные заболевания человека.
12. Опишите влияние ДЧ на болезни системы кровообращения человека.

13. Опишите влияние ДЧ на болезни органов дыхания человека.
14. Опишите влияние ДЧ на микроэлементозы человека.
15. Опишите влияние ДЧ на цитогенетические и иммунотоксические заболевания человека.
16. Опишите влияние ДЧ на канцерогенные заболевания человека.
17. Перечислите и опишите виды косвенного воздействия ДЧ на организм человека.
18. Приведите значения норм содержания ДЧ в атмосферном воздухе, принятые в РФ и ВОЗ. Какие нормы более жёсткие и почему?
19. Каков, по данным ВОЗ, вклад загрязнения воздуха в уровень смертности населения?
20. Перечислите проблемы, возникающие при попытке оценки риска заболеваемости населения при наблюдаемых уровнях ДЧ.

### **3. МЕТОДЫ ОТБОРА ПРОБ И ИЗМЕРЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ОГ И АТМОСФЕРЕ**

#### ***3.1. Общие принципы***

Измерение концентраций и гранулометрического состава ДЧ необходимо во многих случаях – для экологического мониторинга атмосферного воздуха, для производственного контроля на многих технологических процессах, для контроля внутренней среды так называемых «чистых помещений», чистота которых характеризуется непревышением заданного счётного количества ДЧ в определённом объёме воздуха и т.п. Для каждой из этих областей деятельности, нуждающихся в определении концентрации ДЧ, существуют свои требования, предпочтения и соответствующие технические трудности.

#### ***3.2. Методы гранулометрического анализа ДЧ***

Гранулометрический анализ ДЧ проводится с целью получения информации о распределении по размерам частиц в дисперсных системах.

Методы гранулометрического анализа ДЧ весьма разнообразны: сухой и мокрый рассев на аналитических ситах, седиментация, микроскопия, лазерная дифракция и другие. Ставя задачу проведения гранулометрического анализа и выбирая метод, следует, прежде всего, уточнить, о каком размере частиц идёт речь? Действительно, только для сферической частицы размер можно задать одним числом, равным диаметру сферы. Подавляющее большинство реальных частиц в большей или меньшей степени отличаются от сферы. Поэтому для описания размерных характеристик несферической частицы требуется больше параметров. В то же время при решении значительной части практических задач удобно использовать усреднённые параметры, позволяющие судить о «крупности» частиц. В большинстве случаев таким параметром может быть «диаметр эквивалентной сферы». Это диаметр сферы, которая имеет такой же объём (площадь поверхности или вес), что и реальная частица.

При использовании метода лазерной дифракции результатом измерения будет значение диаметра эквивалентной сферы. Однако, используя для анализа такие методы как седиментация, микроскопия, ситовой отсев, определить диаметр эквивалентной сферы не удастся. Так, если для определения размеров частиц использовать ситовой метод (в соответствии с которым о размере частиц судят по тому, проходит или не проходит частица через ячейку сита), то сферические частицы диаметром  $d$  и цилиндрические частицы диаметром  $d$  и длиной  $L$  одинаково хорошо пройдут через ячейку сита размером  $d$ , но диаметры эквивалентных сфер будут существенно отличаться. Например, цилиндр диаметром 20 мкм и длиной 100 мкм соответствует эквивалентной сфере диаметром 39 мкм, т.е. практически в два раза больше, чем для сферы диаметром 20 мкм. При использовании метода седиментации эквивалентным размером частицы окажется диаметр сферы, эквивалентной по скорости осаждения. При проведении микроскопических исследований мы будем наблюдать проекцию реальной частицы на плоскость, перпендикулярную оптической оси микроскопа. Таким образом, выбирая метод анализа, следует выяснить, какие размерные характеристики даёт метод.

Размерный диапазон частиц, который требуется определить при гранулометрии, зависит от поставленных в исследовании задач. Например, для проведения санитарно-эпидемиологических исследований влияния микрочастиц на здоровье населения такие диапазоны установлены ГОСТ Р ИСО 7708-2006 «Качество воздуха. Определение гранулометрического состава частиц при санитарно-гигиеническом контроле».

Для целей оценки и контроля «чистых» технологических помещений существуют другие требования к гранулометрическим измерениям. Межгосударственный стандарт ГОСТ ИСО 14644-1-2002 «Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1: Классификация чистоты воздуха» устанавливает классы чистоты по взвешенным в воздухе частицам для чистых помещений и чистых зон в зависимости от их счётных концентраций и размеров.

Требования этого ГОСТа во многом определяют характеристики и диапазон измерений выпускаемых для контроля чистых помещений приборов: счётная концентрация частиц – до  $3,5 \cdot 10^7/\text{м}^3$ , размеры частиц – 0,1...5 мкм.

Для целей мониторинга атмосферного воздуха населённых мест на предмет выполнения гигиенических нормативов по  $\text{PM}_{10}$  и  $\text{PM}_{2,5}$  достаточно информации о распределении по этим фракциям и об общем содержании взвешенных веществ в воздухе.

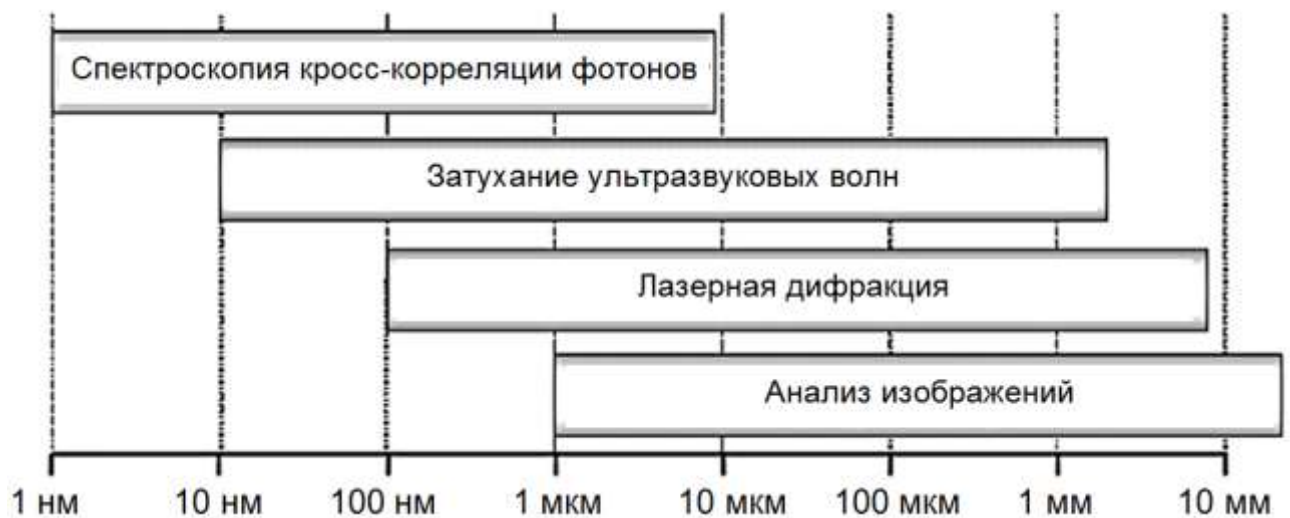
Безусловно, что для научных исследований загрязнения атмосферного воздуха интерес представляет значительно более широкий диапазон параметров, нежели указанный выше.

Важно понимать, что каждый метод определения размера частиц основан на измерении различных характеристик частицы (максимальная длина, минимальная длина, объём, площадь поверхности и т.д.). Конечные результаты будут разными, в зависимости от применяемых методов, в каждом из которых используется измерение разных физических характеристик частицы. Практически, можно сравнивать только результаты тех измерений, в которых один и тот же материал анализировался одним и тем же методом. Это также означает, что не может существовать стандартов и эталонов размеров для таких частиц, как зёрна песка. Эталонном сравнения между разными методами анализа размеров частиц может служить только сфера.

При использовании электронной микроскопии для получения среднего значения сумма размеров частиц делится на их количество. Очевидно, что используя этот метод, мы получим среднее арифметическое значение диаметра ДЧ. Имея систему обработки нескольких изображений, мы имеем возможность измерить площадь каждой частицы и затем рассчитать средний эквивалентный диаметр ДЧ по площади поверхности. Если использовать прибор, работа которого основана на принципе многодетекторной электрометрии или лазерной дифракции, то мы сможем измерить объём каждой частицы и рассчитать средний эквивалентный диаметр ДЧ по объёму или, если известна плотность ДЧ, по массе.

Итак, каждый метод анализа размеров частиц позволяет получать разные числовые значения средних диаметров ДЧ, в зависимости от того, какая характеризующая частицу величина является предметом измерения.

Следует также иметь в виду, что какой-либо один метод гранулометрического анализа не покрывает весь представляющий интерес диапазон размеров ДЧ (рис. 27). Обычно современные приборы, основанные на аэродинамических принципах измерения ДЧ, позволяют работать с диапазоном частиц от 0,7 до 100 мкм, приборы, использующие оптические принципы – с диапазоном от 0,3 до 10 мкм, а приборы, основанные на принципах электрической подвижности, – с диапазоном от 0,005 до 0,5 мкм. Пока, однако, не существует стандартизованных методов «стыковки» измерений, проведённых с использованием разных приборов, поэтому интерпретация подобных исследований может представлять трудности.



*Рис. 27. Методы гранулометрического анализа, используемые фирмой Simpatec GmbH. Спектроскопия кросс-корреляции фотонов: 1 нм – 10 мкм; затухание ультразвуковых волн: 0,01 – 3 000 мкм; лазерная дифракция: 0,1 – 8 750 мкм; анализ изображений: 1 – 30 000 мкм. Первые два метода подходят только для анализа суспензий, последние два пригодны и для анализа аэрозолей*

Программное обеспечение для всех приборов фирмы Microtrac работающее в среде Windows, позволяет вычислять многие производные диаметров, но использование этих результатов должно



сопровождаться чётким пониманием формирования возможных погрешностей. Так, при попытке преобразования среднего количественного значения, полученного с помощью электронного микроскопа с погрешностью  $\pm 3\%$ , в среднее значение по массе используется кубическая функция, что означает увеличение относительной погрешности до  $\pm 27\%$ . Однако при анализе количественного или массового распределения методом лазерной дифракции, с относительной ошибкой не хуже  $\pm 0,5\%$ , преобразование этого среднего объёмного значения в среднее количественное значение приведёт к формированию относительной ошибки менее  $\pm 1\%$ .

### **3.2.1. Методы гранулометрического анализа ДЧ в потоке газа**

При определении гранулометрического состава мелкодисперсных ДЧ последнее время преобладают методы, которые позволяют определять не только распределение ДЧ по размерам, но и другие их характеристики – плотность, массу. Поэтому, как правило, развитие приборной техники направлено на создание комбинированных приборов, решающих сразу несколько задач, причём гранулометрическое распределение частиц по фракциям производится уже на стадии отбора проб в специализированных пробоотборных устройствах.

К основным методам, в которых разделение на размерные фракции происходит непосредственно в пробоотборном устройстве за счет осаждения частиц на отдельных каскадах, относятся диффузионные батареи, импакторы, пакеты фильтров.

#### *Метод с использованием диффузионных батарей*

Принцип действия диффузионных батарей основан на экспериментальном определении коэффициента диффузии ДЧ и восстановлении распределения частиц по размерам из известной теоретической (априорной) зависимости коэффициента диффузии частиц от их размера (рис. 28).

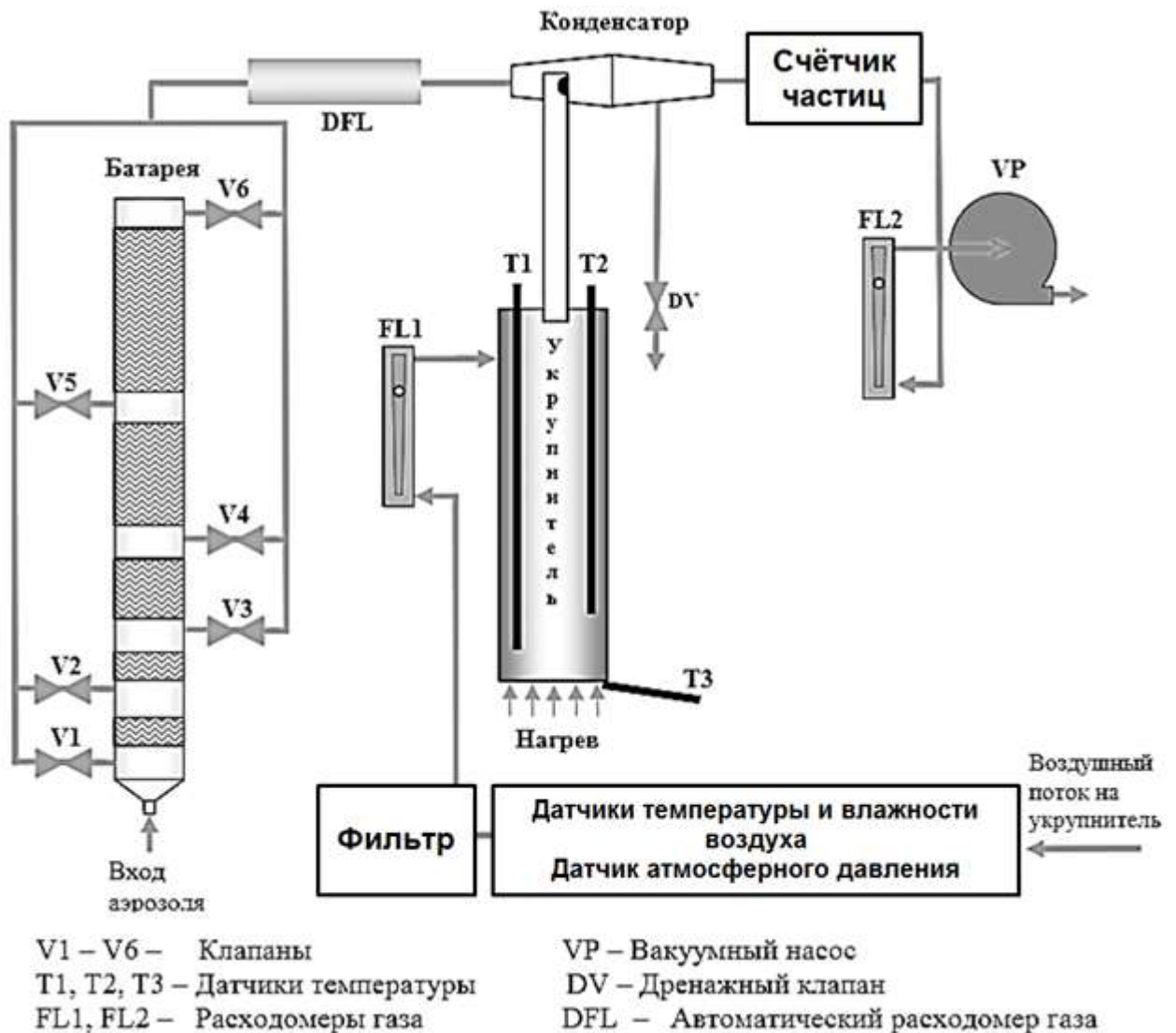


Рис. 28. Блок-схема диффузионного аэрозольного спектрометра [64]

Коэффициент диффузии микрочастиц определяется путём измерения коэффициента осаждения (или проскока) ДЧ при прохождении через пористую среду, в качестве которой используется пакет сеток, установленный перпендикулярно потоку газа с частицами. Имеется развитая математическая модель диффузионного осаждения микрочастиц в таких процессах, что позволяет восстанавливать их распределение по размерам.

Для регистрации и счёта частиц, прошедших данную секцию диффузионной батареи, они направляются в конденсационную камеру, где укрупняются (коагулируют) до оптически регистрируемого размера и далее поступают в оптический счётчик. В ходе цикла накопления

первичных данных происходит регистрация концентраций ДЧ, взятых последовательно с каждой секции диффузионной батареи. Далее проводится компьютерная обработка набора коэффициентов проскока и в результате определяется распределение частиц по размерам.

Основы метода изложены в ГОСТ Р 8.755-2011 ГСИ «Дисперсный состав газовых сред. Определение размеров наночастиц методом диффузионной спектрометрии».

В случаях, когда размер аэрозольных частиц превышают 100 нм, а скорости потоков составляют величины порядка 1 м/с, использование диффузионных батарей для анализа дисперсного состава невозможно.

#### *Метод с использованием импакторов*

Импакторы представляют собой селективные пробоотборные устройства, в которых разделение частиц на размерные фракции в диапазоне от долей до десятков мкм происходит за счёт инерционного осаждения на препятствиях (коллекторах) при скоростях потоков до нескольких десятков м/с.

Импакторы состоят из каскадов, каждый из которых содержит пластины с отверстиями и коллекторы для осаждения аэрозольных частиц (рис. 29). Пластины имеют отверстия – сопла, пропускающие воздух и придающие ему ускорение. Верхние пластины импактора имеют небольшое количество «крупных» отверстий, нижние, наоборот, много «мелких» отверстий. При движении аэрозоля более тяжелые частицы осаждаются на коллекторах, в то время как более лёгкие увлекаются воздушным потоком на следующую ступень каскада.

После отбора проб определяется распределение ДЧ по массе в зависимости от размеров. При необходимости могут быть проведены химические исследования отобранных на пластинах ДЧ.

Осаждение частиц с размерами менее 1 мкм требует значительного увеличения гидродинамического сопротивления этих устройств, что существенно затрудняет их использование. При этом снижается эффективность осаждения аэрозольных частиц и искажаются гидродинамические параметры несущей среды, что приводит к ошибкам

в определении дисперсного состава, особенно в диапазоне от 0,1 мкм до 1 мкм.

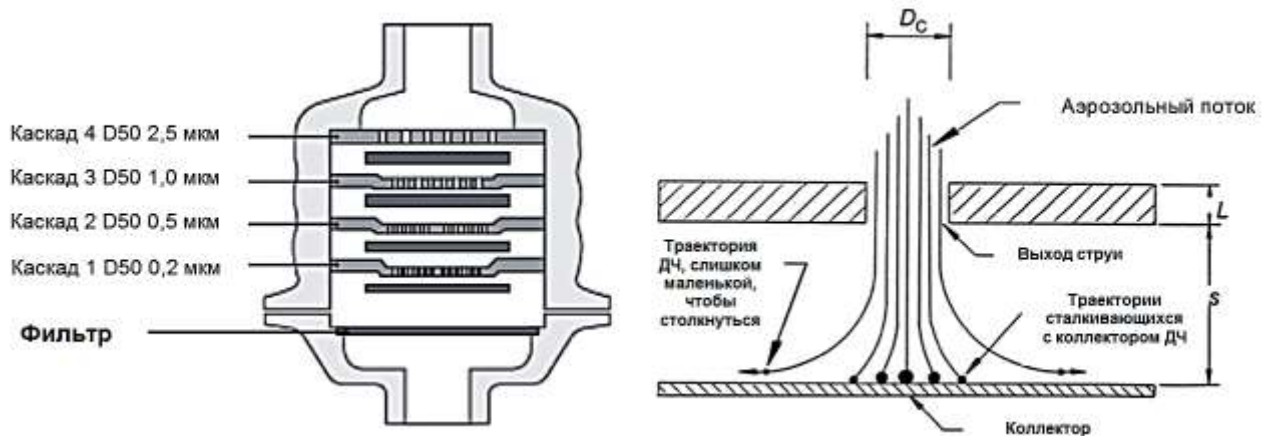


Рис. 29. Принцип работы каскадного импактора

В современных приборах, с целью автоматизации и ускорения исследований, частицы стараются не осаждают на пластинах или фильтрах, что влечёт затем трудоёмкие исследования, а перенаправляют на измерительные устройства, позволяющие за счёт тех или иных физических методов быстро определять массовые или счётные характеристики ДЧ разных фракций.

#### *Метод с использованием виртуальных импакторов*

В ряде приборов для гранулометрического анализа состава ДЧ используются виртуальные импакторы. Виртуальный импактор разделяет входящий поток загрязнённого ДЧ воздуха, всасываемого вакуум-насосом с определённой скоростью, на два разных потока. Разделение потоков происходит в области двух расположенных друг против друга форсунок (рис. 30). Главный поток проходит между обеих форсунок перпендикулярно входному потоку. Частицы большей массы, неспособные в силу своей инерционности следовать главным потоком, продолжают двигаться дальше и попадают в отведённый поток, обогащенный «грубыми» ДЧ. При этом главный поток содержит в основном частицы мелкой фракции (например,  $PM_{2,5}$ ), а отведённый поток – частицы «грубой» фракции (например,  $PM_{10}$ ). Входящий в состав прибора переключающий клапан (прямоточный пережимной клапан)

переключает эти потоки на входе фотометра таким образом, что в измерительную камеру поступают либо мелкие ДЧ из главного потока (нормальный режим), либо «грубые» ДЧ из отведённого потока (режим обогащенного аэрозоля). Для установки нуля на фотометр переключателем потока периодически подается фильтрованный воздух.

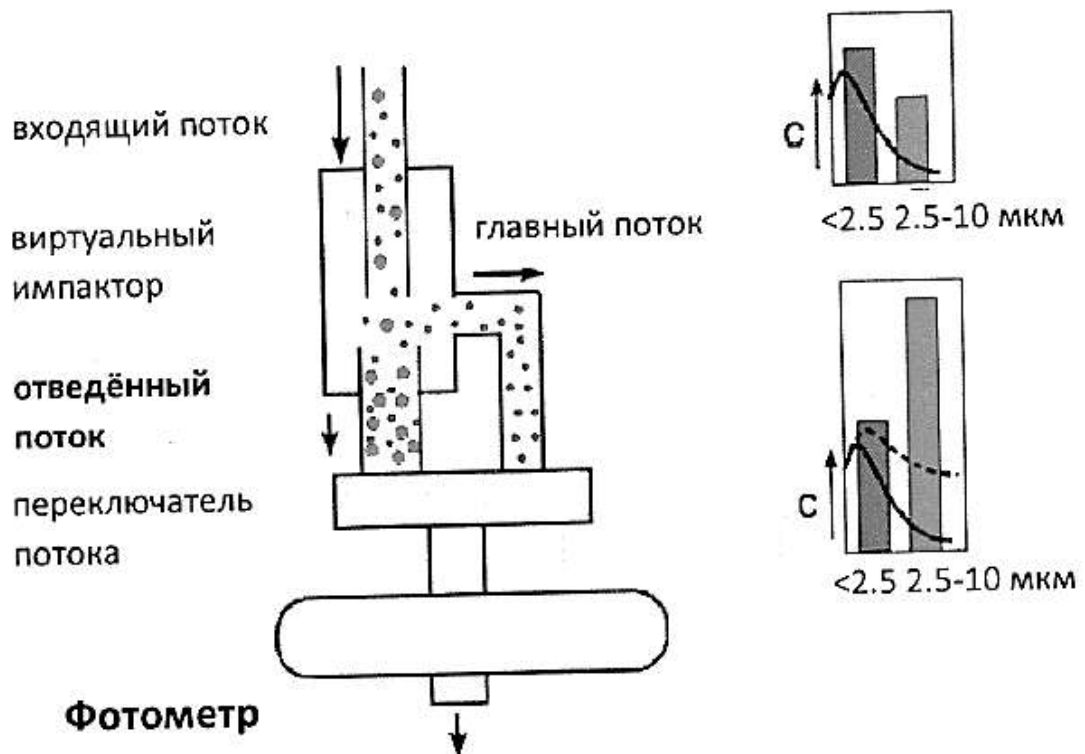


Рис. 30. Принцип действия виртуального импактора

### Метод лазерной дифракции

Одним из распространённых методов определения счётных концентраций ДЧ с распределением по размерам частиц является лазерная дифракция (анг. *Low Angle Laser Light Scattering – LALLS*).

ДЧ всасываются через штуцер отбора пробы в измерительную камеру через фокусирующее сопло, которое ориентировано так, чтобы воздушный поток проходил через лазерный луч, просвечивающий измерительную камеру. Частица, попавшая в лазерный луч, рассеивает свет. Рассеянное частицами излучение регистрируется под разными углами с помощью многоэлементного детектора – фотодиодной матрицы.

Определение распределения ДЧ по размерам методом лазерной дифракции основано на измерении углового распределения интенсивности рассеянного света при прохождении лазерного луча через диспергированный образец. Крупные частицы преимущественно рассеивают свет под малыми углами к лазерному пучку, тогда как мелкие частицы – под большими углами.

С использованием теории светорассеяния определяют размеры частиц, формирующей индикатрису рассеяния, совпадающую с измеренными данными об угловой зависимости интенсивности рассеянного света. Размер частиц выражается в виде диаметра сферы эквивалентного объёма.

Значения счётной концентрации могут пересчитываться в массовую концентрацию с учётом известной плотности анализируемых ДЧ. Следует отметить, что при мониторинге атмосферного воздуха плотность частиц – величина не всегда известная и такой пересчёт становится некорректным.

Одним из преимуществ данного метода является возможность не только контроля необходимой дисперсности материала, но и наблюдение в режиме реального времени за процессами агломерации и деагломерации ДЧ.

### *Многодетекторная электрометрия*

Прибор, реализующий данный метод, обеспечивает непрерывную подачу пробы из газового потока на вход измерительной камеры (рис. 31). С помощью коронного разряда частицы получают заданный уровень положительного заряда. Затем заряженные частицы поступают в зону измерения с центральным стержнем высоковольтного электрода, и перемещаются вниз вдоль стржня, обдуваемого инструментальным воздухом, очищенным с помощью НЕРА-фильтра. К электроду приложено положительное напряжение, создающее электрическое поле, отталкивающее положительно заряженные частицы наружу в соответствии с их электрической подвижностью.

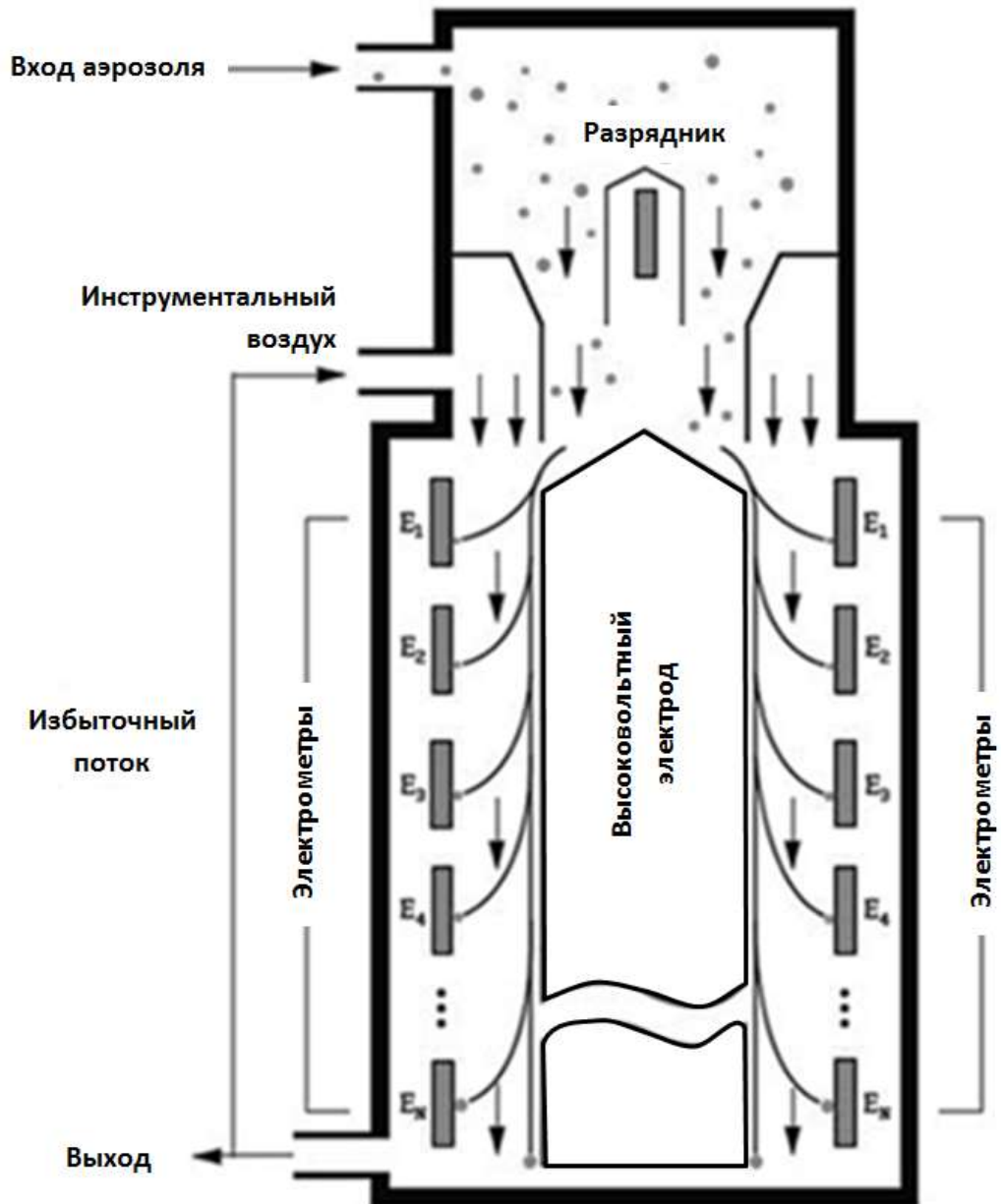


Рис. 31. Принцип работы прибора модели 3090 компании TSI Incorporated (США), реализующего метод многодетекторной электрометрии

Заряженные частицы достигают соответствующих электрометров и передают им свой заряд. Частицы с более высокой электрической подвижностью достигают электрометр, находящийся в верхней части, в то время как частицы с более низкой подвижностью ударяются о соответствующий электрометр, расположенный ниже. Такое многодетекторное измерение с использованием высокочувствительных электрометров позволяет одновременно измерять концентрацию частиц различных размеров и распределение их по различным фракциям.

### *Метод анализа изображений*

Для характеристики реальных ДЧ в настоящее время форма частиц имеет такое же большое значение, как и размер частиц. Метод анализа изображений даёт возможность получать такие данные.

Для анализа размера и формы частиц надо учитывать следующие важные условия:

- анализ изображений имеет дело со статистическими значениями. Так для обеспечения максимальной погрешности не более 1% требуется изображение не менее 1 млн частиц;
- частицы должны быть разделены друг от друга. В противном случае в программном обеспечении требуется реализация времязатратных алгоритмов для «виртуального» разделения частиц;
- время измерения должно иметь разумные пределы: 1 млн частиц по 10 частиц на каждом изображении потребует обработки 100000 кадров. Со скоростью обработки 25 кадров в секунду этот результат будет обрабатываться 4000 секунд, т.е. более одного часа;
- так как границы частиц должны быть точно обнаружены, все частицы обязаны быть сфотографированы с максимально возможным контрастом.

*Статический анализ изображений.* Данный вид анализа изображений характеризуется неподвижными частицами, например, на подложке микроскопа (рис. 32).

Преимущества данного метода заключаются в том, что глубина резкости обеспечивает высокое разрешение полученных снимков для маленьких частиц, а также в том, что метод широко распространён и стандартизирован в ISO 13322-1. Небольшое количество полученных данных, строгая ориентация частиц, необходимость разделения слипшихся частиц с помощью времязатратных алгоритмов программного обеспечения, а также крошечный объём анализируемого материала образуют огромную проблему, приводящую к очень низкой статистической значимости результатов.



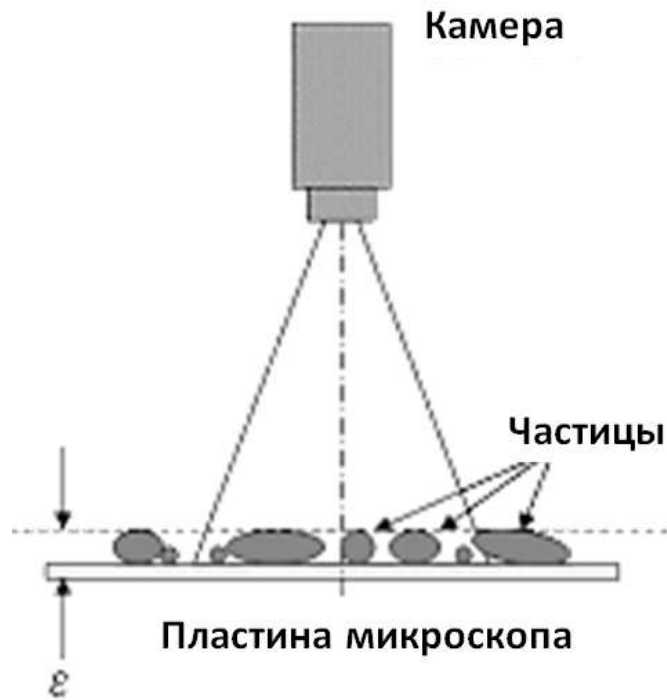


Рис. 32. Расположение ДЧ на подложке микроскопа при статическом анализе изображений, формируемых фотокамерой ( $\varepsilon$  – глубина резкости фотокамеры)

**Динамический анализ изображений.** Этот вид анализа изображений производится в потоке движущихся частиц (рис. 33).

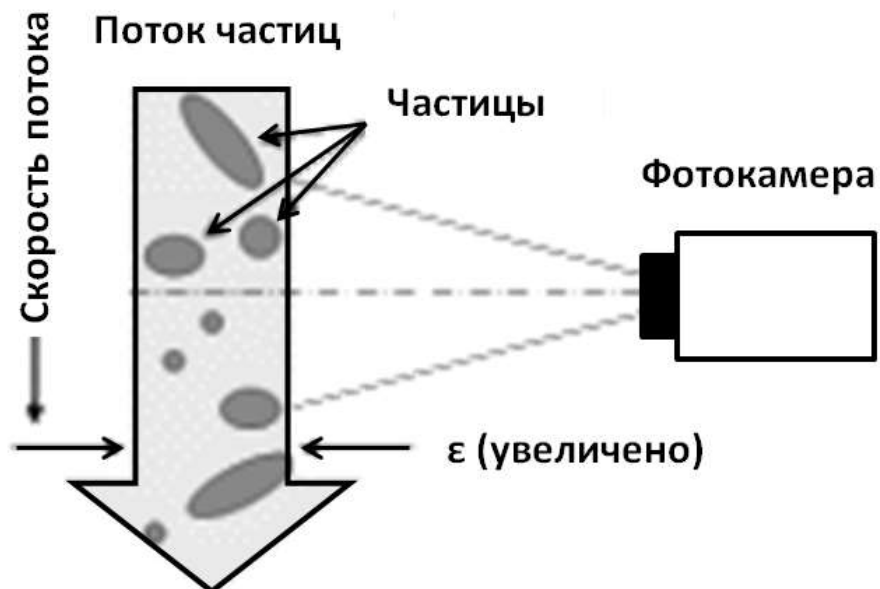


Рис. 33. Расположение ДЧ в потоке пробы, движущейся со скоростью  $V$  мимо фотокамеры, при динамическом анализе изображений ( $\varepsilon$  – глубина резкости фотокамеры)

Это увеличивает размер выборки. Частицы свободно ориентированы, и число слипшихся частиц снижено. Поэтому ряд компаний предлагают системы, которые работают либо в отражении, либо в пропускании, с матричными или линейно-сканирующими камерами.

### **3.2.2. Методы гранулометрического анализа ДЧ на фильтрах**

#### *Метод с использованием многослойных фильтров*

Метод, основанный на инерционном осаждении ДЧ на волокнах фильтра при скоростях фильтрации от долей до нескольких м/с, известный как метод многослойных фильтров (ММФ), позволяет определить дисперсность аэрозолей в диапазоне размеров от 100 нм до нескольких мкм.

Для гранулометрического анализа может быть использован пакет фильтров, который состоит из волокнистых материалов с разным гидродинамическим сопротивлением. Каждый из фильтров можно рассматривать как каскад, на котором осаждаются ДЧ определенного размерного диапазона. Частицы диаметром более 2 мкм осаждаются преимущественно на первом каскаде пакета, что приводит к большой неопределённости при оценке дисперсного состава методом многослойных фильтров для грубодисперсных аэрозолей (размер частиц более 1 мкм). Для снижения уровня неопределенности необходимо более равномерное распределение частиц по всем каскадам. Суммарное гидродинамическое сопротивление пакета фильтров в условиях высокоскоростной фильтрации существенно ниже, чем у каскадов импактора, используемых для анализа дисперсности частиц в диапазоне от долей до 1 мкм.

Таким образом, целесообразно соединить в одно устройство для определения дисперсного состава ДЧ каскады импактора и пакет фильтров. При этом будет достигнута оптимальная эффективность осаждения частиц в диапазоне от 100 нм до десятков мкм при уменьшении суммарного гидродинамического сопротивления. В таком устройстве каскады импактора будут играть роль преосадителей.

### **3.3. Методы измерения массовых концентраций ДЧ**

Отбор проб, сепарация по размерным фракциям и определение концентраций ДЧ представляют собой весьма сложные технические задачи, на решение которых влияет множество факторов – электризация частиц, седиментация, неустойчивость во времени фракционного состава, адгезия и многие другие.

Для контроля концентрации ДЧ применяются технические средства, работа которых основана на различных методах:

- гравиметрическом,
- гравиметрическом пьезобалансового взвешивания,
- фотометрическом (абсорбционном),
- нефелометрическом,
- радиоизотопном.

В настоящее время отечественными и зарубежными фирмами выпускается широкий круг приборов, работающих на основе тех или иных методов.

#### **3.3.1. Гравиметрический метод**

Гравиметрический метод измерения концентрации пыли или её мелкодисперсных фракций заключается в выделении частиц из пылегазового потока с последующим осаждением их на аналитическом фильтре и осушении. По величине привеса на фильтре с учётом объёма пробы определяется массовая концентрация ДЧ.

Недостатком метода является его трудоёмкость и длительность анализа. Метод не может быть использован для непрерывных измерений с передачей данных on-line и требует ежедневной ручной замены фильтров.

Преимуществом гравиметрического метода является возможность прямого определения массовой концентрации пыли и отсутствие влияния её физико-химических свойств на результат измерения. Европейскими нормативными документами (Европейские нормы EN 12341) гравиметрический метод признан эталонным и служит для калибровки приборов и определения поправочных коэффициентов при

использовании иных методов и инструментов измерения концентраций мелкодисперсных частиц.

На практике для целей мониторинга воздуха населенных мест используют приборы с фильтрами, которые взвешиваются и заменяются автоматически, что позволяет исключить трудоёмкую и рутинную работу по частой смене фильтров и их взвешиванию. Кстати, такие приборы рекомендуются «Рамочным планом организации мониторинга взвешенных веществ в атмосфере в странах Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии» [66]. Приборы, автоматизирующие измерения на фильтрах могут быть и портативными и достаточно громоздкими. Всё зависит от количества фильтров и уровня автоматизации и обеспечения необходимых условий по температуре и влажности в зоне обработки фильтров.

Отечественные подходы к нормированию привносят дополнительные сложности. Так, российские гигиенические нормативы ГН 2.1.6.2604-10 предусматривают для мелкодисперсных частиц  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  не только  $ПДК_{СС}$ , но и  $ПДК_{МР}$ . Последние должны сопоставляться с концентрациями, которые определяются за 20...30-минутный период отбора пробы воздуха, что приводит к необходимости за этот короткий промежуток времени прокачивать весьма большие объёмы воздуха, чтобы получить достаточные для точного определения массы ДЧ. Так, например, при загрязнении воздуха частицами  $PM_{2,5}$  на уровне  $0,1ПДК_{МР}$  ( $0,016 \text{ мг/м}^3$ ) для накопления 1 мг частиц на фильтре необходимо прокачивать воздух со скоростью более  $120 \text{ м}^3/\text{час}$ , что предъявляет чрезвычайно жёсткие требования к воздухозаборным устройствам.

### **3.3.2. Гравиметрический метод пьезобалансового взвешивания**

Гравиметрический метод пьезобалансового взвешивания (англ. *Tapered Element Oscillating Microbalance – TEOM*) заключается в периодическом отборе пробы микродисперсных частиц через импактор, который отделяет необходимые для исследования фракции, в последующем их заряде на коронирующем электроде и затем осаждении на поверхности электрода. В качестве такого электрода

используется пьезоэлемент. Кварцевый пьезоэлемент включен в цепь генератора электрических колебаний. При осаждении пыли на его поверхности изменяется вес пьезоэлемента и, как следствие, частота его колебаний. Изменение частоты линейно зависит от массы осажденных на элемент ДЧ и является измеряемой величиной, пропорциональной весовой концентрации ДЧ.

Недостатком метода является его невысокая точность, обусловленная систематической погрешностью в связи с нагревом пробы, в результате чего проба претерпевает изменение состава. Необходимо корректировать систематические погрешности с помощью эталонного гравитационного метода.

К преимуществам метода следует отнести простоту применения, возможность вести непрерывные измерения.

### **3.3.3. Фотометрический (абсорбционный) метод**

Фотометрический (абсорбционный) метод основан на измерении ослабления интенсивности светового потока, вызванного его поглощением частичками пыли.

Недостатками фотометрического (абсорбционного) метода являются его низкая чувствительность при измерении малых концентраций аэрозольных частиц (менее 30 мг/м<sup>3</sup>), а также невозможность контроля высоких концентраций (более 10...12 г/м<sup>3</sup>) вследствие практически полного поглощения светового излучения. Для целей мониторинга атмосферного воздуха населённых мест метод не подходит.

### **3.3.4. Нефелометрический метод**

Нефелометрический метод основан на регистрации рассеянного излучения с различной геометрией расположения оптической пары «источник – приёмник». Анализаторы пыли, в которых реализован принцип лазерной нефелометрии, дают возможность проведения измерений в широком динамическом диапазоне концентраций.

Типичный анализатор, в котором реализован нефелометрический метод, работает следующим образом. Анализируемая проба поступает в прибор через входной патрубок, на который устанавливаются сменные импакторы, определяющие диапазон размеров частиц, попадающих в прибор. В оптической ячейке проба облучается светом, генерируемым лазерным источником. Рассеянный свет собирается линзами, расположенными под углом  $90^\circ$  к потоку пробы и направлению излучения, и попадает на фотодетектор (рис. 34). Световой сигнал преобразуется в электрический, пропорциональный размеру и концентрации взвешенных частиц. Микропроцессор обрабатывает сигналы фотодетектора и рассчитывает содержание ДЧ в воздухе.

К недостаткам нефелометрического метода при контроле весовой концентрации ДЧ относят резкую потерю чувствительности при измерении концентрации ДЧ с широким дисперсным составом и наличии частиц диаметром более 8...10 мкм. Поэтому приборы, основанные на методе лазерной нефелометрии, применяются в основном для контроля мелкодисперсных аэрозольных частиц. Для них чувствительность метода существенно повышается. Наличие ДЧ, обладающих повышенными адгезионными свойствами и осаждающихся на измерительных оптических элементах приборов, также осложняет использование этого метода.

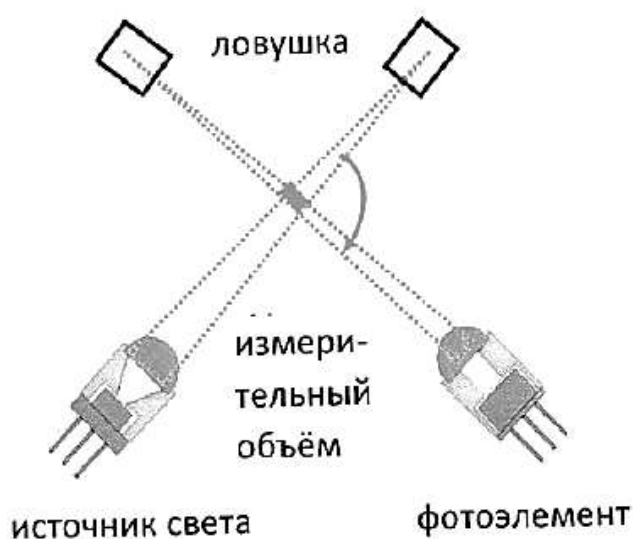


Рис. 34. Принцип действия нефелометра

К достоинствам метода следует отнести простоту применения, возможность проведения непрерывных измерений.

### 3.3.5. Радиоизотопный метод

Радиоизотопный метод основан на поглощении частицами  $\beta$ -излучения, испускаемого закрытым источником с изотопом. ДЧ осаждаются на аналитический фильтр путём прокачки пробы воздуха насосом. Измерение  $\beta$ -излучения проводится с помощью встроенного в анализатор счётчика Гейгера. В начале каждого цикла измерения анализатор измеряет количество  $\beta$ -излучения, которое поглощено ненагруженной фильтрующей лентой. Это, по существу, является автоматической коррекцией нуля. Когда установка нуля произведена, проба пропускается через фильтрующую ленту с контролируемой скоростью потока. Частицы, находящиеся в газовом потоке, оседают на фильтрующей ленте. После определённого времени отбора пробы вновь измеряется количество  $\beta$ -излучения, поглощенного загруженной фильтрующей лентой. Различие между начальным считанным нулём и конечным измерением прямо пропорционально суммарной массе ДЧ, осевших на ленте. Все функции прибора управляются, как правило, мощным встроенным микропроцессором. Этот микропроцессор вычисляет величину концентрации ДЧ, исходя из объёма газа и разницы между нулевым и конечным значениями поглощенного излучения. Непрерывная работа подобных приборов достигается применением движущихся ленточных стекловолоконистых фильтров.

К недостаткам метода относят отсутствие возможности непрерывного контроля концентраций, необходимость частой замены фильтров. Владельцу прибора необходимо выполнять целый ряд нормативных процедур по работе с изотопными источниками.

К преимуществам метода следует отнести то обстоятельство, что по сравнению с гравиметрическим методом можно вместо единичного результата получать результаты серии экспериментов.

**Контрольные вопросы**

1. Перечислите методы гранулометрического анализа дисперсных частиц.
2. Опишите метод гранулометрического анализа ДЧ с использованием диффузионных батарей.
3. Опишите метод гранулометрического анализа ДЧ с использованием импакторов.
4. Опишите метод гранулометрического анализа ДЧ с использованием виртуальных импакторов.
5. Опишите метод гранулометрического анализа ДЧ с использованием лазерной дифракции.
6. Опишите метод гранулометрического анализа ДЧ с использованием многодетекторной электрометрии.
7. Опишите метод гранулометрического анализа ДЧ с использованием статических и динамических анализаторов изображения.
8. Опишите метод гранулометрического анализа ДЧ с использованием фильтров.
9. Перечислите методы измерения массовых концентраций дисперсных частиц.
10. Опишите гравиметрический метод измерения массовых концентраций ДЧ.
11. Опишите гравиметрический метод пьезобалансового взвешивания для измерения массовых концентраций ДЧ.
12. Опишите фотометрический (абсорбционный) метод измерения массовых концентраций ДЧ.
13. Опишите нефелометрический метод измерения массовых концентраций ДЧ.
14. Опишите радиоизотопный метод измерения массовых концентраций ДЧ.



## 4. МОНИТОРИНГ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В АТМОСФЕРЕ

### 4.1. Анализ данных мониторинга ДЧ в Москве

Московская система мониторинга атмосферного воздуха начала создаваться в 1996 г. по решению Правительства Москвы. Ежегодно производится корректировка сети автоматических станций мониторинга, расширяется перечень контролируемых загрязняющих веществ и метеорологических параметров, влияющих на загрязнение воздуха.

Наблюдение за ДЧ началось с 2008 года: на 9 станциях было установлено оборудование для измерения  $PM_{10}$ , и на 2 станциях – для измерения  $PM_{2,5}$ . К 2011 году измерения ДЧ проводились на всех специфических территориях.

К 2014 году сеть постов для мониторинга ДЧ расширилась: на 17 станциях установлено оборудование для измерения  $PM_{10}$ , и на 12 станциях – для измерения  $PM_{2,5}$ .

Среднегодовые концентрации ДЧ не имеют явно выраженных тенденций, что связано, в первую очередь, с ежегодными особенностями поведения климатической системы (рис. 35, 36). Например, пики среднегодовых концентраций в 2010 году связаны с продолжительным периодом летней жары, сопровождавшейся затяжными пожарами.

Среднегодовые концентрации ДЧ превышают российские нормативы лишь в части территории города, тогда как превышение нормативов ВОЗ наблюдается на всей территории Москвы. Обращает на себя внимание явно «завышенный» по сравнению с нормативом ВОЗ российский норматив для  $PM_{2,5}$ . И если обоснованию международных нормативов посвящены многочисленные исследования, открыто опубликованные на сайтах соответствующих ведомств (например, [65]), то российские нормативы введены без каких-либо комментариев.

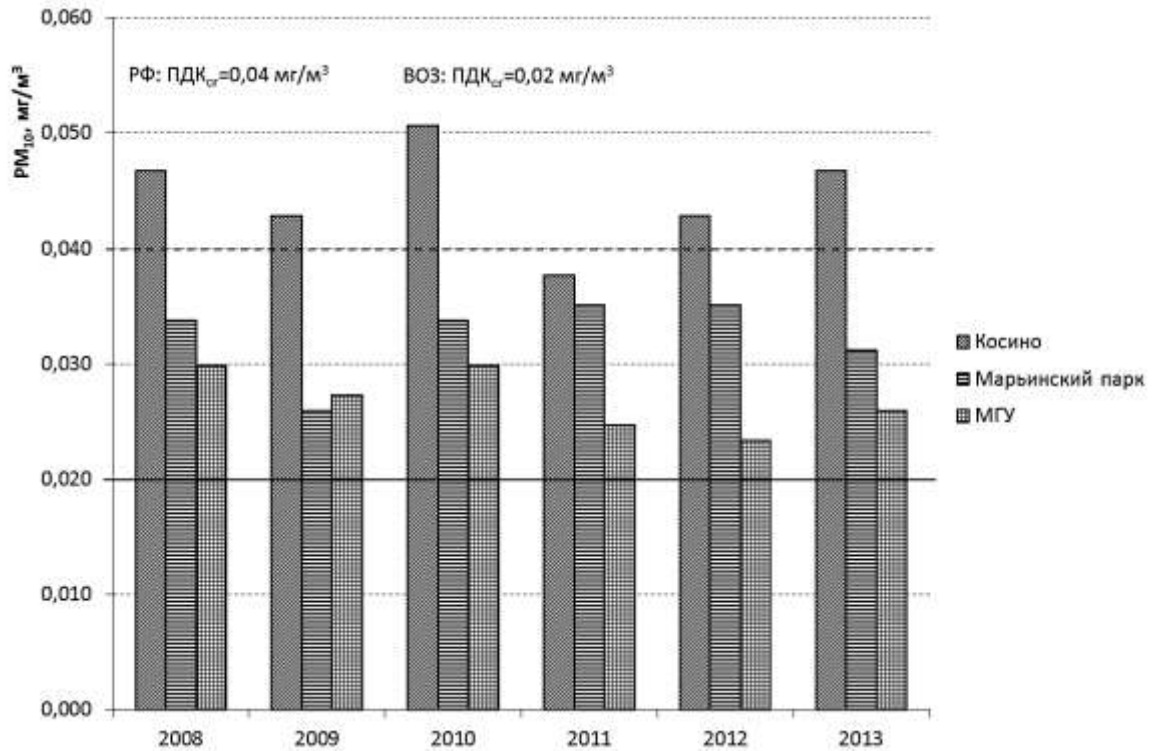


Рис. 35. Динамика среднегодовых концентраций  $PM_{10}$  в Москве. Источник: Мосэкомониторинг

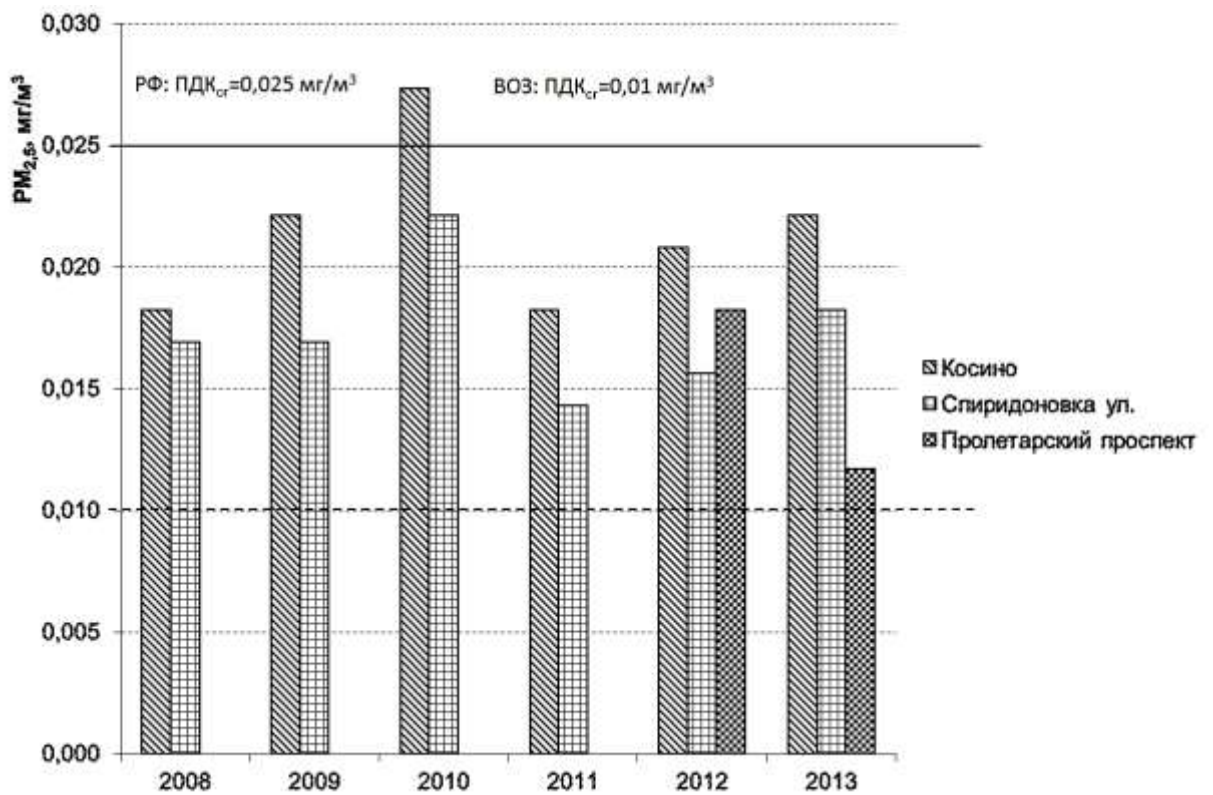


Рис. 36. Динамика среднегодовых концентраций  $PM_{2,5}$  в Москве. Источник: Мосэкомониторинг

Среднесуточные концентрации ДЧ имеют тенденцию к увеличению в тёплый период года, что связано, по-видимому, как с состоянием подстилающей поверхности, так и метеорологическими особенностями этих периодов (рис. 37...40). Если в холодный период года поверхность земли либо покрыта снегом и находится в замёрзшем состоянии, либо достаточно сильно увлажнена, что в обоих случаях препятствует пылеобразованию, то в тёплый период года она сухая<sup>1</sup>, что способствует пылеобразованию. Неблагоприятные метеорологические условия (НМУ) для рассеивания ЗВ в атмосфере (штиль + температурная инверсия) также формируются в Москве в основном в тёплый период года. Что касается уровня выбросов ДЧ в атмосферу в эти два периода, то следует отметить, что преобладающие источники выбросов ЗВ (автотранспорт, строительство) также активизируются в тёплый период.

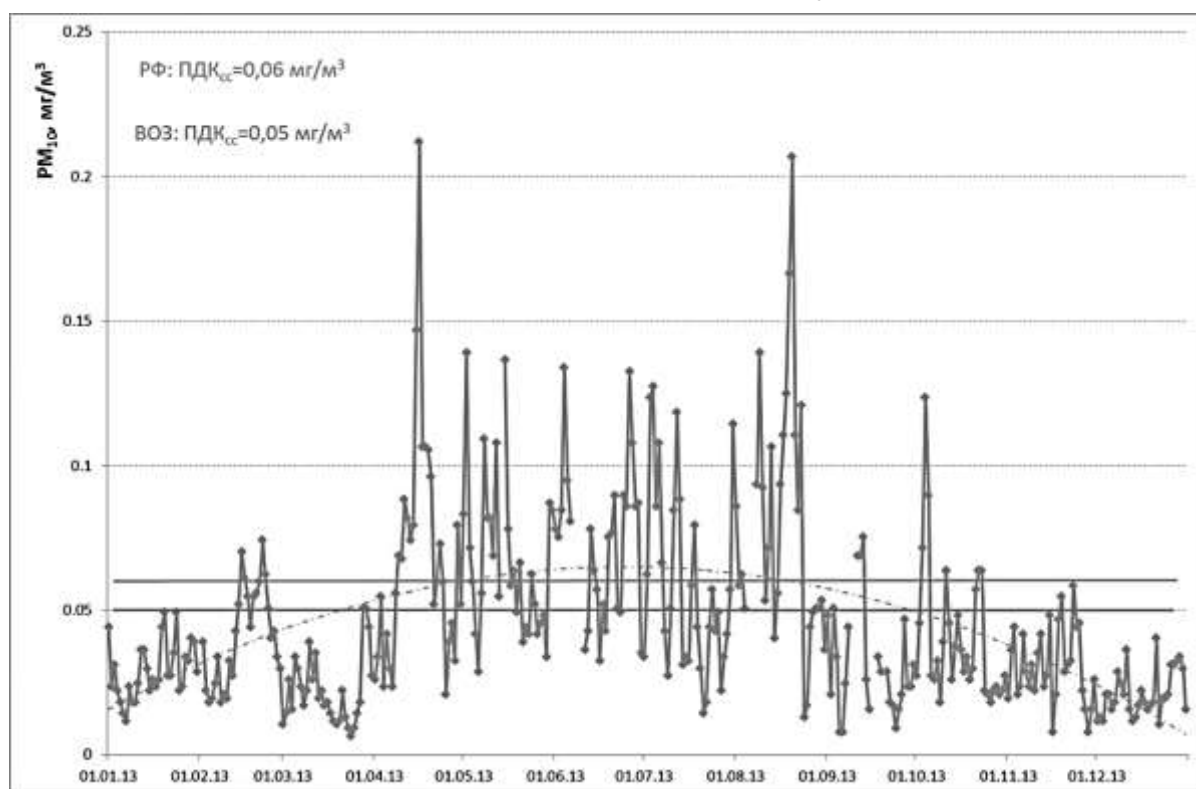


Рис. 37. Динамика среднесуточных концентраций  $PM_{10}$  на АСКЗА «Косино» в 2013 году. Источник: Мосэкомониторинг

<sup>1</sup> И на достаточно большой площади не защищена от эрозии растительностью.

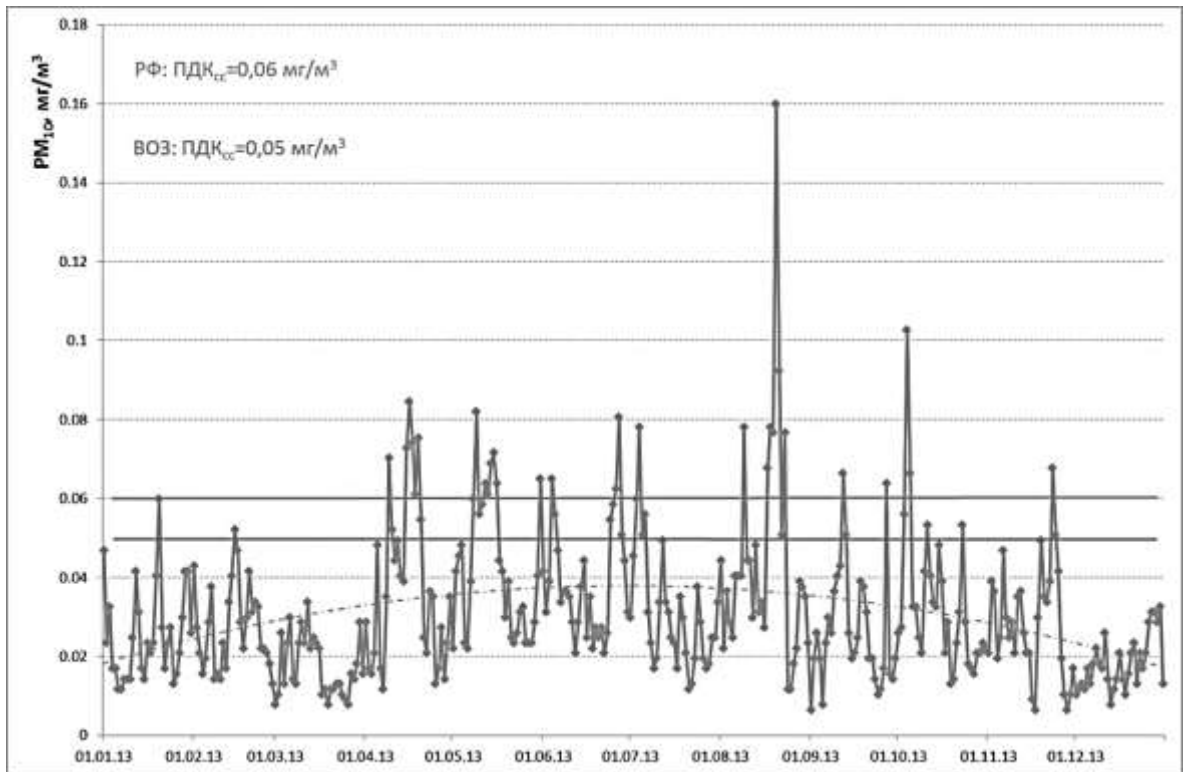


Рис. 38. Динамика среднесуточных концентраций  $PM_{10}$  на АСКЗА «Марьинский парк» в 2013 году. Источник: Мосэкомониторинг

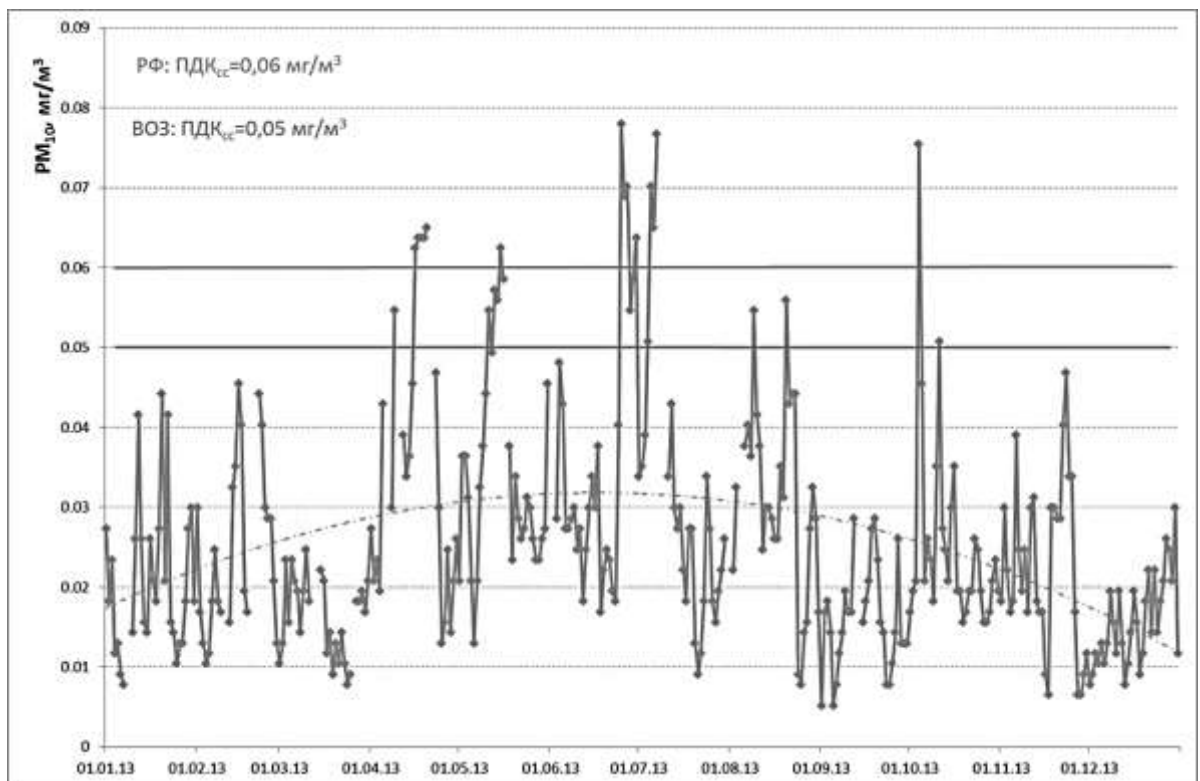
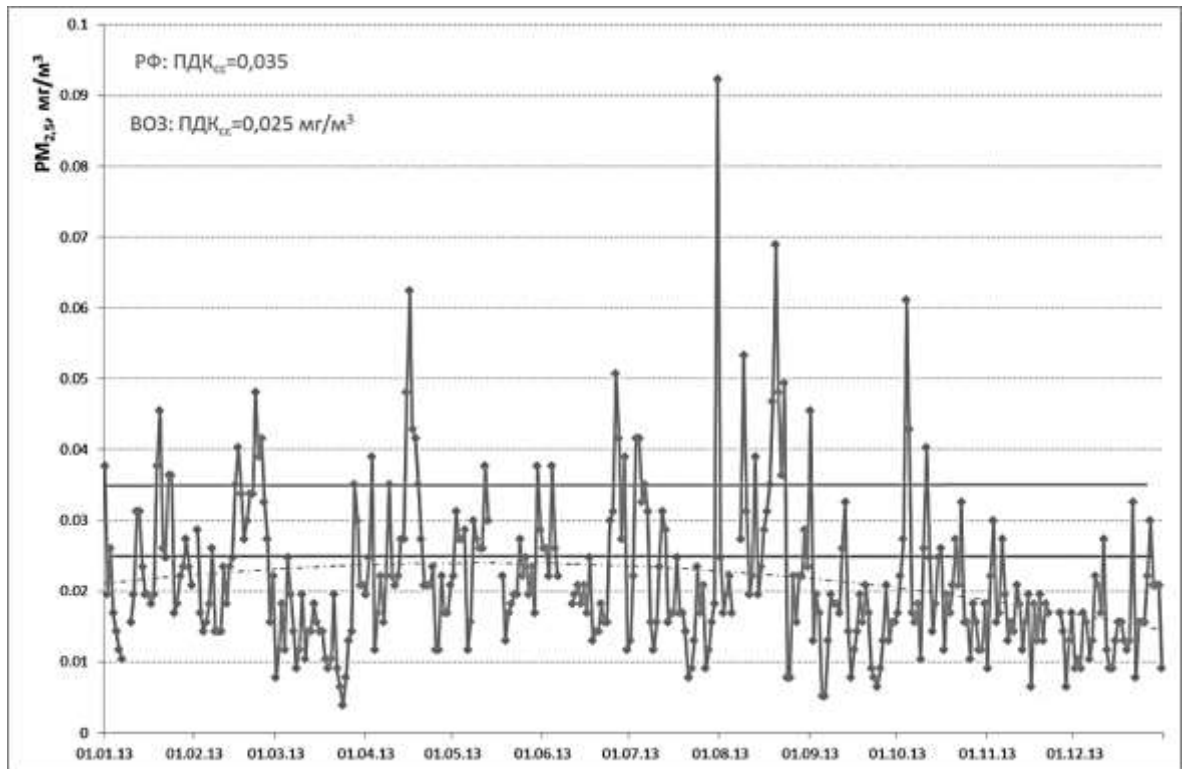


Рис. 39. Динамика среднесуточных концентраций  $PM_{10}$  на АСКЗА «МГУ» в 2013 году. Источник: Мосэкомониторинг



*Рис. 40. Динамика среднесуточных концентраций  $PM_{2,5}$  на АСКЗА «Косино» в 2013 году. Источник: Мосэкомониторинг*

Исключение здесь составляют выбросы ТЭЦ и котельных, увеличивающиеся в холодный период года, однако учитывая, что эти источники по большей части используют в качестве топлива природный газ, расположены по периферии города и имеют высокие дымовые трубы, можно сделать предположение об их незначительном вкладе в измеряемые приземные концентрации ДЧ.

Российские среднесуточные нормативы и тем более нормативы ВОЗ превышаются в части территорий Москвы достаточно часто. Как правило, случаи превышения нормативов относятся к периодам со слабым ветром и наличием температурной инверсии.

#### **4.2. Рекомендации по развитию системы мониторинга ДЧ**

Материалы, представленные в данном пособии, позволяют сформулировать некоторые рекомендации по развитию системы мониторинга ДЧ.

Первый аспект рекомендаций касается вопроса «**Что измерять?**». В идеальном случае необходимо проводить измерения, позволяющие идентифицировать (как по массе, так и по количеству) все значимые гранулометрические фракции атмосферных ДЧ:

- грубодисперсные<sup>1</sup> (10...100 мкм);
- среднедисперсные (2,5...10 мкм);
- мелкодисперсные (0,1...2,5 мкм);
- нанодисперсные<sup>2</sup> (0,001...0,1 мкм).

Каждую фракцию необходимо тщательно исследовать на предмет **физических** (плотность, светопоглощающая и светоотражающая способность и т.п.) и **химических** (содержание химических элементов и соединений, особенно высокотоксичных) свойств. Естественно, все измерения должны быть **связанными** между собой.

Второй аспект рекомендаций касается вопроса «**Где измерять?**». В принципе, используемый в настоящее время Мосэкомониторингом типаж территорий следует признать достаточным:

- 1 – территории, находящиеся под непосредственным влиянием транспортных магистралей,
- 2 – смешанный тип территорий, находящихся под воздействием различных антропогенных источников,
- 3 – жилые территории,
- 4 – фоновые территории, находящиеся на удалении от источников загрязнения атмосферы.

Расположение стационарных АСКЗА должно адекватно учитывать все типы территорий во всех административных округах Москвы. Должны быть учтены все наиболее крупные стационарные источники выброса ДЧ. Кроме того, каждой территории, соотнесённой с каждой АСКЗА, должна быть дана характеристика, позволяющая оценить ущерб (или риск), возникающий от загрязнения атмосферы ДЧ:

- количество проживающего/работающего населения;
- количество зелёных насаждений;

<sup>1</sup> ДЧ размером более 100 мкм переходят в размерность «песка».

<sup>2</sup> ДЧ размером менее 0,001 мкм невозможно измерить существующими в настоящее время способами.

- количество сооружений, требующих содержания поверхности или ограждающих конструкций в чистом состоянии (архитектурные памятники, фасады общественных зданий, мосты и т.п.).

При расположении стационарных АКСЗА необходимо уделять особое внимание особенностям местности (расположение зданий и сооружений, зелёных насаждений) с тем, чтобы рельеф местности не оказывал существенного влияния на отбираемую для анализа пробу воздуха.

Передвижные АКСЗА необходимо использовать для более детального изучения отдельных источников выбросов ДЧ, а также для реагирования на чрезвычайные ситуации природного и антропогенного характера и для проверки поступающих от населения жалоб на состояние атмосферного воздуха.

Третий аспект рекомендаций касается вопроса «**Чем измерять?**». Для целей мониторинга воздуха населённых мест анализатор ДЧ в идеале должен отвечать следующим условиям:

- осуществлять отбор проб стандартным воздухозаборным устройством;
- одновременно проводить анализ всех исследуемых фракций (или по крайней мере  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  и  $PM_{0,1}$ );
- обеспечивать непрерывность получения данных;
- иметь высокое временное разрешение и чувствительность;
- предусматривать возможность отбора пробы на фильтр в целях калибровки по эталонному гравиметрическому методу, а также для проведения дополнительных исследований физических и химических свойств **каждой фракции ДЧ**;
- передавать базовые данные в режиме on-line.

Не существует какого-либо единственного метода, обеспечивающего все потребности мониторинга воздуха населённых мест, удовлетворяющего одновременно требованиям точности, объективности, экономичности, непрерывности работы, количеству контролируемых параметров и т.п. В любом случае основой является

хорошо отработанный гравиметрический метод, который, несмотря на свою трудоёмкость, является базовым для калибровки многих других способов измерения концентраций мелкодисперсных частиц.

Для целей мониторинга атмосферного воздуха целесообразно использовать набор различных приборов, основанных на различных методах измерения и решающих наилучшим способом те или иные стороны проблемы регистрации концентраций ДЧ. Это подтверждает и рамочный план Всемирной организации здравоохранения, разработанный при участии Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова в 2006 г. для стран Восточной Европы по организации мониторинга ДЧ [66]. В частности, рекомендуется использовать гравиметрическое оборудование в качестве эталонного метода, а также:

- автоматический заменитель фильтров в качестве важного дополнения гравиметрического метода;
- приборы автоматического мониторинга для описания изменений концентрации ДЧ во времени. При этом экспертами должен быть установлен местный поправочный коэффициент, позволяющий повысить сопоставимость результатов автоматического измерения и гравиметрического измерения концентраций ДЧ;
- для возможности расширенного использования получаемых при мониторинге ДЧ результатов следует проводить мониторинг одновременно всех фракций ДЧ (или хотя бы  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$ ) в одной точке при помощи дихотомического последовательного пробоотборника, когда частицы разных размеров ( $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$ ) собираются на отдельных фильтрах, а затем вычисляется значение промежуточных фракций ( $PM_{10...2,5}$  – «грубая» фракция ДЧ – как разность  $PM_{10} - PM_{2,5}$ ).

Наконец, четвёртый аспект рекомендаций касается вопроса «**Зачем измерять?**». Экологический мониторинг предназначен не только для оценки текущей ситуации, но также для её анализа и прогноза возможных изменений при осуществлении различных управляющих воздействий.



Для проведения наиболее детального анализа результатов мониторинга ДЧ необходимо, наряду с расширением сети стационарных и передвижных АСКЗА, обеспечить возможность сопоставления результатов мониторинга с показателями, по возможности **однозначно количественно** характеризующих:

- мощность выброса первичных ДЧ в атмосферу от различных антропогенных и природных источников,
- степень формирования вторичных ДЧ в атмосфере,
- степень рассеивания ДЧ в атмосфере,
- скорость удаления ДЧ из атмосферы.

В настоящее время такие показатели не разработаны, имеются лишь фрагментарные исследования и отдельные предложения в данной области.

### ***Контрольные вопросы***

1. Каковы тенденции содержания дисперсных частиц в атмосферном воздухе в Москве?
2. Насколько часто и в какое время года наблюдается превышение российских нормативов концентраций  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  в Москве? А нормативов ВОЗ?
3. Сформулируйте рекомендации по развитию системы мониторинга ДЧ.

## **5. ПУТИ И МЕТОДЫ СОКРАЩЕНИЯ ВЫБРОСОВ ДЧ ОТ АВТОТРАНСПОРТА**

Принципиальные возможности сокращения выбросов ДЧ от автотранспорта заключаются в следующем:

- поиск возможностей сокращения транспортных потребностей жителей города и субъектов экономики, а также транзита;
- максимально возможное использование видов транспорта с наиболее низкими удельными выбросами ДЧ, приходящимися на единицу транспортной работы;
- улучшение показателей выбросов ДЧ автотранспортными средствами на протяжении всего срока их службы и увеличение доли АТС с низким уровнем выбросов ДЧ в эксплуатируемом автопарке;
- применение материалов с улучшенными показателями износостойкости при производстве шин, тормозов и дорожного покрытия;
- оптимизация режимов движения автотранспортных потоков на улично-дорожной сети города;
- совершенствование процедур уборки дорожного покрытия и предотвращение его загрязнения;
- использование возможностей по очистке воздуха зелёными насаждениями.

### ***5.1. Сокращение транспортных потребностей и транзита***

Как известно, «возможности порождают потребности». Рост финансового благополучия и уровня материального потребления привлекают в мегаполисы всё больше жителей, что с одной стороны позволяет обеспечить новые перспективы роста экономики города, но с другой – обостряет транспортные, экологические и социальные проблемы. Усилия по их разрешению приводят к созданию ещё более привлекательных условий для новых потенциальных «переселенцев», порождая новый виток развития всё тех же проблем. Создаётся

«порочный круг», вырваться из которого можно, только изменив существующие принципы социально-экономического и территориального развития всей страны на принципы, соответствующие концепции «экологически устойчивого развития». Концепция «экологически устойчивого развития» или «экоразвития» может показаться слишком «глобальной» для рамок данной темы, однако упомянуть её необходимо, во-первых, как конечную цель любых преобразований, а во-вторых, как необходимое условие для **успешной** реализации всего комплекса предлагаемых далее мероприятий. Одно из ключевых положений концепции «экоразвития» – утверждение о невозможности бесконечного роста потребления и о необходимости развития общества на основе принципов достаточности и контроля потребностей, – как раз служит обоснованием мероприятий, направленных на оптимизацию и сокращение транспортных потребностей. Эта задача является трудноразрешимой (и даже, скорее всего, неразрешимой) в рамках доминирующей в настоящее время концепции бесконечного экономического роста, о чём свидетельствует более чем десятилетний опыт попыток Евросоюза «разорвать» связь между показателями экономического роста и показателями транспортной активности. Все усилия по сдерживанию мобильности за счёт роста транспортных налогов, топливных акцизов, платы за проезд, парковку и т.п. нивелируются за счёт факторов, обеспечивающих экономический рост: роста объёмов торговли, туризма и т.п.

Не будем касаться вопросов сдерживания мобильности на уровне государства, поскольку результаты реализации тех или иных мероприятий в данной сфере довольно неоднозначные. Однако некоторые мероприятия, реализуемые на уровне городов, следует упомянуть, как доказавшие свою эффективность на практике. Прежде всего речь идёт о формировании «экологически устойчивых» моделей в градостроительной практике. Грамотное размещение жилья, объектов жизнеобеспечения и объектов, формирующих транспортные потребности, позволяет минимизировать необходимость в перемещениях грузов и пассажиров. Данный градостроительно-

планировочный подход получил название «город коротких путей». Как правило, этот подход дополняется мерами по приоритетному развитию общественного транспорта, велосипедной и пешеходной мобильности, в совокупности обеспечивающими «транзитно-ориентированное» проектирование городского пространства.

Только наряду с этими усилиями становятся логичными административные или экономические меры по сдерживанию автомобильной «гипермобильности»: запрет или плата за въезд на определённые территории города, плата за парковку, плата за владение личным автомобилем и т.п.

Что касается минимизации транзитных потоков автотранспорта, то здесь также должен реализоваться комплексный подход: наряду с запретительными мерами необходимо развивать дорожную сеть, что позволит сократить перепробеги, связанные с невозможностью реализации транспортных перемещений по кратчайшему расстоянию.

## ***5.2. Приоритетное использование «экологически дружественных» видов транспорта***

По данным НИиПИ Генплана Москвы, объём перевозок пассажиров в 2011 году составил около 7,35 млрд пассажиров. Из него только 26% пришлось на долю личного автомобильного транспорта. И это при практически полном использовании всего доступного пространства улично-дорожной сети для нужд перемещения и парковки именно личного автотранспорта!

Эти данные иллюстрируют крайне низкую эффективность личного автомобиля как городского транспорта и показывают невозможность обеспечения требуемой мобильности горожан за счёт развития дополнительной инфраструктуры для личного автотранспорта. Современные мегаполисы реализуют политику приоритетного развития общественного транспорта, велосипедной и пешеходной мобильности, удовлетворяя нужды «автолюбителей» по остаточному принципу. Москва и другие крупные города России в данном вопросе, увы, последние годы развивалась не в том направлении, всемерно поощряя

использование личного автомобиля для передвижения по городу. К счастью «прозрение» наступило, и сейчас намечены планы по развитию системы общественного транспорта: в 2011 году принята государственная программа города Москвы «Развитие транспортной системы» на 2012...2016 гг. Хотелось бы видеть в данной программе более решительные меры по сдерживанию «гиперавтомобилизации», однако следует признать политическую сложность принятия подобных непопулярных в среде автолюбителей мер.

Среди наиболее интересных и эффективных мер по развитию «экологически дружелюбных» видов транспорта следует упомянуть быстро развивающуюся по всему миру систему «быстрого городского автобусного транзита» или «метробуса» (анг. *Bus Rapid Transit – BRT*). Этот вид наземного общественного транспорта, обеспечивая провозные возможности на уровне метро (до 45000 чел/ч), требует для своей реализации на порядки меньше финансовых и временных затрат [67].

Система BRT признана наиболее рентабельным механизмом, дающим городам возможность быстро создать систему общественного транспорта, которая может перерасти в сеть и предоставлять пассажирам быстрое и высококачественное обслуживание как в развитых, так и в развивающихся странах. Даже на начальной стадии своего применения концепция BRT предлагает потенциал, который может кардинально изменить городской транспорт.

Более того, BRT – это не только транспортирование людей. BRT – это один из элементов целого пакета мероприятий, позволяющих превратить город в пространство, более пригодное для жизни. Интеграция BRT с безмоторными видами транспорта, прогрессивной политикой землепользования и мерами по ограничению использования личных автомобилей составляет часть мер по созданию системы экологически устойчивого транспорта, которая станет фундаментом для здоровой и эффективной городской среды. В этом смысле BRT является одним из условий высокого качества городской жизни для всех слоев общества, особенно в сфере социальной справедливости.

Использование современного подвижного состава (в том числе с газовыми, гибридными или электрическими энергоустановками) позволяет существенно снизить выбросы всех загрязняющих веществ по сравнению с аналогичным по провозной способности транспортным потоком, состоящим из легковых автомобилей [68]. В Москве и других городах России есть все физические условия для реализации данной технологии.

Другим примером «экологически дружелюбной» транспортной технологии, распространённой во многих городах мира, является велосипедный транспорт, который благодаря развитию технологий (велошеринг, электровелосипед и т.п.) и проводимым информационным кампаниям переживает в настоящее время «второе рождение».

Не стоит забывать и о таких видах транспорта, как скоростной трамвай, монорельс, фуникулёр, подвесная канатная дорога и т.п., которые в определённых условиях могут оказаться более предпочтительными.

### ***5.3. Технологическое совершенствование АТС и оптимизация структуры автопарка***

К технологическим мерам, позволяющим снизить удельные показатели выбросов ДЧ с ОГ автомобилей, относятся:

- совершенствование рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания, работающих на бензине и дизельном топливе;
- очистка отработавших газов двигателей внутреннего сгорания;
- использование альтернативных топлив и схем приводов АТС;
- снижение сил сопротивления движению автомобиля за счёт уменьшения собственной массы автотранспортных средств, коэффициентов аэродинамической обтекаемости кузова и сопротивления качению шин, повышения КПД агрегатов трансмиссии, шасси и кузова;
- внедрение навигационных систем, систем бортовой самодиагностики и других информационных служб.

Совершенствование конструкции автомобилей и двигателей должно сопровождаться:

- обеспечением адекватного качества дизельного топлива, бензина и других видов моторного топлива;
- совершенствованием процедур контроля технического состояния АТС, в особенности систем, влияющих на уровень выбросов ДЧ.

Новые технологии смогут реализовать свой потенциал только тогда, когда количество АТС – «носителей» данных технологий будет составлять существенную долю в эксплуатируемом автопарке. И наоборот, эксплуатация даже относительно небольшого количества старых «сверхгрязных» АТС может свести все усилия по разработке новых технологий к нулю. Поэтому так важны меры по оптимизации структуры автопарка, его обновлению.

Наиболее логичным мероприятием в данной области является периодический технический осмотр АТС, призванный обеспечивать исправное техническое состояние АТС и выбраковку машин, более не пригодных к эксплуатации. Однако иногда, наблюдая на дорогах автомобили с очевидными признаками их полной непригодности к безопасному движению, приходится усомниться в эффективности данного инструмента. Поэтому необходимо совершенствовать систему государственного технического осмотра, особенно в части ответственности сторон за конечный результат.

К мерам по стимулированию обновления автопарка следует отнести государственные программы «утилизации» старых АТС, меры по запрету въезда в центр города АТС, не соответствующих определённому экологическому классу, закупку для государственных и муниципальных нужд наиболее современных АТС, налоговые льготы, льготы по использованию выделенных полос для общественного транспорта, льготы на парковку и т.п. Какие-то из этих мер уже реализуются, над внедрением других необходимо ещё работать.

### 5.3.1. Совершенствование рабочего процесса ДВС

Причины и процессы образования ДЧ в ДВС уже были подробно рассмотрены в данном пособии. Совершенствование рабочего процесса ДВС направлено на устранение причин образования ДЧ в ДВС.

Выделение сажи дизелями можно сократить двумя путями: уменьшением образования сажи на начальном этапе горения и улучшением условий её выгорания на основном этапе горения. Для решения этих задач требуется организовать интенсивное перемешивание впрыскиваемого топлива с воздухом в камере сгорания, что осуществляется за счёт:

- мелкодисперсного распыливания топлива, для чего требуется уменьшить диаметр сопел топливной форсунки и соответственно увеличить давление впрыска (системы питания *Common Rail*, системы питания с насос-форсунками);
- оптимизации формы камеры сгорания;
- оптимизации формы и размеров (с возможностью изменения длины в зависимости от режима работы ДВС) впускного тракта, а также управления подачей воздуха через два впускных клапана (на малых нагрузках и частотах вращения коленчатого вала один впускной канал перекрывается специальной заслонкой, обеспечивая увеличение скорости движения воздуха на впуске и создание интенсивного вихря в камере сгорания за счёт несимметричности потока засасываемого в камеру сгорания воздуха);
- управления процессом впрыска топлива при помощи электронноуправляемых топливных форсунок (т. н. «фазированный впрыск»), что позволяет за счёт предварительного впрыска небольшой порции топлива создать в камере сгорания интенсивный вихрь горячего воздуха, оптимизировав тем самым условия для впрыска основной порции топлива;
- применения конструкций с разделённой камерой сгорания (т.н. «вихрекамерой»), где создаётся интенсивный вихрь воздуха на такте сжатия за счёт перетекания воздуха из основного объёма цилиндра в



«улиткообразную» вихрекамеру по специально спрофилированному каналу.

### 5.3.2. Очистка отработавших газов

Наиболее очевидным ответом на проблему выброса ДЧ является задержка их в выпускной системе при помощи фильтров (рис. 41).

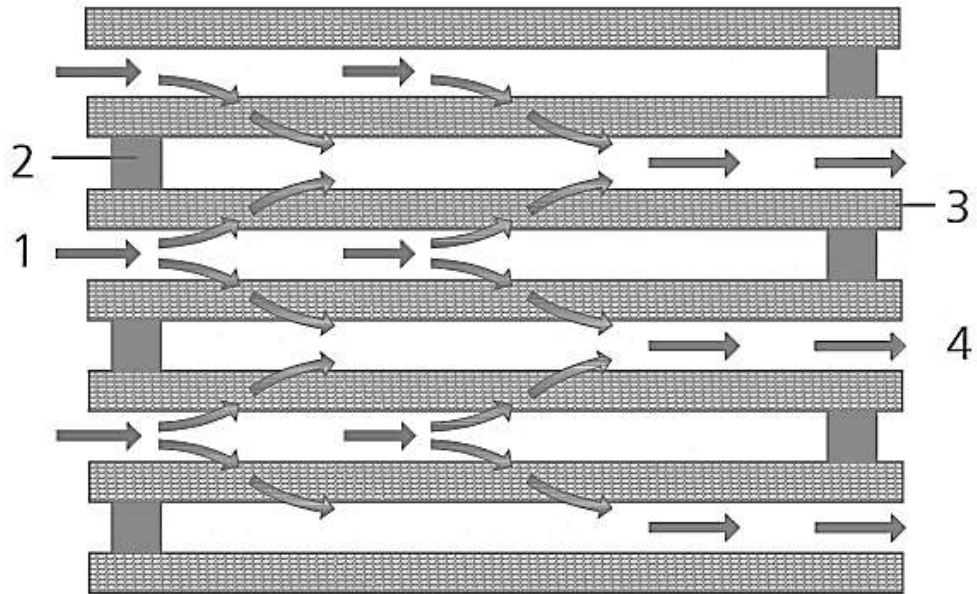
Однако, как известно, фильтрам присущ недостаток, связанный с увеличением аэродинамического сопротивления прохождению потока ОГ через поры фильтра по мере его засорения.

Необходимость замены фильтра через регулярные интервалы можно избежать, сделав фильтр достаточно горячим, чтобы ДЧ, которые в основном состоят из углерода (сажи), доокислились бы (выгорели), в результате чего углерод вошёл бы в состав газообразного  $\text{CO}_2$ . Такие фильтры называются «регенерируемые», потому что при выгорании сажи восстанавливается их исходное аэродинамическое сопротивление.

Для регенерации необходима температура более  $500^\circ\text{C}$ , однако автомобили много времени затрачивают на движение в городских транспортных потоках, двигаясь с маленькими скоростями при температуре ОГ, не достигающей даже  $300^\circ\text{C}$ .

Для решения этой проблемы используется одна или комбинация следующих мер:

- введение в топливо присадок, уменьшающих температуру, необходимую для регенерации фильтра FAP™ (фр. *Filtre à Particules*);
- установка на входе в фильтр нескольких свечей накаливания мощностью  $\cong 1,2$  кВт для подогрева ОГ до необходимой температуры регенерации;
- установка перед сажевым фильтром окислительного нейтрализатора, который, окисляя специально впрыскиваемую «регенерирующую» порцию топлива, повышает температуру ОГ, необходимую для регенерации фильтра (анг. *Diesel Particulate Filter – DPF*).



*Рис. 41. Схема процесса фильтрации ОГ в керамическом сажевом фильтре:  
1 – загрязнённые ОГ, 2 – керамическая пробка, 3 – керамические пористые стенки,  
4 – очищенные ОГ*

Наиболее распространённой является система DPF, регенерация сажевого фильтра которой представляет собой следующий процесс. Когда блок управления двигателем, анализируя сигналы датчиков давления, расположенных перед и после фильтра, определяет необходимость его очистки, запускается процесс активной регенерации. При этом выполняются следующие функции:

- прекращается рециркуляция ОГ, чтобы повысить температуру сгорания топлива;
- производится дополнительный впрыск небольшой порции топлива, подаваемого после основной дозы, а именно, при повороте коленчатого вала на  $\cong 35^\circ$  после ВМТ;
- снижается подача воздуха в двигатель посредством регулируемой дроссельной заслонки с электроприводом;
- давление наддува поддерживается на уровне, при котором обеспечивается незаметность регенерации для водителя.

Дополнительная порция топлива в испарённом состоянии (т.е. в виде углеводородов – СН) доокисляется (догорает) в установленном

перед сажевым фильтром окислительном нейтрализаторе, разогревая тем самым отработавшие газы до температуры 600...650°C, необходимой для выгорания сажи (окисления до CO<sub>2</sub>). Как только сажа выгорит, о чём засвидетельствует изменение противодавления, оказываемого фильтром, двигатель возвращается к обычному режиму работы. После проведения активной регенерации полностью восстанавливается способность фильтра задерживать содержащуюся в ОГ сажу. Регенерация выполняется через каждые 500...700 км пробега. Её продолжительность составляет примерно 5...10 минут. Процесс регенерации происходит незаметно для водителя.

В системе FAP<sup>™</sup>, разработанной специалистами концерна PSA Peugeot Citroen, температура, необходимая для сгорания сажи, может быть достигнута только при использовании церие содержащей присадки, которая автоматически регулярно впрыскивается в дизельное топливо из отдельного резервуара.

Церие содержащая присадка представляет собой жидкий коллоидный раствор дизельного топлива с микрогранулами церия. Микрогранулы состоят из частиц церия, заключённых в нерастворимой оболочке из вещества, по своим свойствам напоминающего желатин. Благодаря своему свойству при окислении (сгорании) выделять большое количество тепла, церий дополнительно разогревает ОГ.

Во время такта выпуска ОГ, когда выпускные клапаны открыты, происходит «послевпрыск» небольшой порции топлива, содержащего присадку, в поток ОГ, вытесняющихся поршнем из цилиндра. Отработавшие газы, уже частично охлаждённые, не вызывают воспламенение церия, а лишь испаряют желатиновую оболочку микрогранул. В предварительно разогретом виде и с испарённой оболочкой частицы церия попадают на уже разогретую до необходимой температуры (400...500°C) поверхность FAP<sup>™</sup>-фильтра и в присутствии кислорода отработавших газов и углерода сажи мгновенно воспламеняются, поджигая частички сажи, локально поднимая температуру до 1000°C.

Это, с одной стороны, не приводит к повреждению керамической решётки фильтра, а с другой стороны, максимально быстро и в полном объёме окисляет не только частицы сажи, но и более сложные составляющие ОГ дизельного двигателя.

«Ахиллесовой пятой» сажевого фильтра является то, что при движении АТС в условиях городских пробок он может быть быстро закупорен частицами сажи, а система автоматической регенерации не сможет запуститься из-за низкой температуры ОГ или других причин. В этом случае мощность и крутящий момент двигателя упадут, и автомобиль «перестанет ехать». Для обеспечения нормальной регенерации сажевого фильтра в руководствах по эксплуатации производители иногда рекомендуют «...время от времени активировать процесс регенерации фильтра, проезжая примерно 40 км со скоростью 80 км/ч на низких передачах, либо двигаться в обычном режиме, также используя низшую из возможных передач...». Проблема состоит в том, что обычный водитель не всегда имеет возможность осуществить действия, предписанные руководством по эксплуатации. Сажевый фильтр забивается сажей ещё больше и, в конце концов, может выйти из строя. По этой причине сажевые фильтры имеют ограниченный срок службы, который, судя по имеющимся данным, составляет порядка 120...200 тыс. км.

Если условия эксплуатации не благоприятствуют автоматическому включению процесса очистки сажевого фильтра, предусмотрена процедура принудительной регенерации, запускаемая с помощью оборудования сервисных станций, куда и следует обращаться в подобных случаях.

Кроме того, периодические «послевпрыски» топлива приводят к тому, что несгоревшее топливо проникает через зазоры в поршневых кольцах в картер двигателя и, разбавляя моторное масло, резко ухудшает его свойства. Особенно это касается биодизельного топлива, которое по сравнению с обычным ДТ обладает повышенной температурой кипения. Это может привести к неисправности ДВС,

поэтому возникает необходимость более частой смены моторного масла.

Высокая чувствительность эффективности сажевых фильтров от культуры эксплуатации и технического обслуживания заставляет говорить о необходимости проведения специальных исследований, позволяющих оценить среднюю эффективность данной технологии для условий России.

### **5.3.3. Расширение использования альтернативных топлив**

В России накоплен значительный опыт эксплуатации АТС, работающих на сжиженном углеводородном газе (СУГ) и природном газе, начинается процесс «электрификации» автотранспорта за счёт появления гибридных моделей АТС и электромобилей. Проводились экспериментальные исследования возможностей использования растительных масел и метилового эфира (биодизельное топливо), диметилового эфира (ДМЭ) в качестве топлива для ДВС/СВС. Все эти альтернативы характеризует очень низкий уровень выбросов ДЧ с ОГ ДВС. Поэтому необходимо продолжать работу по расширению применения данных видов альтернативных топлив.

Довольно интересной представляется идея о государственно-частном партнёрстве в данной сфере, когда муниципальные власти берут на себя обязательства по закупке автотранспортной техники (городские автобусы, мусоровозы и т.п.), создавая тем самым гарантированный уровень спроса на альтернативные энергоносители, а фирмы-поставщики этих энергоресурсов формируют заправочную инфраструктуру.

Следует также отметить важность проведения научных исследований в данной области с тем, чтобы, с одной стороны, предоставить обществу и государственным органам, принимающим решения, достоверную и полную информацию о преимуществах и недостатках различных альтернатив, а с другой стороны, совершенствовать все аспекты применения существующих альтернатив и разрабатывать новые предложения. Поскольку проблема применения

различных энергоносителей на транспорте является межсекторальной, то научные исследования должны быть реализованы для всех стадий жизненного цикла альтернативных энергоносителей.

#### ***5.4. Приоритетное использование износостойких материалов шин, тормозов и дорожного покрытия***

##### **5.4.1. Снижение износа шин**

Для снижения выбросов ДЧ от износа шин необходимо добиваться повышения износостойкости материала автомобильных шин (совершенствование технологий по приготовлению резиновых смесей), а также обеспечивать соблюдение регламентированных производителем условий эксплуатации шин (давления воздуха в шине, нагрузки на колесо, скорости движения, режимов разгона и торможения).

Работа по повышению износостойкости шин ведётся производителями шин уже давно. В 2012 году французская автомобильная ассоциация Que Choisir провела опрос 34 тысяч владельцев автомобилей из пяти европейских стран – Бельгии, Испании, Франции, Италии и Португалии – с целью составления рейтинга самых износостойких брендов шин. В исследовании приняли участие 24 бренда шин, некоторые из которых не очень широко распространены в России, но популярны в ЕС (табл. 9).

Лидером по показателю износоустойчивости шин стала французская компания Michelin, опередившая аутсайдеров (последнее место в списке) по этому показателю на целых 40%. «Серебро» получила компания Goodyear, средний пробег покрышек которой составил 44479 км. Третье место заняли шины, выпускаемые под маркой Sava и являющиеся дочерним брендом компании Goodyear.

Исследователи Que Choisir также отметили, что для равномерного износа покрышек и увеличения их пробега необходимо регулярно проверять давление в шинах.

## Рейтинг износостойкости шин по результатам исследования в 2012 году

Место	Бренд	Средний пробег, тыс. км	Место	Бренд	Средний пробег, тыс. км
1	Michelin	46,90	13	Semperit	41,74
2	Goodyear	44,50	14	Toyo	41,42
3	Sava	44,47	15	Avon	41,17
4	BFGoodrich	44,17	16	Kleber	40,45
5	Kumho	44,09	17	Yokohama	40,05
6	Pirelli	43,18	18	Vredestein	38,75
7	Continental	43,11	19	Ceat	38,00
8	Bridgestone	42,99	20	Marangoni	37,49
9	Dunlop	42,37	21	Barum	35,89
10	Firestone	42,34	22	Fulda	35,84
11	Uniroyal	42,10	23	Nokian	35,54
12	Hankook	41,91	24	Nankang	33,38

С целью расширения использования износостойких шин можно предложить проведение подобных исследований на российском рынке, результаты которых доводить до автовладельцев в рамках рекламных и информационных кампаний.

#### 5.4.2. Снижение износа тормозов

Лучший способ уменьшить износ тормозных механизмов – не тормозить. Иногда действительно удаётся избежать необходимости торможения, но об этом речь пойдёт в разделе, касающемся оптимизации режимов движения транспортных потоков. В данном же разделе перечислим возможности снижения износа тормозных механизмов в случае необходимости торможения.

Процесс торможения – это преобразование кинетической энергии (энергии инерции движущегося автомобиля) в тепловую или какую-либо другую энергию. Необходимо осуществлять этот процесс с наименьшими потерями: с минимальным износом тормозных механизмов и максимально эффективно используя (рекуперируя) полученную энергию или отводя выделяемое тепло.

Если раньше большинство автопроизводителей выпускало АТС, оснащённые в базовом варианте только моторным тормозом, то теперь

они подходят к проблеме более комплексно, оснащая их комплексной «неизнашиваемой тормозной системой» (НТС) [69].

Как правило, НТС состоит из моторного тормоза (более эффективного на малых скоростях) и так называемого замедлителя или ретардера (более эффективного на средних и высоких скоростях).

Современная НТС способна взять на себя ответственность за 85...90 % случаев торможения, при этом сохраняя рабочие тормоза (барабанные и/или дисковые) холодными, т.е. наиболее эффективными в условиях экстренного торможения. При использовании НТС снижается износ тормозных барабанов (дисков), колодок и покрышек.

НТС сегодня применяется на средних (6,5...16 т), тяжёлых (16...44 т) грузовиках (автобусах) и сверхтяжёлых грузовиках (более 44 т). Она служит для снижения нагрузок на основные рабочие тормоза АТС. Для некоторых категорий грузовиков (таких, как машины, перевозящие опасные грузы) и для автобусов, наличие этой системы является в ряде стран обязательным.

Гибридные АТС и электромобили способны также утилизировать часть энергии торможения, переводя тяговый асинхронный электродвигатель в режим генератора, вращаемый через трансмиссию колёсами. Так как для вращения генератора требуется определённый крутящий момент, то на колёсах возникает тормозная сила, замедляющая автомобиль.

Другое направление снижения износа тормозных механизмов – применение новых износостойких материалов и технологий изготовления тормозов. Режимы взаимодействия пары «тормозной диск – колодка» довольно суровые. Это действующие в ней высокие (до 10 МПа) контактные давления; интенсивный (до 600°C) фрикционный разогрев при сухом абразивном трении; нередко возникающие фрикционные колебания («вибрация при торможении») [70].

С помощью современных методов металлографического и микрорентгеноспектрального анализа было установлено, что реальный процесс трения в паре «тормозной диск – колодка» включает в себя три составляющих: микрорезание, интенсивное окисление, перенос и



намазывание полимерного связующего и композитов, входящих в состав материала тормозной колодки, а также продуктов, образующихся при работе во фрикционном контакте, на поверхность тормозного диска. Причем преобладающую роль может играть любая из этих составляющих – всё зависит от условий работы, особенностей конструкции, технологии изготовления и свойств материалов, образующих пару трения.

В данной области необходимы дальнейшие научные исследования, направленные на поиск возможностей повышения износостойкости и других эксплуатационных характеристик тормозных механизмов.

#### **5.4.3. Снижение износа дорожного покрытия**

Снижение выброса ДЧ, образующихся от износа дорожного покрытия, можно обеспечить путём строительства качественных дорожных покрытий, имеющих наибольший срок эксплуатации. Установлено, что при реализации мероприятий по повышению стойкости покрытий к истиранию (замена традиционного асфальтобетона смесями ЩМА-20, ЩМА-15 с применением вяжущего компонента «БИТРЭК» или «УНИРЭМ»), срок службы асфальтобетонных покрытий, по крайней мере, вдвое выше, чем срок службы покрытий с использованием традиционных битумов при тех же условиях эксплуатации за счёт более высокой трещиностойкости, водостойкости и сдвигоустойчивости получаемого асфальтобетона. Такие покрытия позволяют снизить уровень шума и вибрации, уменьшить возможность образования ледяной корки, повысить сцепление, сократить тормозной путь и, кроме того, могут иметь в 1,5...2 раза меньшую толщину.

Поскольку применение данных вяжущих доказало свою эффективность, необходимо расширенное их применение в дорожном хозяйстве.

К повышенному износу дорожного покрытия приводит использование шипованных шин в холодное время года. Иногда автолюбители забывают своевременно сменить зимние шипованные

шины на летние и продолжают ездить на шипованной резине достаточно продолжительное время и в тёплый сезон. Необходимо ввести запрет использования шипованных шин в тёплое время года, а также ежегодно проводить информационную кампанию, напоминающую водителям о необходимости сменить шины с зимнего варианта на летний.

Снизить абразивный износ дорожного покрытия можно также за счёт совершенствования процедур содержания автомобильных дорог, но более подробно об этом будет изложено в соответствующем разделе.

### ***5.5. Оптимизация режимов движения автотранспортных потоков***

Оптимизация режимов движения автотранспортных потоков оказывает существенное влияние на выброс ДЧ как с ОГ ДВС, так и в результате износа шин, тормозов и дорожного покрытия. Поэтому следует признать данное направление наиболее перспективным.

Необходима реализация мер по обеспечению более равномерного (безостановочного) режима движения автотранспорта по городской УДС, по «успокоению» режима движения транспортных потоков. В состав таких мер входят:

- перераспределение пространства городской УДС в соответствии с приоритетностью общественного транспорта, пешеходного и велосипедного движения;
- совершенствование парковочной политики;
- создание системы интеллектуального управления дорожным движением;
- создание внеуличных переходов для пешеходов и велосипедистов;
- строительство разноуровневых развязок транспортных артерий;
- оптимизация количества и ширины полос на УДС города (на многих отрезках УДС количество полос проезжей части и их ширина могут быть уменьшены без существенного влияния на их общую пропускную способность);

- организация зон с ограничением скорости движения за счёт планировочных решений, инженерных сооружений, дорожной разметки и знаков;
- разработка мер по ограничению транзита и въезда в город (или на определённые городские территории) большегрузного грузового транспорта;
- совершенствование процедур ответственности автолюбителей за неправильную парковку.

### ***5.6. Совершенствование процедур уборки и содержания дорожного покрытия***

Снижение выброса ДЧ в результате абразивного износа шин и дорожного покрытия обеспечивается содержанием УДС в чистом состоянии. Кроме того, уборка поверхности дорог обеспечивает удаление осевших на неё ДЧ, предотвращая их многократный возврат во взвешенное состояние, что влечёт за собой снижение концентраций ДЧ в приземном слое атмосферы. Совершенствование процедур уборки и содержания дорожного покрытия включает в себя следующие мероприятия:

- разработку мер по предотвращению выноса на УДС почвы (грунта) с прилегающих территорий с поверхностным стоком;
- проведение модернизации парка уборочной техники города при увеличении доли техники, обеспечивающей влажную, мокрую уборку городских территорий, а также техники, оснащенной системами улавливания мелкой пыли;
- устройство экологических парковок и полный запрет парковки АТС на газонах и на площадках, не имеющих твёрдого покрытия;
- разработку мероприятий по предотвращению выезда на УДС автомобилей с грязными колёсами и внедорожной техники.

Дополнительные меры: мойка деревьев и кустарников, расположенных рядом с магистралями, при продолжительном отсутствии дождей; полив твёрдых покрытий дворовых территорий, проведение исследований, доказывающих или опровергающих

необходимость уборки опавшей листвы (в настоящее время на этот счёт имеются противоречивые рекомендации).

### **5.7. Очистка воздуха зелёными насаждениями**

Как известно, зелёные насаждения очень эффективно снижают загрязнение воздуха, особенно ДЧ [71]. Этот процесс происходит следующим образом. Загрязнённый воздушный поток, встречающий на своем пути зелёный массив, замедляет скорость, в результате чего под влиянием силы тяжести 60...70% пыли, содержащейся в воздухе, оседает на деревья и кустарники. Значительная часть пыли оседает на поверхность листьев, хвои, веток, стволов. Во время дождя эта пыль смывается на землю. Под зелёными насаждениями вследствие разности температур, возникают нисходящие потоки воздуха, которые также увлекают пыль на землю. Распространению или движению пыли препятствуют не только деревья и кустарники, но и газоны, которые задерживают поступательное движение пыли, перегоняемой ветром из разных мест. Среди зелёных насаждений запылённость воздуха в 2...3 раза меньше, чем на открытых городских территориях. Древесные насаждения уменьшают запылённость воздуха даже при отсутствии лиственного покрова.

Пылезадерживающие свойства различных пород деревьев и кустарников неодинаковы (табл. 10) и зависят от морфологических особенностей листьев. Лучше всего задерживают пыль шершавые, клейкие листья и листья, поверхность которых покрыта ворсинками, как у сирени.

Москва по праву гордилась званием «зелёного» города, однако из-за стремительной автомобилизации многие озеленённые территории, особенно в центре города, перестали существовать. Следует признать ошибочность такого развития событий и предпринять шаги по восстановлению и увеличению площадей зелёных насаждений. При реконструкции городского пространства следовало бы создать «зелёные коридоры», связывающие все районы города, позволяющие

передвигаться по ним на велосипедах или других экологически чистых средствах персональной мобильности.

Таблица 10

Пылеулавливающие свойства некоторых растений [71]

Растение	Суммарная площадь листовой поверхности, м <sup>2</sup>	Количество осажденной пыли	
		общее, кг	удельное, кг/м <sup>2</sup>
Айлант высокий	208	24	0,12
Робиния псевдоакация	86	4	0,05
Вяз перисто- ветвистый	66	18	0,27
Вяз шершавый	233	23	0,10
Гледичия трехколючковая	130	18	0,14
Клён полевой	171	20	0,12
Ива	157	38	0,24
Клён ясенелистный	224	33	0,15
Шелковица	112	31	0,28
Тополь канадский	267	34	0,12
Ясень зелёный	195	30	0,15
Ясень обыкновенный	124	27	0,22
Акация жёлтая	3	0,2	0,07
Бересклет европейский	13	0,6	0,05
Бузина красная	8	0,4	0,05
Лох узколистный	23	2,0	0,09
Сирень обыкновенная	11	1,6	0,15
Спирея	6	0,4	0,07
Виноград пятилисточковый	3	0,1	0,03
Бирючина обыкновенная	8	0,3	0,04

Озеленение городских улиц рассматривается современными архитекторами-градостроителями как обязательный и существенный элемент дизайна. Как, например, выглядит современная городская улица в Европе? В центре – линия скоростного трамвая (совмещённая с газоном!), далее – 2...3 полосы для автомобилей, далее – парковочная зона, как для автомобилей, так и для велосипедов и мототехники, далее – велодорожка, далее – полоса зелёных насаждений и, наконец, тротуар для движения пешеходов.

Такая планировка вполне подходит для большинства крупных улиц в Москве и других крупных городах РФ. Исторический центр с его узкими переулками требует иного подхода, а именно создания зон совмещённого велосипедно-автомобильного движения за счёт мер ограничения скорости движения до 30 км/ч. Таких мер существует множество, начиная от запретительных знаков и заканчивая «лежачими полицейскими» [72]. Озеленение таких улиц также возможно и крайне желательно.

Озеленённые территории городов и их пригородных зон оказывают огромное влияние на качество среды обитания горожан, имеют большое оздоровительное, средозащитное и средоформирующее значение. В то же время вполне очевидно, что городская растительность представляет собой обособленное, искусственно созданное сообщество, которое обитает в специфических условиях. Поскольку ясно, что городские экосистемы неспособны к саморегуляции, правила и нормы по созданию и поддержанию зелёных насаждений в городе должны быть основаны на соблюдении экологических принципов, применяемых при построении искусственных экосистем [71].

**Контрольные вопросы**

1. Перечислите принципиальные возможности сокращения выбросов ДЧ от автотранспорта.
2. Какие существуют способы для сокращения транспортных потребностей и транзита?
3. Какие виды городского пассажирского транспорта считаются «экологически предпочтительными»? Почему?
4. Перечислите технологические меры, позволяющие снизить удельные показатели выбросов ДЧ с ОГ автомобилей.
5. Перечислите направления совершенствования рабочего процесса ДВС, направленные на снижение выбросов ДЧ.
6. Перечислите методы очистки отработавших газов ДВС, направленные на снижение выбросов ДЧ.
7. Какими способами организуется активная регенерация фильтра ДЧ в составе системы по снижению токсичности ОГ ДВС?
8. Перечислите альтернативные топлива, обеспечивающие снижение выбросов ДЧ на автотранспорте.
9. Какие существуют способы снижения выбросов ДЧ, образующихся при износе шин?
10. Какие существуют способы снижения выбросов ДЧ, образующихся при износе тормозов?
11. Какие существуют способы снижения выбросов ДЧ, образующихся при износе дорожного покрытия?
12. Перечислите меры по оптимизации режимов движения автотранспортных потоков.
13. В чём должно заключаться совершенствование процедур уборки и содержания дорожного покрытия?
14. Как зелёные насаждения влияют на содержание ДЧ в атмосферном воздухе?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин А. Основные принципы анализа размеров частиц. // М.: ГК «Энерголаб», 2009.
2. Ивлев Л.С., Довгалюк Ю.А. Физика атмосферных аэрозольных систем. – СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. – 194 с.
3. Air quality in Europe – 2013 report. / EEA Report No 9/2013.
4. Bond, T. Black carbon: Emission sources and prioritization. // International Workshop on Black Carbon, 5-6 January 2009, London, UK.
5. Ayala A. Black carbon controls in California: emissions, abatement and knowledge gaps. // 2009 International Workshop on Black Carbon in Latin America, 19 October 2009, Mexico City, Mexico.
6. Цыро С.Г. Региональная модель для исследования физических и химических свойств взвешенных частиц в Европе: автореф. дис. канд. тех. наук (25.00.30) / Цыро С.Г.; Главная геофизическая обсерватория им А.И. Воейкова – Санкт-Петербург, 2008. – 23 с.
7. Стратегический обзор научных исследований и подходящих методов контроля выбросов сажи. // Международный совет по экологически чистому транспорту, 2010.
8. Пачаури Р. К., Райзингер А., и др. Изменение климата. Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата. – Женева: МГЭИК, 2007. – 104 с.
9. Fuglestvedt J., Shine K., Berntsen T. et al. Transport impacts on Atmosphere and Climate: Metrics. / Atmos Environ, 2010.
10. Ивлев Л.С., Довгалюк Ю.А. Физика атмосферных аэрозольных систем. – СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. – 194 с.
11. Экологический программный комплекс для персональных ЭВМ. Теоретические основы и руководство пользователя ЭПК. Под редакцией А.С. Гаврилова. – Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1992. – 166 с.
12. Экология: Транспортное сооружение и окружающая среда: учеб. Пособие / Ю.В. Трофименко, Г.И. Евгеньев; под ред. Ю.В. Трофименко. – М: Изд. центр «Академия», 2006. – 400 с.



13. Трофименко Ю.В., Лобиков А.В. Биологические методы снижения автотранспортного загрязнения придорожной полосы. – М.: Информавтодор, 2001. – 60 с.
14. Луканин В.Н., Трофименко Ю.В. Снижение экологических нагрузок на окружающую среду при работе автомобильного транспорта // Итоги науки и техн. ВИНТИ, Автомобильный транспорт. – С.1 – 340. 1996.
15. Kittelson D.B.. Engines and nanoparticles: A review. // *Aerosol Sci.*, 29(5/6), 1998. – p. 575 – 588.
16. Schneider J., Hock N., Weimer S., Borrmann S., Kirchner U., Vogt R., Scheer V. Nucleation particles in diesel exhaust: Composition inferred from in situ mass spectrometric analysis. // *Environ. Sci. Technol.*, 39(16), 2005. – p. 6153 – 6161.
17. Tami C. Bond Climate Science and Major Sources // U.S. EPA Region 9 – Black Carbon Symposium – November 14, 2012.
18. Теснер П. А. Образование углерода из углеводородов газовой фазы. – М.: Химия, 1972. – 136 с.
19. Воинов А. Н. Процессы сгорания в быстроходных поршневых двигателях. – М.: Машиностроение, 1977. – 277 с.
20. Гаврилов Б. Г. Химизм предпламенных процессов в двигателях. – Л.: ЛГУ, 1970. – 182 с.
21. Гуреев А. А., Махов В. З., Ховах М. М. Исследование влияния свойств топлива на сажеобразование. – Тр. МАДИ, 1975, Автотракторные двигатели внутреннего сгорания, вып. 92, с. 29 – 38.
22. Махов В. З., Ховах М. С. Исследование влияния присадок к топливу на процесс образования и сгорания сажи в цилиндре дизеля. – В кн.: Снижение загрязнения воздуха в городе выхлопными газами автомобилей. – М.: НИИНавтопром, 1971. – С. 111 – 118.
23. Варшавский И. Л., Мачульский Ф. Ф. Токсичность дизельной сажи и измерение сажесодержания дизельного выхлопа. – Тр. ЛАНЭ. М.: Знание, 1969. – С. 120 – 157.
24. Анализ путей уменьшения токсичности дизелей / В. А. Звонов, Е. И. Боженко, А. П. Дядин и др. – В кн.: Двигатели внутреннего сгорания. Харьков: ХГУ, 1976, вып. 24, с. 115 – 124.

25. Данилов А.М. Присадки и добавки. Улучшение экологических характеристик нефтяных топлив. – М.: Химия, 1996. – 232 с.
26. Шелмаков С.В. Повышение эффективности и экологической безопасности городского автобуса путём согласования режимов работы двигателя и агрегатов трансмиссии / Дисс. К.т.н. М., МАДИ, 1995.
27. Луканин В.Н., Трофименко Ю.В. Промышленно-транспортная экология: учебник для вузов / Под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высш.шк., 2003. – 273 с.
28. Camatini M., Crosta G.F., Dolukhanyan T., Sung Ch., Giuliani G., Corbetta G.M., Cencetti S., Regazzoni C., Microcharacterization and identification of tyre debris in heterogeneous laboratory and environmental specimens. / *Materials Characterization*, Vol 46, 2001. – p. 271 – 283.
29. Boulter P.G., A review of emission factors and models for road vehicle non-exhaust particulate matter. / *TRL Report PPR065*. TRL Limited, Wokingham, UK, 2005.
30. Копытенкова О.И. Невидимые убийцы, или риски, обусловленные мелкодисперсной пылью от транспорта. / Копытенкова О.И., Леванчук А.В., Мингулова И.Р. // М.: Нанотехнологии Экология Производство, № 1(20), 2013. – С. 35 – 37.
31. Величковский Б.Т. Фиброгенные пыли: особенности строения и механизмы биологического действия. – Горький: Волговятское кн. изд-во, 1980. – 159 с.
32. Маркизова Н.Ф., Преображенская Т.Н., Башарин В.А., Гребенюк А.Н. Токсичные компоненты пожаров : Серия «Токсикология для врачей». – СПб: «ООО Издательство ФОЛИАНТ», 2008. – 208 с.
33. Алексеев С.В., Усенко В.Р. Гигиена труда. – М.: Медицина, 1988 – 576 с.
34. Чижевский А.Л. Аэроионификация в народном хозяйстве. – 2-е изд., сокр. – М.: Стройиздат, 1989. – 488 с.
35. Дроздова Т.М. Санитария и гигиена питания: Учебное пособие. В 2-х частях. Часть 1 / – Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2005. – 108 с.

- 
36. Величковский Б.Т. Молекулярные и клеточные основы экологической пульмонологии. / Актовая лекция, прочитанная на 9-м Национальном конгрессе по болезням органов дыхания / – М: Изд-во РГМУ, 2000. – с.10 – 18.
37. Авцын А.П., Жаворонков А.А., Риш М.А., Строчкова Л.С. Микроэлементозы человека. – М.: Медицина, 1991.
38. Сычева Л.П. Биологическое значение, критерии определения и пределы варьирования полного спектра кариологических показателей при оценке цитогенетического статуса человека // Медицинская генетика. – 2007. – Т. 6, № 11 (65). – С. 3–11.
39. Рахманин Ю.А., Иванов С.И., Новиков С.М., Ревазова Ю.А., Русаков И.В. Актуальные проблемы комплексной гигиенической характеристики факторов городской среды и их воздействия на здоровье населения // Гигиена и санитария. – 2007. – № 5. – С. 5 – 7.
40. Зайцева Н.В., Землянова М.А., Алексеев В.Б., Щербина С.Г. Цитогенетические маркеры и гигиенические критерии оценки хромосомных нарушений у населения и работников в условиях воздействия химических факторов с мутагенной активностью (на примере металлов, ароматических углеводородов, формальдегида). Монография – Пермь: Книжный формат, 2013. – 222 с.
41. Гичев Ю.П. Загрязнение окружающей среды и экологическая обусловленность патологии человека. – Новосибирск, 2003. – 138 с.
42. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2011 году: гос. доклад / Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. – М., 2012. – 323 с.
43. Скальный А.В., Рудаков И.А., Нотова С.В., Скальный В.В., Бурцева Т.И., Баранова О.В., Губайдулина С.Г. Биоэлементология: основные понятия и термины. – Оренбург: Изд-во ИПК Оренбург. гос. ун-та, 2005. – 50 с.
44. Токсикологическая химия. Аналитическая токсикология: учебник / под. ред. Р.У. Хабриева, Н.И. Калетиной. – М.: ГОЭТАР-Медиа, 2010. – 752 с.

- 
45. Онищенко Г.Г., Зайцева Н.В., Землянова М.А. Гигиеническая индикация последствий для здоровья при внешнесредовой экспозиции химических факторов. – Пермь: Книжный формат, 2011. – 532 с.
46. Профессиональная патология: национальное руководство / под ред. Н.Ф. Измерова. – М.: ГЭОТАР Медиа, 2011. – 784 с.
47. Артифексов С.Б., Артифексова А.А., Потеемина Т.Е. Регуляция гаметогенеза и мужская инфертильность. Вспомогательные репродуктивные технологии // Проблемы репродукции. – 2003. – № 5. – С. 33.
48. Кулаков В.И., Серов В.Н., Гаспаров В.С. Гинекология: учебник. – М.: Медицинское информационное агентство, 2005. – 616 с.
49. Бочков Н.П. Экологическая генетика человека // Медицина труда и промышленная экология. – 2004. – № 1. – С. 1 – 6.
50. Голощапов А.П. Генетико-биохимические аспекты адаптации человека к условиям города с развитой химической промышленностью. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2012. – 103 с.
51. Пентабромдифениловый эфир. Проект характеристики рисков. Комитет по рассмотрению стойких органических загрязнителей в рамках Стокгольмской конвенции о стойких органических загрязнителях. UNEP/POPS/POPRC.2/7 Женева, 2006.
52. Алексеев С.В., Усенко В.Р. Гигиена труда. – М.: Медицина, 1988. – 576 с.
53. Третьяков О.Б., Скудатын М.Е. Влияние сырья и материалов на канцерогенные свойства шин, Тезисы докладов 1-й Всероссийской конференции по каучуку и резине, – М., 26–28 февраля 2002 г., с. 307–308.
54. Рымаров А.Г. Формирование аэроионного режима здания. СОК №4 – 2010.
55. Сипетров В.П. Аэроионы и жизнь. Саранск, 1997. – 47с.
56. Мачабели М.С., Полесский В.А., Хватов В.Б. и др. Общая электрокоагулология. – М., 1995. – 203 с.
57. Загрязнение воздуха твёрдыми взвешенными частицами: какой вред оно наносит здоровью. Факты и цифры ЕРБ ВОЗ/04/05.

- 
58. Баранов А.А., Цымлякова Л.М. Медико-экологические проблемы охраны здоровья матери и ребенка. // Педиатрия, 1991. – С. 5 – 7.
59. Смирнов В. Г. Комплексное эколого-токсикологическое регламентирование химических веществ в объектах окружающей среды. / Диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук. / Институт токсикологии МЗ РФ. Санкт-Петербург, 2003. – 227с.
60. Абилев С.К. Химические мутагены и генетическая токсикология // Природа. – 2012. – № 10. – С. 39 – 46.
61. Ауэрбах Ш. Проблемы мутагенеза. – М.: Мир, 1978. – 463 с.
62. Онищенко Г.Г. Борьба с инфекционными болезнями – приоритетная тема председательства Российской Федерации в «Группе восьми» в 2006 г. // Здравоохранение Российской Федерации. – 2007. – № 1. – С. 3 – 6.
63. Толмачева Е.Н., Назаренко Л.П., Корягина О.Ю., Пикаревская И.В. и др. Эффективность цитогенетической и молекулярной диагностики синдрома ломкой X-хромосомы у умственно отсталых больных Западно-Сибирского региона России // Медицинская генетика. – 2003. – Т. 2, № 5. – С. 212 – 217.
64. Диффузионный аэрозольный спектрометр модель 2702. Руководство по эксплуатации. 66334978.002.000РЭ ООО АэроНаноТех. – 2014.
65. Integrated Science Assessment for Particulate Matter. EPA/600/R-08/139F December 2009. – URL: [http://www.epa.gov/ncea/pdfs/partmatt/Dec2009/PM\\_ISA\\_full.pdf](http://www.epa.gov/ncea/pdfs/partmatt/Dec2009/PM_ISA_full.pdf) (дата обращения 28.10.2014).
66. Рамочный план организации мониторинга взвешенных веществ в атмосфере в странах Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии. ВОЗ, Европейский центр по окружающей среде и охране здоровья, Бонн. 2006 г.
67. Bus Rapid Transit Guide – complete guide.3<sup>rd</sup> edition – New York: ITDP, June 2007.
68. Шелмаков П.С., Шелмаков С.В. Укрупнённый проектировочный расчёт параметров гибридной силовой установки для системы быстрого городского автобусного транзита (BRT) // Международный студенческий научный вестник. – 2016. – № 3-1. – С. 57 – 61.

- 
69. Новичкова А. Компоненты «Водитель, нажми на тормоза». // Автоперевозчик №11 (98), 2008.
70. Болдырев Д.А. Повышение работоспособности и ресурса пары трения «тормозной диск – колодка». / Автомобильная промышленность» № 5, 2006. – с. 21 – 23.
71. Ерохина О.В. Санитарно-гигиенические функции зелёных насаждений. – URL: <http://textarchive.ru/c-2058452-p2.html> (дата обращения – 20.01.2017).
72. Шелмаков, С.В. Экотранспорт: учеб. пособие / Шелмаков С.В. – М.: МАДИ, 2018. – 199 с.