

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

**А.Н. КОВАЛЕНКО**

**Энергофизический мониторинг**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**

2005

УДК 532.3 – 620.6

А. Н. Коваленко. Энергофизический мониторинг. Учебное пособие. – СПб., ИТМО, 2005. - 88 с.

Учебное пособие включает материалы тем лекционных и практических занятий, которые предусмотрены программой курса «Энергофизический мониторинг» для студентов, обучающихся по специальности «Теплофизика».

В каждой из тем даны теоретические сведения и практические примеры решения задач управления процессами энергетических объектов с использованием различных методов оценки и контроля их взаимодействия с окружающей средой. Приведены ссылки на нормативные документы, определяющие допустимый уровень таких взаимодействий и их последствий.

В целях активизации работы студентов пособие снабжено перечнем контрольных вопросов и рекомендованной литературы для углубленного изучения изложенных тем. Кроме учебников и монографий известных ученых при подготовке пособия использованы материалы периодической печати с публикациями отечественных и зарубежных исследователей, в том числе авторские разработки.

Подготовлено на кафедре компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга.

Одобрено и рекомендовано к изданию на заседаниях кафедры КТФиЭМ 16 ноября 2004 года (протокол №3) и учебно-методической комиссии Инженерно-физического факультета 7 декабря 2004 года (протокол №10) для подготовки дипломированных специалистов по направлению 651100 – техническая физика и магистров по направлению 553100 – техническая физика.

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор Лощаков И.И., заведующий кафедрой Атомных и тепловых энергетических установок Санкт-Петербургского Государственного Политехнического Университета

доктор технических наук, профессор Цветков О.Б., заведующий кафедрой теоретических основ тепло- и хладотехники Санкт-Петербургского Государственного Университета низкотемпературных и пищевых технологий

© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2005

© Коваленко А.Н., 2005

## **История кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга**

Теплофизика является одним из важнейших разделов технической физики, задачей которой является математическое моделирование и экспериментальное исследование совместно протекающих физических процессов - тепловых, гидродинамических, диффузионных, оптических, электромагнитных. Необходимость решения таких теплофизических задач возникает практически во всех областях науки и техники: в тепловой и атомной энергетике, оптическом и электронном приборостроении, лазерных технологиях, физической химии и физике твердого тела, криогенной технике и технике высоких температур, метрологии, метеорологии, экологии, биологии и медицине, пищевой промышленности, жилищно-коммунальном хозяйстве, транспорте и других сферах человеческой и природной деятельности.

Начало теплофизической научной школы в нашем университете было положено организацией в 1938 году кафедры приборов теплосилового контроля, заведующим которой стал профессор, доктор технических наук Г.М.Кондратьев (1887-1958). В 1954 году вышла в свет его фундаментальная монография «Регулярный тепловой режим», ознаменовавшая создание новой (для мировой теории и практики) физической техники тепловых измерений, исследования теплофизических свойств веществ и параметров теплообмена. В это же время на кафедре началась разработка методов теплового расчета и обеспечения теплового режима радиоэлектронных устройств, а в дальнейшем и других приборов (оптических, оптико-электронных, гироскопических). Комплекс этих работ, выполненный под руководством Заслуженного деятеля науки и техники РФ, профессора, доктора технических наук Дульнева Г.Н., возглавлявшего кафедру с 1958 года по 1995 год, признается и в нашей стране, и за рубежом как новое научное направление в теплофизике.

В рамках этого подхода развиты работы по созданию методов и приборов для измерения температуры, тепловых потоков, теплофизических свойств веществ, исследования коэффициентов переноса в неоднородных средах, а также работы по созданию принципиально новых композиционных материалов – особо прочных, термостойких, теплоизоляционных и т.п. Сотрудники кафедры принимали участие в разработке нового поколения вычислительных машин, исследовании термо-оптических явлений в космических комплексах, в реализации международных программ космических исследований. Предложенные на кафедре методы были использованы при проектировании телевизионных камер космических аппаратов в проекте «ВЕГА», при создании лазерного устройства в проекте «ФОБОС». Возможности разработанных на кафедре методов математического моделирования тепловых процессов в сложных системах и технике теплофизического эксперимента были продемонстрированы при анализе процессов теплообмена в организме человека; при создании электрогенераторов, работа которых использует явления сверхпроводимости; при создании оригинальных образцов оборонной, медицинской и измерительной техники.

Многолетняя деятельность кафедры заложила фундамент приборостроительной теплофизики в нашей стране и привела к формированию научной и педагогической школы теплофизиков-приборостроителей. В числе представителей этой школы наряду с уже упомянутыми специалистами - доктором наук, профессором А.Н.Гордов, Е.С.Платунов, Н.А.Ярышев, Б.Н.Олейник, А.И.Лазарев, В.Н.Васильев, Ю.П.Заричняк, А.В.Шарков, другие ученые-теплофизики. Хотя кафедра за свою многолетнюю историю не раз изменяла свое название (так, с 1947 года она стала именоваться кафедрой тепловых и контрольно-измерительных приборов, с 1965 года – кафедрой

теплофизики, с 1991 года – кафедрой компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга), однако основными направлениями ее научной и педагогической деятельности оставались применение учения о теплообмене в физике и приборостроении. С 1995 года заведующим кафедрой является профессор, доктор технических наук А.В.Шарков.

В последние годы наряду с традиционными научными направлениями появился ряд новых направлений, связанных с энергофизическим и экологическим мониторингом, энергосберегающими технологиями в промышленности и городском хозяйстве, энергоучетом и энергоаудитом, биологией и медицинским теплофизическим приборостроением, изучением стохастических процессов и фрактальных структур. Например, следует отметить лазерную бормашину, разработанную в 1994-1996 годах совместно с кафедрой квантовой электроники и рядом зарубежных фирм, а также медицинские технологии и приборы для экстракции катаракты глаза (доцент В.А.Кораблев и заведующий лабораторией С.Л.Макаров). Особый интерес представляют экспериментальные и теоретические исследования тепловых характеристик тканей человека и их реакции на воздействие "лазерного скальпеля", проводимые доцентами В.И.Егоровым и С.В.Тихоновым. Результаты исследований детерминированно-хаотических процессов представлены в монографии профессора Г.Н.Дульнева "Введение в синергетику", опубликованной в 1998 году, и в докторской диссертации доцента Г.Н.Лукьянова, защищенной в декабре 1998 года. Ведутся исследования новых углеродных композитов класса нанотехнологий, армированных особо прочными волокнами с размерами алмазных зерен в миллиардные доли метра (профессор Ю.П.Заричняк, доцент Д.П.Волков). Разрабатываются методики и приборы для тепловых и температурных измерений в системах учета потребления энергии (доцент Н.В.Пилипенко).

К научной и педагогической работе на кафедре вместе со штатными сотрудниками активно привлекаются главные специалисты ведущих отраслевых организаций: в области энергетики и неравновесной термодинамики - лауреат государственной премии Правительства РФ, доктор технических наук, профессор А.Н.Коваленко (НПО ЦКТИ) и в области метрологии - доктор технических наук, профессор А.И.Походун (ВНИИМ им.Д.И.Менделеева).

На базе ведущихся на кафедре научных исследований осуществляется обучение молодых специалистов, первый выпуск которых по специальности «Теплофизика» состоялся в 1969 году. В 1998 году кафедра получила также право обучения по новому для нашего университета направлению – «Техническая физика». В июне 1998 года состоялся первый выпуск бакалавров, а в 2000 году – магистров. Особенностью обучения является фундаментальность образования с широким применением вычислительной техники. Студенты ведут научно-исследовательскую работу в лаборатории кафедры, тематика которой связана с перспективными направлениями науки и техники

На кафедре ведется подготовка научных кадров высшей квалификации в аспирантуре и докторантуре по специальностям 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника» и 05.11.01 «Приборы и методы измерения тепловых величин».

Сейчас коллектив кафедры продолжает развитие как ставших уже традиционными научных направлений и направлений подготовки специалистов, так и ведет поиск в новых областях науки и техники.

# 1. Назначение и основные задачи энергофизического мониторинга

Проблема создания и использования источников энергии является основным фактором, определяющим развитие материальной культуры и уровня жизни людей. В последние годы вследствие увеличения населения нашей планеты и его все возрастающей деятельности по переделке природы с целью приспособления к своим потребностям стали проявляться техногенные процессы глобального характера, то есть изменяющие природу в масштабах всего земного шара.

По данным Международного банка реконструкции и развития повсюду в мире уровень жизни людей пропорционален потреблению энергии в коммунально-бытовых и промышленных нуждах, составляющих сегодня в развитых странах до 10 (и более) кВт установленной мощности на каждого жителя. Это в сотню раз превышает физические (мускульные) возможности организма отдельного человека, а по суммарным затратам на обеспечение потребностей в энергии во всех ее формах для этих стран сопоставимо с половиной их бюджета. Сюда включается и так называемая бытовая энергия (освещение, отопление, связь), мощности установок которой обычно исчисляются ваттами и киловаттами, а также промышленная энергия (используемая в металлургии, химии, на транспорте, в машиностроении, строительстве, сельском хозяйстве), мощности единичных установок которой исчисляются десятками и сотнями мегаватт.

Такая роль энергетики объясняет, почему производство и потребление энергии в мире растет в геометрической прогрессии примерно с темпом роста населения (~1,5 - 2% в год). В абсолютном выражении это один из наиболее высоких показателей роста и всюду капиталовложения в энергетику является доминирующими.

Это же показывает, почему резко возрастают и отрицательные воздействия энергетики на окружающую среду. В чем заключаются эти отрицательные воздействия и каковы их основные факторы и последствие – на эти вопросы ответ можно найти, изучая процессы и устройства получения, преобразования и консервирования энергии.

К числу фундаментальных закономерностей, установленных наукой для этих процессов, относятся закон сохранения энергии и закон возрастания энтропии, известные соответственно как первое и второе начала термодинамики. Первый закон (сохранения энергии) определяет запасы энергетических ресурсов и их исчерпание, предсказывая неизбежность локальных и глобальных энергетических кризисов в снабжении энергией. Второй закон (возрастания энтропии) играет

большую роль в ограничении возможностей использования имеющихся энергетических ресурсов из-за необратимого перехода части потребляемой энергии в теплоту, в конечном итоге безвозвратно излучаемую в пространство при температуре окружающей среды. Оба эти закона определяют генеральные направления развития энергетики. Они утверждают невозможность получения энергии даром. Прежде всего, это означает невозможность создания “перпетуум-мобиле” - вечных двигателей, производящих работу из ничего (вечных двигателей 1-го рода) или использующих теплоту, рассеянную в окружающей среде (вечных двигателей 2-го рода). Кроме того, невозможно создание абсолютно чистых энергетических технологий, ничего не сбрасывающих в окружающую среду. Тем самым в единый узел связываются проблемы обеспечения высокого уровня цивилизованной жизни для постоянно растущего населения Земли, проблемы развития энергетики и экологические проблемы предотвращения загрязнения окружающей среды.

Современная энергетика, снабжающая потребителей электричеством и теплотой, базируется на фундаментальных и прикладных достижениях науки XIX и XX веков, прежде всего, в области термо - и электродинамики, гидроаэродинамики, механики, теплообмена, атомной физики, химии, материаловедения, синтезируя их в природно-технических комплексах, или системах централизованного и автономного (локального) энергообеспечения различного масштаба.

В целом на получение электроэнергии в России сейчас идет ~30-35% всех потребляемых энергоресурсов, остальные – на теплоту (~45-50%), транспорт (~15%) и прочее (~1%). Единая Энергетическая система России технологически объединяет посредством электрических сетей свыше 200 млн. кВт (~94%) установленной мощности тепловых (ТЭС), атомных (АЭС) и гидравлических (ГЭС) станций

Основными поставщиками энергетических ресурсов являются невозобновляемые источники:

–органическое топливо (уголь, нефть, природный газ), которое сжигается на тепловых электростанциях (ТЭС) и теплоэлектроцентралях (ТЭЦ), обеспечивая выработку на паро- и газотурбинных генераторах ~ 70% всей электроэнергии и около ~50% теплоты; производство последней дополняют отопительные и промышленные котельные;

–ядерное топливо, используемое на атомных электростанциях (АЭС), которые вырабатывают по тепловому паротурбинному циклу ~ 10% общего объема электроэнергии

Остальные ~20% электроэнергии вырабатывается на гидроэлектростанциях (ГЭС), использующих возобновляющиеся гидроресурсы главным образом больших рек.

Вклад в выработку энергии других возобновляемых источников (солнце, ветер, вода морей, океанов и малых рек) при их огромном энергетическом потенциале крайне незначителен (менее 1%).

Преимущественная роль установок ТЭС и АЭС с тепломеханическим преобразованием энергии по паротурбинному циклу обуславливается хорошими теплофизическими, экологическими и эксплуатационными качествами рабочего тела (воды и водяного пара), высокой плотностью энергетических потоков и относительно большим коэффициентом полезного действия. Последние показатели ограничиваются соответственно предельным значением вектора Умова-Пойнтинга (пропорциональным произведению создаваемой энеггонапряженности на скорость распространения ее носителей в данной среде) и термическим КПД для идеального цикла Карно (пропорциональным разности температур горячего и холодного источников теплоты). Эти ограничения, в конечном счете, определяют возможную предельную мощность единичных агрегатов, их габариты и массу, срок службы, стоимость сооружения и эффективность эксплуатации, оставляя пока неконкурентоспособными известные альтернативные методы и средства производства энергии больших мощностей. Так, согласно оценкам академика П.Л.Капицы, подобные ограничения вынуждают большую энергетику отказываться от ряда весьма экономичных процессов преобразования энергии с КПД на уровне 70 – 80%, но идущих с низкой скоростью при низкой плотности потока энергии порядка 100 - 200 Вт/м<sup>2</sup> (электростатические генераторы, биосистемы, топливные элементы), оставляя их в области малой и средней энергетики, и применять менее экономичные, но высокомошные тепловые турбоустановки. Средняя плотность потоков энергии в них достигает 1 - 10 Мвт/м<sup>2</sup> при цикловом КПД порядка 30 - 40%.

Ведущей тенденцией развития большой энергетики до последнего времени являлась концентрация энергопроизводства на крупных электростанциях путем интенсификации рабочих процессов, повышения начальных параметров рабочего тела, увеличения единичной мощности агрегатов и объединения самих электростанций в большие энергосистемы. Единичные мощности энергетических агрегатов достигли уровня 1000 – 1200 МВт, что сопоставимо с мощностью тропических ураганов. Удельное потребление условного топлива на крупных ТЭС составляет около 330 – 340 г / (Квт·ч), причем они на две трети используют более калорийное и самое чистое органическое топливо - газ. Мощности АЭС и ГЭС создают дешевую базисную электроэнергию. Эти тенденции обусловлены естественным стремлением к экономии суммарных затрат на капитальные вложения, топливо и эксплуатацию в условиях растущего производства электроэнергии и необходимости его постоянного соответствия колеблющемуся потреблению, связанному с биологическими и

социальными ритмами жизнедеятельности человека (суточными, недельными и сезонными).

Суммарное годовое потребление энергоресурсов в мире составляет около ~20 млрд. тонн условного топлива (то есть топлива с усредненными показателями теплотворной способности), что соответствует примерно ~ 4,5 т.у.т./(год чел). Наиболее существенное влияние на структуру потребляемых ресурсов оказывают объем разведанных запасов топлива и экономическая целесообразность его извлечения и переработки до кондиционного вида. Оценки разведанных запасов ископаемых энергетических ресурсов по разным данным существенно расходятся (табл.1), но угроза их исчерпания становится все более реальной (по приведенным оценкам за 100-200 лет). Это вынуждает искать новые энергетические источники. Наряду с уже упомянутыми возобновляемыми источниками (солнце, ветер, вода малых рек) рассматриваются возможности использования термоядерной энергии и водородных топливных элементов (табл.2).

Таблица. 1.

Разведанные запасы ископаемого топлива, млрд.т.у.т.

<i>Энергоресурсы</i>	<i>Извлекаемые запасы</i>	<i>Геологические запасы</i>
Уголь	550-700	6000-10000
Нефть	85-100	850-1000
Природный газ	55-75	250-380
Ядерное топливо (из расчета 1 кг $^{238}\text{U} = 2,4 \cdot 10^6$ т.у.т.)	$(5 - 8) \cdot 10^6$	$(2 - 3) \cdot 10^{12}$

Таблица. 2.

Ориентировочные ресурсы энергии на Земле, МВт·ч

<i>Энергоресурсы</i>	<i>Количество</i>
<b><i>Невозобновляемые источники</i></b>	
Термоядерная энергия синтеза	$100\ 000 \cdot 10^{12}$
Ядерная энергия деления	$547 \cdot 10^{12}$
Химическая энергия ископаемых органических веществ	$55 \cdot 10^{12}$
Геотермальная энергия (внутреннее тепло Земли)	$0,134 \cdot 10^{12}$
<b><i>Ежегодно возобновляемые источники</i></b>	
Энергия солнечных лучей на поверхности Земли	$580 \cdot 10^{12}$
Энергия морских приливов	$70 \cdot 10^{12}$
Энергия ветра	$1,7 \cdot 10^{12}$
Энергия рек	$0,18 \cdot 10^{12}$

Все возрастающее потребление невозобновляемых энергетических ресурсов, вовлечение в более значительных масштабах новых источников стало важнейшим фактором взаимодействия энергетики с окружающей средой. При этом проявляется и обратная связь – воздействие окружающей среды на энергетику, заключающееся в том, что обеспеченность энергоресурсами определяет доминирующее направления развития энергетики и энергетического машиностроения в мире вообще и в отдельных странах и регионах в частности.

Для прослеживания этих взаимодействий в качественном и в количественном отношении предназначен энергетический мониторинг. Он представляет собой: информационно-техническую систему методов и средств наблюдения, оценки и прогнозирования состояние взаимодействий окружающей среды и энергетических объектов с целью предотвращения недопустимых загрязнения окружающей среды, природных бедствий, аварий и катастроф, связанных с разработкой и эксплуатацией энергетических установок.

**Основные задачи энергофизического мониторинга** заключаются в наиболее раннем выявлении, прогнозировании и предупреждении (предотвращении) развития дефектов и отклонений параметров энергетического оборудования, приводящих к опасному или недопустимому загрязнению окружающей среды, снижению технико-экономических показателей и авариям самого оборудования.

В зависимости от сложности процессов может осуществляться следующая глубина решения этих задач:

- обнаружение дефектов (отклонений);
- установление типа, вида, места и времени их появления;
- выявление причин появления дефектов;
- прогнозирование развития дефектов и их последствий, включая оценку возможного ущерба;
- разработка рекомендаций по предсказанию (предотвращению) возникновения и развития дефектов.

Одной из важнейших функций системы энергофизического мониторинга является также сбор и сохранение в течение длительного времени наиболее важной и ценной информации о состоянии окружающей среды и функционировании энергетических объектов в нормальных и аварийных ситуациях, что создает предпосылки для дальнейшего совершенствования как самого оборудования, так и методов его проектирования, эксплуатации и диагностики.

В общем случае решение поставленных задач предполагает выполнение некоторой последовательности операций измерения, контроля обработки, управления, отображения и архивизации информации, которые предусматриваются алгоритмом мониторинга в соответствии с принятыми диагностическими моделями. Модель представляет собой математическое

описание объекта исследований (энергоустановки и окружающей среды) в исправном (нормальном) и неисправном (аварийном) состояниях в виде функциональных зависимостей между возможными воздействиями на объект и его реакцией на эти воздействия.

Применяемые при этом методы и средства зависят от контролепригодности объекта, характера и условий его эксплуатации (включая собственно и саму систему мониторинга), физической природы неисправностей и сопровождающих их признаков, источника и природы диагностического сигнала, принятых диагностических моделей, степени участия человека в диагностировании и управлении работой оборудования.

Основной для рассмотрения воздействий энергетики на окружающую среду и построения диагностических моделей является системный анализ процессов всего технологического цикла преобразования энергии (от добычи топлива до линий передачи электричества и теплоты конечному потребителю) во взаимодействии со всеми компонентами окружающей среды (атмосферой, гидросферой, литосферой и биосферой).

К числу специфических особенностей взаимодействия энергетических объектов с окружающей средой в этом плане относятся следующие.

Полный технологический цикл любого энергопроизводства включает следующие стадии:

- извлечение и концентрация энергетического природного ресурса до кондиции, необходимой для энергетической установки;
- транспортирование кондиционного энергетического ресурса от источника до энергетической установки;
- одно (или много) ступенчатое преобразование его в заданный вид потребляемой энергии;
- передача и распределение полезного вида энергии потребителю;
- потребление энергии.

Каждая из этих стадий имеет развитые связи с окружающей средой в виде обмена энергией и веществом. Эти факторы взаимодействия являются общими для всех видов источников естественных ресурсов и типов энергоустановок, однако для каждого из них критерии взаимодействия оказываются различными, что определяется особенностями основного технологического процесса преобразования исходного вида энергии в потребляемый вид.

Ниже с этих позиций рассмотрены основные особенности наиболее важных типов стационарных энергоустановок большой мощности ТЭС, АЭС, ГЭС и особенности происходящих при этом процессов преобразования энергии и взаимодействия с окружающей средой.

## 2. Влияние вредных выбросов электростанций на окружающую среду (биосферу)

### 2.1. Общая характеристика выбросов тепловых электростанций

Влияние энергетических установок тепловых электростанций на окружающую среду определяется выбросами в атмосферу, гидросферу и литосферу продуктов сгорания, неиспользуемой теплоты и загрязненной воды.

Основными компонентами материального взаимодействия ТЭС с атмосферой являются продукты сгорания органического топлива в воздушной среде. В процессе сгорания составляющие органического топлива (С – углерод, Н – водород, О – кислород, N – азот, S – сера, H<sub>2</sub>O – влага, минеральная часть – Si и др.) превращаются в дымовые газы, содержащие при полном сгорании CO<sub>2</sub> – углекислый газ, H<sub>2</sub>O – водяные пары, N – азот, NO – окись, NO<sub>2</sub> – двуокись и NO<sub>x</sub> – другие оксиды азота, SO – серный и SO<sub>2</sub> – сернистый ангидрид, а при неполном сгорании еще CO – угарный газ, CH<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> и другие углеводороды, а также канцерогенные вещества золы и шлака (минеральные части топлива, тяжелые металлы, редкоземельные элементы, фтористые соединения и прочее).

Большое влияние на объем выбросов продуктов сгорания топлива оказывает КПД теплового цикла станции, поскольку им при заданной мощности выработки электроэнергии напрямую определяется объем сжигаемого топлива

$$\eta_t^{\max} = \frac{W^{\max}}{Q_1} \leq 1 - \frac{T_2}{T_1}, \quad W^{\max} = Q_1 - Q_2 = \eta_t^{\max} Q_1 \quad (1)$$

Здесь  $\eta_t$  – термический коэффициент полезного действия теплового цикла;

$W$  – получаемая в цикле работа (полезная энергия);

$T_1, T_2$  – температуры подвода и отвода теплоты к рабочему телу;

$Q_1, Q_2$  – количество подводимой и отводимой тепловой энергии при этих температурах;

$Q_1 = B * Q_P^H$ , где  $B$  – количество (расход) топлива;

$Q_P^H$  – теплота сгорания (низшая теплотворная способность) топлива.

Содержание различных компонентов в атмосферных выбросах тепловых электростанций, кроме того, в значительной мере зависит от

вида сжигаемого топлива и температуры его горения, которые определяют скорости протекания реакций окисления и возможности управления ими (табл. 3).

Таблица 3.

Усреднение показателей загрязнения атмосферы тепловыми электростанциями (г/КВт·ч выработанной электроэнергии) по данным Международного института системных исследований

Компоненты загрязнения	Виды топлива			
	Каменный уголь	Бурый уголь	Мазут	Природный газ
SO <sub>2</sub>	6,0	7,7	7,4	0,002
Твердые частицы	1,4	2,7	0,7	-
NO <sub>x</sub>	21,0	3,5	2,5	1,9
Фтористые соединения	0,05	0,11	0,004	-

Кроме воздействий на атмосферу, гидросферу, литосферу указанные выбросы ТЭС оказывают вредное воздействие также на весь комплекс живой природы, названный академиком В.И.Вернадским биосферой.

Биосфера включает в себя прилегающие к поверхности земли слой воздуха (атмосферы), верхний слой почвы (литосферы), верхние и донные слои водных объемов (гидросферы) со всем растительным и животным миром, который наиболее обширен на границах раздела литосферы, атмосферы и гидросферы и который принято называть флорой и фауной.

Конечно, в биосферу попадают не только выбросы тепловых электростанций, но и других промышленных (химических, металлургических и т.д.) предприятий, а также моторизованного транспорта, тоже вызываемые деятельностью человека. Эти антропогенные выбросы по мощности вполне сопоставимы с природными выбросами, обусловленными лесными пожарами, деятельностью вулканов и прочее (табл.4).

Таблица 4

Сопоставление мощности природных и антропогенных выбросов

Компонент загрязнения	Природные выбросы т/год	Индустриальные выбросы т/год
CO <sub>2</sub>	$7 \cdot 10^{10}$	$1,5 \cdot 10^{10}$
CO	-	$2 \cdot 10^8$
SO <sub>2</sub>	$1,4 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$
NO <sub>x</sub>	$1,4 \cdot 10^9$	$6,5 \cdot 10^7$
Пыль (твердые частицы)	$(0,7 - 1,2) \cdot 10^9$	$(0,1 - 0,2) \cdot 10^9$

Как видно, в некоторых случаях естественные загрязнения даже выше промышленных, но все же последние имеют большее значение, так как создаются в районах с высокой концентрацией населения и, кроме того, в удельном выражении (на единицу площади поверхности Земли) они, как правило, превосходят природные.

Распределение атмосферных выбросов загрязняющих веществ по различным отраслям промышленности показано в табл. 5.

Таблица 5

Распределение атмосферных выбросов по отраслям промышленности

<i>Отрасль промышленности</i>	<i>Поступление в атмосферу, %</i>
Тепловые электростанции	27,0
Черная металлургия	24,3
Цветная металлургия	10,5
Нефтедобыча и нефтехимия	15,5
Автомобильный транспорт	13,3
Производство строительных материалов	8,1
Химическая промышленность	1,3

Как видно, выбросы ТЭС хотя являются одними из самых значительных, но все же составляют менее третьей части всех промышленных загрязнений.

Воздействие этих выбросов может рассматриваться в двух аспектах:

локальное воздействие - для того или иного участка земли за тот или иной промежуток времени;

глобальное воздействие - общее воздействие в целом с учетом нарастающих темпов во времени.

**Локальное воздействие выбросов** в атмосферу применительно к типовым параметрам ТЭС (мощность выбросов, высота дымовой трубы) оценивается в округе диаметром участка в 20-50 км на краткосрочных промежутках времени и даже при разовых поступлениях загрязнений.

**Глобальное воздействие выбросов** оценивается в масштабах крупных регионов, отдельных стран и планеты в целом на длительных исторических периодах.

Особенности этих воздействий зависят от того, в какую именно сферу поступают вредные выбросы и как все они взаимодействуют друг с другом.

Так, токсичные вещества, содержащиеся в дымовых газах, воздействуют на растение, животный мир и людей, а также на строительные конструкции, здания и сооружения.

Наиболее чувствительными к содержанию SO<sub>2</sub> являются растения. Токсичное воздействие SO<sub>2</sub> связано с повреждением поверхности листьев

или хвои из-за разрушения содержащегося в них хлорофилла. Лиственные растения, ежегодно сбрасывающие листву, менее подвержены действию  $\text{SO}_2$ , чем хвойные, для которых происходит нарушение фотосинтеза и дыхания хвои при содержании  $\text{SO}_2$  в воздухе от 0,23 до 0,32 мг/м<sup>3</sup> и более, вызывая усыхание сосны за 2-3 года. При содержании сернистого газа в воздухе от 0,08 до 0,23 мг/м<sup>3</sup> происходит уменьшение интенсивности фотосинтеза без уменьшения интенсивности дыхания хвои, что приводит к медленному усыханию хвойных деревьев. Лиственные деревья начинают ощущать изменения в ассимиляции, то есть в усвоении и использовании организмом необходимых для его развития веществ, при концентрации  $\text{SO}_2$  более 0,5 -1 мг/ м<sup>3</sup>.

Неблагоприятное влияние атмосферных загрязнений на людей оказывают прежде всего взвешенные вещества (аэрозоли и пыль) и двуокись серы.

Первым возможным отрицательным последствием атмосферных изменений на людей является так называемые токсические туманы при резком возрастании концентрации загрязнений в атмосфере и неблагоприятных метеорологических условиях.

Второе сильное проявление связано с хроническими специфическими заболеваниями. Среди них существенное значение приобретает атеросклероз и связанные с ним коронарные и дегенеративные заболеваний сердца, хронический бронхит, эмфизема, бронхиальная астма и другие.

При этом во многих исследованиях отмечают так называемый «городской градиент» при относительно низких показателях заболеваемости сельского населения. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) установлена следующая ориентировочная взаимосвязь между уровнем загрязнений воздуха и их воздействия на людей (табл.6).

Таблица 6

## Влияние воздействия атмосферных загрязнений на людей

<i>Загрязнение</i>	<i>Повышенная смертность и обращаемость в больницу</i>	<i>Ухудшение состояния пациентов с легочными заболеваниями</i>	<i>Ухудшение дыхания</i>	<i>Изменение видимости и дискомфорт</i>
$\text{SO}_2$ , мг/м <sup>3</sup>	0,5	0,5-0,25	0,1	0,08
Взвешенные частицы, мг/м <sup>3</sup>	0,5	0,25	0,1	0,08
<i>Характер воздействия</i>	в течение суток		среднегодовые	

Вторым по влиянию загрязнением воздуха являются оксиды азота. Являясь токсичными для человека, они обладают резко выраженным раздражающим действием, особенно на слизистую оболочку глаза. Оксиды азота плохо растворимы в жидкости, в связи с чем способны глубоко проникать в легкие, вызывая повреждение альвеолярного эпителия и бронхов.

Высокая биологическая активность  $\text{NO}_x$  приводит к снижению дыхательной функции, вызывая респираторные заболевания с изменениями состава периферической крови, (появление метагемоглобина),  $\text{NO}_2$  в концентрации 4-6  $\text{мг/м}^3$  вызывает острое повреждение растений. Длительное воздействие  $\text{NO}_2$  при концентрации ниже 2  $\text{мг/м}^3$  приводит к т.н. хлорозу растений. Более низкие концентрации не вызывая видимого вреда, резко замедляют и снижают рост.

Окислы азота, поглощая естественную радиацию в ультрафиолетовой и видимой части солнечного спектра, снижают прозрачность атмосферы и способствуют образованию фотохимического тумана – «смога».

Энергетические объекты оказывают и другие материальные воздействия на окружающую среду. Так, повышенное содержание серы в исходном топливе вызывает усиленную коррозию поверхностей нагрева котлов, постепенное разрушение строительных конструкций и неживых природных образований.

Наряду с разнообразными процессами материального взаимодействия с окружающей средой, работа энергетических установок неизбежно связана с энергетическими воздействиями на нее, которые будут рассмотрены ниже.

## **2.2. Превращение загрязнений от выбросов ТЭС в атмосфере**

Атмосферные загрязнения и природные примеси подвергаются сложным процессам превращений, взаимодействия, вымывания и др. Эти процессы различны для взвешенных твердых частиц и газообразных примесей. Время нахождения («жизни») взвешенных частиц в атмосфере зависит от их физико-химических свойств, метеорологических параметров и некоторых других факторов, в первую очередь от высоты выброса частиц в атмосферу и их размера.

*Основными процессами удаления твердых частиц и аэрозолей являются:*

- осаждение частиц под действием силы тяжести;
- осаждение на растениях,
- включение их в элементы осадков путем конденсации, вымывания дождем.

Процесс осаждения частиц является одним из основных воздействующих на срок их «жизни». Однако это относится лишь к частицам с радиусом более 1 мкм, процесс осаждения которых подчиняется закону Стокса:

$$F = \eta UR(1 + C Re), \quad (2)$$

где  $F$  – сила сопротивления,  $\eta$  – динамическая вязкость,  $U$  – скорость частицы,  $R$  – характерный радиус,  $Re$  – число Рейнольдса.

Частицам размером менее 0,1 мкм в диаметре свойственно броуновское движение. У частиц размером 0,1 - 1 мкм скорость осаждения ничтожна по сравнению с перемешиванием в воздухе.

Примерная скорость осаждения частиц в неподвижном воздухе в зависимости от их размера приведена ниже в табл.7.

Таблица 7.

Примерная скорость осаждения частиц в неподвижном воздухе

<i>Радиус частицы, мкм</i>	<i>Скорость осаждения, см/с</i>
0,1	$8 \cdot 10^{-6}$
1,0	$4 \cdot 10^{-3}$
10,0	0,3
100,0	25,0

Наличие ветра может существенно изменить скорость осаждения частиц. С размером частиц связана также и их способность коагулировать, что оказывает влияние на срок их жизни в атмосфере.

**Время «жизни» и превращения газообразных загрязнений** атмосферы является малоизученным.

Так, срок «жизни»  $SO_2$  по разным данным варьируется от 1,5 суток до 10 дней. В течение этого времени  $SO_2$  постепенно окисляется в триоксид серы, которая взаимодействует с влагой воздуха, образует серную кислоту. На скорость процесса окисления влияет солнечный свет и мельчайшие частицы пыли, каталитически ускоряющие процесс окисления. Наиболее активно процесс превращения  $SO_2$  в  $SO_3$  идет при наличии излучения с длиной волны 220-250 нм. На процесс окисления влияет также влажность воздуха. Так, установлено, что если содержание аэрозоля серной кислоты  $H_2SO_4$  от  $SO_2$  в воздухе при влажности до 60% составляет в среднем 7-8%, то при влажности свыше 61% оно возрастает до 31 %.

Большинство реакций газообразных загрязнений в атмосфере связано с термо- или фотоокислением.

В верхних слоях атмосферы на уровне более 30 км от земной поверхности, где фотохимические реакции протекают при участии солнечного излучения с длиной волны короче 200 нм (ультрафиолет), происходит полный распад как органических, так и неорганических веществ, попавших из биосферы. Сложные молекулы распадаются, возвращаясь в приземной слой в виде  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  и др.

В приземном слое, где ультрафиолетовый участок спектра ограничен и начинается с 290 нм, первичные фотохимические реакции могут происходить с веществами, характеризующимися спектральными полосами поглощения начиная с указанной длины волны.

Установлено, что реакция фотодиссоциации двуокиси азота на  $\text{NO}$  и  $\text{O}$ , при которой поглощается излучение ультрафиолетовой области солнечного спектра, играет преобладающую роль в атмосферных фотохимических процессах. Энергия, необходимая для разрыва связи между азотом и кислородом составляет около 300 КДж/моль, что соответствует энергии фотона с длиной волны 396 нм.

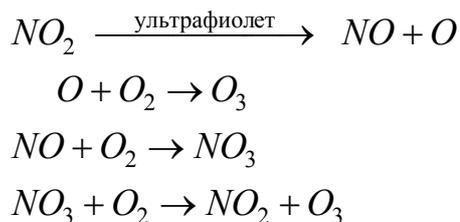
Реакция диссоциации  $\text{NO}_2$  дает толчок к множеству вторичных реакций, появлению свободных радикалов, образованиям других соединений азота, полимеризации. Кроме того, на протекание этих реакций оказывает влияние окисление углеводородов, в ходе которого образуются вещества с карбонильной группой (альдегиды, кетоны). Конечными продуктами фотохимического разложения являются окись и двуокись углерода, а также органические аэрозоли.

Совместное окисление углеводородов и окислов азота приводит к образованию продуктов, которые в результате дальнейших реакций образуют пероксиацилнитраты (ПАН) обладающие сильным токсическим действием. Они обнаруживаются в городском воздухе во время токсических туманов.

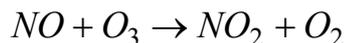
Первичные фотохимические реакции разложения  $\text{NO}_2$  и  $\text{O}_3$  (озона) обладают высокой скоростью протекания, в то время как фотохимические реакции с окислами азота  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$  могут протекать как с большой скоростью, так и довольно медленно, в результате чего образуются озон, альдегиды, вещества группы ПАН, карбонильные соединения, аэрозоли и пр.

Высокой скоростью образования обладают и вторичные фотохимические реакции взаимодействия молекулярного кислорода  $\text{O}_2$  и окиси  $\text{NO}$  с атомарным кислородом  $\text{O}$ , в результате чего образуются озон  $\text{O}_3$  и двуокись  $\text{NO}_2$ , а также взаимодействие  $\text{NO}_2$  с  $\text{O}_3$ , в результате чего образуются нитраты.

Фотохимические реакции с двуокисью азота протекают по следующим стадиям:



В результате этих реакций происходит непрерывное образование озона, который в свою очередь, взаимодействуя с окисью азота NO, образует двуокись азота



В результате реакций количество NO<sub>2</sub> в продуктах сгорания ТЭС увеличивается по мере движения дымового факела в атмосфере до 60-70% в зоне максимальной концентрации, тогда как на выходе из дымовых труб NO<sub>2</sub> составляет 10-15% всех окислов азота, а остальные 85-90% - в основном NO.

Необходимо подчеркнуть, что данный факт приводит к усилению отрицательного воздействия выбросов, так как двуокись азота NO<sub>2</sub> примерно в 3-3,5 раза более токсична, чем окись NO.

В настоящее время признано, что основной причиной фотохимических превращений в приземном слое атмосферы городов является высокая степень загрязнения воздуха органическими веществами (преимущественно нефтяного происхождения) и окислами NO<sub>x</sub>, образующимися во время высокотемпературного сгорания органического топлива.

Суммарная концентрация окислителей, так называемых оксидантов, образующихся в атмосферном воздухе в результате фотохимических реакций, в ряде случаев может быть использована как гигиенический показатель интенсивности протекания этих реакций.

Условиями, способствующими образованию фотохимического тумана при высоком уровне загрязнения атмосферы реактивными органическими соединениями и окислами азота, являются обилие солнечного света малая скорость ветра.

Концентрация оксидантов подвержена большим колебаниям, но подчиняется определенным закономерностям. Как правило, вслед за низкими ночными концентрациями наблюдается их значительное увеличение. Пик наступает в полдень и держится в течении всего времени солнечного сияния, а затем происходит уменьшение концентрации с заходом солнца.

Таким образом, вредные выбросы ТЭС – пыли, окислов серы и азота, оказывают локальное воздействие на биосферу района расположения ТЭС, подвергаясь различным превращениям и взаимодействиям, а также

осаждаются, вымываются атмосферными осадками, поступая в почву и водоемы.

При рассмотрении глобального влияния загрязнений от ТЭС прежде всего надо иметь в виду, что выбрасываемые в результате деятельности человека вещества не являются чем-то инородным для окружающей среды, и участвуют в круговороте веществ между атмосферой, литосферой и гидросферой.

Так, в атмосфере Земли около 2000 млрд. т. углерода в форме  $\text{CO}_2$ , причем 135 млрд. т. находится в состоянии непрерывного круговорота между атмосферой, сушей и морем. Общее выделение  $\text{CO}_2$  от сжигания всех топлив планеты на уровне дыхания, составляющие в настоящее время по углероду 15 млрд. т /год имеет существенное, но не основное значение в общем природном кругообороте углерода.

Количество пыли, поступающей ежегодно в атмосферу за счет естественных процессов, составляет около 1000 млн. т./год, а за счет антропогенных - около 100 - 200 млн. т./год (см. табл. 4).

Также за счет естественных процессов в атмосферу поступает около 1000 млн. т. азота в виде соединений  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{NH}_3$ , а за счет антропогенных процессов - около 60-70 млн. т.

Только по сере естественное и антропогенное поступления близки между собой и находятся на уровне 100-150 млн. тонн.

#### ***Накопление вредных выбросов в атмосфере.***

В свободной атмосфере практически не наблюдается накопления пыли, окислов серы и азота в ощутимых размерах. Самые точные приборы позволяют обнаружить концентрацию серы в воздухе в отдалении от источника в сотни раз меньше, то есть на уровне природных, так как время нахождения в атмосфере большинства загрязнений не превышает нескольких суток.

Однако, за последнее столетие наблюдается возрастание содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере от 0,029 до 0,033%, что пока не оказывает заметного влияния на людей и животных, но при дальнейшем росте может определенным образом изменить климат планеты, вызывая его потепление - так называемый «парниковый эффект». Последующее интенсивное таяние полярных льдов наряду с затоплением прибрежных низменностей может привести к изменению направлений теплых океанских течений, прежде всего Гольфстрима, вызвав затем резкое похолодание.

На существование животного мира решающее значение оказывает кислород воздуха и воды  $\text{O}_2$ . В процессе дыхания животных и горения уменьшается его концентрация в атмосфере, которая затем восстанавливается растениями за счет образования биомассы при поглощении  $\text{CO}_2$ .

Антропогенные процессы, связанные с быстрым количественным ростом процессов сжигания органического топлива, в принципе могут

способствовать снижению концентрации  $O_2$  и уменьшению зеленых массивов на Земле.

Однако ощутимых изменений концентрации  $O_2$  в атмосфере практически не наблюдается. Более того, предполагается, что даже снижение концентрации  $O_2$  на несколько процентов не приведет к каким-либо вредным последствиям для биосферы.

Таким образом, в настоящее время наиболее актуальным является решение локальных вопросов обеспечения допустимых концентраций вредных выбросов в районах расположения ТЭС, хотя вопросы ограничения вредных выбросов в масштабах планеты в целом являются весьма значимыми, особенно в отношении парниковых газов. Меры по ограничению их выбросов в виде оговоренных квот для каждой страны установлены международным соглашением, так называемым Киотским протоколом, который ратифицирован Россией в 2004 году.

### **2.3. Нормирование загрязнений в атмосфере**

Нормирование допустимого количества выбросов в атмосферу производится на основе введенных в законодательном порядке стандартов на качество воздуха путем нормирования допустимого содержания или концентрации различных веществ.

За стандарт, или критерий качества воздуха в России, как в большинстве промышленно развитых стран за рубежом приняты предельно допустимые концентрации (ПДК) для различных токсичных веществ.

Предельно допустимые концентрации (ПДК) атмосферных загрязнений устанавливаются исходя из уровня защитно-приспособительных реакций и заболеваемости наиболее ранимых групп населения в двух показателях:

- как максимально - разовые (за 20 мин.);
- среднесуточные (за 24 часа).

Среднесуточные ПДК являются основными критериями по предотвращению неблагоприятных влияний при длительных воздействиях. Максимально разовые ПДК в дополнении к среднесуточным устанавливаются для веществ, обладающих запахом или раздражающим действием.

Ниже в табл. 8 приведены значения ПДК типичных для выбросов ТЭС вредных веществ, действующие в настоящее время в нашей стране. Общий список веществ с нормируемыми ПДК, содержание которых должно контролироваться в атмосфере в связи с возможностью их выбросов предприятиями других отраслей промышленности, насчитывает более 60-ти наименований.

Таблица 8.

Значения предельно допустимых концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе населенных мест

Загрязняющее вещество	ПДК, мг/м <sup>3</sup>	
	Максимально разовые	Среднесуточные
Пыль нетоксичная	0,5	0,15
Сернистый ангидрид	0,5	0,05
Углерода окись	3,0	1,00
Азота двуокись	0,085	0,085
Сажа (копоть)	0,15	0,05
Сероводород	0,008	0,008
Бенз(α)пирен	-	0,1мкг/100мм3

Расчеты по отбираемым пробам воздуха (в течение 20 мин и среднесуточные) ведутся отдельно по каждому вредному веществу, и его концентрация не должна превышать приведенные в таблице значений.

В случае совместного действия нескольких загрязняющих веществ введено дополнительное требование о необходимости суммирования воздействий окислов серы и азота, которое выражается условием:

$$\frac{C_{SO_2}}{ПДК_{SO_2}} + \frac{C_{NO_2}}{ПДК_{NO_2}} \leq 1 \quad (3).$$

Это ужесточило требования, предъявляемые к промышленным предприятиям, и в частности, к тепловым электростанциям, по охране окружающей среды.

## 2.4. Радиационное загрязнение и нормы радиационной безопасности АЭС

Атомная энергия, освобождающаяся в ядерных реакторах АЭС в виде теплоты в процессах торможения движущихся с большими скоростями продуктов деления ядер некоторых элементов, при цепных реакциях сопровождается радиоактивными излучениями  $\alpha$  и  $\beta$  - частиц,  $n$  - нейтронов,  $\gamma$  - квантов. Эти излучения могут нарушать нормальную жизнедеятельность живых организмов, и поэтому вызывают необходимость принятия специальных мер защиты и безопасности.

Чтобы уменьшить риск, связанный с облучением обслуживающего персонала и населения в районах размещений АЭС и других атомных

энергетических установок, где ведутся работы с радиоактивными веществами, на пути возможного распространения радиоактивных веществ воздвигаются специальные защитные барьеры, предусматриваются технологические системы для поглощения и последующего удаления отходов и устанавливается санитарно-защитная зона в 25 – 50 км.

В пределах этой зоны запрещается размещать жилые здания, детские учреждения и подсобные сооружения, не относящиеся к данному предприятию, и на территории санитарно-защитной зоны ведется систематический контроль радиационной обстановки.

Радиационный контроль ведется как за объектами окружающей среды, так и за радиоактивными отходами АЭС – твердыми, жидкими и газообразными.

Твердыми отходами являются детали загрязненного радиоактивными веществами демонтированного оборудования, отработанные фильтры очистки, спецодежда, мусор и т.п., которые захораниваются специальным образом.

Жидкими отходами АЭС являются кубовый остаток, образующийся при выпаривании высокоминерализованных трапных вод и дезактивационных растворов, отработанных ионообменных смол из систем химического обессоливания питательной воды теплоносителя и др., которые помещаются в специальные хранилища на территории АЭС.

Газообразные отходы представляют образующиеся в реакциях радиоактивного превращения изотопы криптона, ксенона, радона, а также их смеси с воздушными потоками наведенной радиоактивности, которые тоже должны подвергаться специальным мерам очистки. На атомных электростанциях имеется три источника загрязнения воздуха радиоактивными веществами. Первый источник загрязнения - деление ядер горючего материала в твердой и газообразной форме. Наибольшую вероятность попадания в воздух имеют газообразные осколки деления - инертные газы (ксенон, криптон и др.), а также радиоактивный йод и др. Второй источник загрязнения - воздействие нейтронных потоков на теплоноситель первого контура и окружающий воздух. Наибольшей активации в составе воздуха подвержен инертный газ - аргон-40, в результате чего может образовываться его радиоактивный изотоп. Наведенную активность может получить также находящаяся в воздухе пыль. Третьим источником загрязнения воздуха может быть нарушение оболочек топливных тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) или наличие неплотностей во многих вспомогательных сооружениях и элементах (бассейнах выдержки, системах продувки реактора, баках сброса радиоактивных протечек и др.), в которых выделяются радиоактивные инертные газы.

Главной нормируемой величиной радиационного контроля на АЭС является предельно-допустимая доза облучения человека за длительный

период времени, а не предельно-допустимая разовая концентрация вредных веществ в воздухе и воде, как это установлено для ТЭС.

Изменения, происходящие в облученном живом объекте под воздействием различного рода излучения, зависят от величины поглощенной энергии.

Единицей поглощенной дозы любого ионизирующего излучения является Грей [*Гй*], равный 1 Дж поглощенной энергии на 1 кг массы тела. До последнего времени также принималась специальная единица поглощенной дозы - рад, при этом  $1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гй}$ .

Для оценки радиационной опасности и хронического (постоянного) облучения излучением произвольного состава принята эквивалентная доза смешанного ионизирующего излучения *H*, учитывающая коэффициент качества неблагоприятных биологических последствий облучения человека *q*.

Эквивалентная доза в системе единиц СИ измеряется в зиверстах [*ЗВ*] или в ранее используемых единицах - бэрах (биологических эквивалентах рентгена). При этом  $1 \text{ ЗВ} = 1 \text{ Гй}/q$

Значение коэффициента качества неблагоприятных последствий облучения человека в *q* зависимости от вида излучения приведено табл.9.

Таблица 9.

Значение коэффициента качества неблагоприятных последствий облучения

<i>Вид излучения</i>	<i>q</i>
Рентгеновское и $\gamma$ - излучение.	1
Электроны и позитроны, $\beta$ - излучение	1
Протоны с энергией меньше 10 Мэв	10
Нейтроны с энергией меньше 20 Мэв	3
Нейтроны с энергией 0,1-10 Мэв	10
$\alpha$ - излучение с энергией меньше 10 Мэв	20
Тяжелые ядра отдачи	20

Эквивалентная доза облучения, определяемая как произведение поглощенной дозы *D* на средний коэффициент поглощения *q* в данной точке ткани:

$$H = D \cdot \bar{q} = \sum D_i q_i, \quad (4)$$

где индексы *i* относятся к компонентам облучения с различным качеством излучения.

По допустимым основным дозовым пределам устанавливаются следующие категории облучаемых лиц:

**Категория А** - персонал, который непосредственно работает с источниками ионизирующего излучений;

**Категория Б** - ограниченная часть населения, которая не работает непосредственно с источниками излучения, но может подвергнуться облучению;

**Категория В** - население района, области, края, республики, страны.

В порядке убывания радиочувствительности устанавливаются три группы критических органов человека:

*I группа* - все тело, гонады железы внутренней секреции и красный костный мозг;

*II группа* - мышцы, щитовидная железа, жировая ткань, печень, почки, селезенка, желудочно-кишечный тракт, легкие, хрусталики глаза и др. органы, за исключением тех, которые относятся к *I* и *III* группам;

*III группа* - кожный покров, костная ткань, кисти, предплечья, лодыжки и стопы.

Согласно нормам радиационной безопасности в качестве основных дозовых пределов в зависимости от группы критических органов для лиц категории *A* устанавливается предельно-допустимая доза за год (*ПДД*), а для лиц категории *B* и *B* - предел дозы в год (*ПД*), согласно данным табл.10

Таблица 10.

Дозовые пределы внешнего и внутреннего облучения, бэр за год

Доза	Группы критических органов		
	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>
Предельно-допустимая доза для лиц категории <i>A</i>	5	15	30
Предел дозы для лиц категории <i>B</i>	0,5	1,5	3
Предел дозы для лиц категории <i>B</i>	5 в течении 13-дневного периода		

Эквивалентная доза  $H$ , накопленная за время  $T$  (лет) с начала профессиональной работы, для лиц категории *A* не должна превышать значения, полученного по формуле

$$H = ПДД \cdot T \quad (5)$$

В любом случае для лиц этой категории, доза, накопленная к 30 годам, не должна превышать 12 *ПДД*.

Ограничение облучения населения (категории *B*) определяется возможным возникновением отдаленных эффектов и генетических последствий.

Исходя из предельно-допустимой дозы на критической орган, рассчитаны предельно допустимое годовое поступление (*ПДГП*) и

допустимое содержание (*ДС*) радионуклидов в критическом органе. Допустимые концентрации радионуклидов (*ДК*) в воздухе и в воде рассчитываются по наиболее жестким значениям *ПДД* и *ПДГП*, исходя из активности радиоактивного вещества, которая определяется числом спонтанных ядерных превращений в единицу времени. Одно ядерное превращение в секунду в системе СИ получило название Беккерель (*БК*). Используется также единица радиоактивности - Кюри (*Ki*). При этом  $1 \text{ Ki} = 3,700 \cdot 10^{10} \text{ БК}$ .

Если сведения о составе радионуклидов отсутствуют, то предельно допустимые дозы и предельно допустимое годовое поступление через органы дыхания и допустимые концентрации радионуклидов в воздухе определяются согласно данным табл.11.

Таблица 11.

Предельно допустимые дозы, предельно допустимое годовое поступление радионуклидов через органы дыхания и допустимые концентрации в воздухе

<i>ПДД, мкКи/год</i>	0,001
<i>ПДД, Ки/л</i>	$4 \cdot 10^{-16}$
<i>ПДГП, мкКи/год</i>	0,0001
<i>ДКБ, Ки/л</i>	$3 \cdot 10^{-17}$

Предельно допустимое годовое поступление через органы пищеварения и допустимые концентрации радионуклидов в воде для категории *Б* не должны превышать данных табл.12:

Таблица 12.

Предельно допустимое годовое поступление через органы пищеварения и допустимые концентрации радионуклидов в воде

<i>ПДГП, мкКи/год</i>	0,03
<i>ДК, Ки/год</i>	$3 \cdot 10^{-11}$

Если известно, что в составе радионуклидов отсутствуют те или иные неблагоприятные компоненты, то соответствующие значение *ПДП*, *ПГП* и *ДК* принимаются значительно более высокие.

В производственных помещениях основным путем поступления радиоактивных веществ является ингаляционный, то есть. через органы дыхания, а для объектов внешней среды - через органы пищеварения, то есть. пероральный.

Между ПДД ( $\text{мкКи/год}$ ) и среднегодовой допустимой концентрацией (СДК) радиоактивных веществ в воде или воздухе ( $\text{Ки/л}$ ) существует следующее соотношение

$$\text{ПДД} = 10^6 \cdot \text{СДК} \cdot V, \quad (6)$$

где  $V$  - объем воды или воздуха, поступающих в организм человека в течение года, л/год.

Для лиц категории *A* объем воздуха принимается равным  $2,5 \cdot 10^6$  л/год, для лиц категории *B* -  $2,5 \cdot 10^6$  л/год, для лиц категории *B* объем воздуха принимается -  $7,3 \cdot 10^6$  л/год, объем воды- 800 л/год.

Поэтому на атомных электростанциях (АЭС) существуют специальные системы газоочистки радиоактивных газов и их дезактивация, после чего они направляются в вентиляционную трубу и рассеиваются в атмосфере. В зависимости от высоты трубы регламентируются предельно допустимые выбросы радиоактивных газов.

Максимально допустимые выбросы на атомных станциях при высоте вентиляционной трубы 100 м приведены в табл.13.

Таблица 13.  
Максимально допустимые выбросы в вентиляционных трубах АЭС

<i>Наименование элементов</i>	<i>Выброс, Ки/сутки</i>
Сумма стронция - 90 и стронция-89	$10^{-3}$
Йод-131	0,1
Сумма $\beta$ - и $\gamma$ -активных аэрозолей (кроме изотопов стронция и йода)	0,5
Сумма радиоактивных инертных газов (изотопов ксептона, ксенона и аргона)	3500

Допускается выброс элементов в любых пропорциях в пределах каждой группы, указанной выше, но их сумма не должна быть более приведенного значения. Допускается также суточный выброс одновременно всех групп изотопов, причем по каждой группе он не должен превышать указанных значений.

## 2.5. Тепловые сбросы ТЭС и АЭС и их нормирование

Работа тепловых электростанций, как и любых теплоэнергетических установок промышленного, коммунально-бытового и транспортного назначения, в соответствии со вторым законом термодинамики обязательно сопровождается сбросами теплоты в холодный

(низкотемпературный) источник, в качестве которого естественным образом выступает окружающая среда. Кроме того, вследствие особенностей технологического организации рабочего цикла и из-за несовершенства тепловой изоляции в окружающую среду поступает часть теплоты из горячего (высокотемпературного) источника, а также из системы транспортировки нагретого рабочего тела, турбинного (или иного) преобразователя энергии рабочего тела, вспомогательного оборудования установки и т.п. Концентрации тепловых сбросов такого рода, вызванная деятельностью человека в крупных промышленных центрах достигает значительных величин.

При соответствующих условиях это оказывает влияние на климат, вызывает облачность, осадки и другие явления, если в окружающей среде существенно нарушается тепловой баланс естественного источника поступления теплоты - солнечной радиации. Сопоставление естественного прихода теплоты с количеством теплоты, интегрально потребляемого промышленностью для отдельных районов мира, приведено в табл.14.

Таблица 14.

Плотность потребления энергии крупнейшими промышленными районами мира в сравнении с уровнем солнечной радиации (по данным Международного института прикладного системного анализа)

<i>Район</i>	<i>Площадь, км<sup>2</sup></i>	<i>Потребление энергии, Вт/м<sup>2</sup></i>	<i>Солнечная радиация, Вт/м<sup>2</sup></i>
Нью-Йорк (Манхэттен)	59	630	93
Москва	880	127	42
Цинциннати	200	26	99
Западный Берлин	234	21,3	57
Лос-Анжелос	3500	21	108
Фербенс, Аляска	37	18,5	18
Гамбург	747	12,6	55
Северный Рейн	10296	10,2	51

Как видно, в ряде случаев естественное поступление энергии в ~8-10 раз меньше промышленного, а в других в ~5 раз превышает его.

Величина вынужденных тепловых сбросов, конечно, меньше величины потребления, так как определенное количество энергии выводится из района преобразования тепловой формы энергии в другие районы в виде электричества, механической энергии, световой.

Для тепловой станции (ТЭС), например, отводимая в окружающую среду теплота распространяется по трем основным направлениям:

- тепловые потоки в холодный источник с водой системы охлаждения  $Q_{охл}$ ;
- тепловые потоки из горячего источника с уходящими газами в атмосферу  $Q_{атмл}$ ;
- тепловые потоки из горячего источника с продуктами сгорания в форме шлаков и механического недожога  $Q_{шл}$  (при использовании твердого топлива);
- тепловые потоки с поверхности тепловой изоляции основного и вспомогательного оборудования  $Q_{из}$ .

Суммарный тепловой сброс ТЭС при этом равен

$$Q_{тэс} = Q_{охл} + Q_{атм} + Q_{шл} + Q_{из}, \quad (7)$$

Основная составляющая тепловых сбросов  $Q_{охл}$  определяется эффективностью ( $\eta$ -КПД) термодинамического цикла станции и её электрической мощностью  $W$

$$Q_{исв} = Q_2 = Q_1(1-\eta) = \frac{W}{\eta}(1-\eta), \quad (8)$$

где  $Q_1$  – подводимая теплота в цикле,  $Q_2$  - отводимая теплота в цикле.

Из указанного соотношения видно, что повышение КПД электростанций важно не только для того, чтобы снизить удельные расходы топлива, но и для снижения удельных сбросов теплоты  $Q_{охл} = Q_2$  в окружающую среду, которые даже для современных ТЭС достигают ~55 - 60% теплоты сгорания топлива.

Суммарный вклад остальных составляющих  $Q_{атмл}$ ,  $Q_{шл}$  и  $Q_{из}$  примерно на порядок ниже.

Для АЭС в отличие от ТЭС составляющие  $Q_{атм}$  и  $Q_{шл}$  практически отсутствуют, поэтому тепловые сбросы выводятся в основном с водой системы охлаждения, то есть  $Q_{охл}$ . Именно поэтому, а также вследствие более низкого КПД циклов АЭС по сравнению с ТЭС при прочих равных условиях тепловые сбросы на атомных электростанциях в системы охлаждения выше, чем для тепловых станций, и достигают ~ 70% от  $Q_1$ .

Для контроля за тепловыми выбросами электростанций и соответствующей оценки загрязнения окружающей среды в большинстве стран приняты определенные нормы допустимого нагрева охлаждающей воды в конденсаторах паровых турбин:

Так, абсолютное значение  $t_{охл}$  - температуры циркуляционной воды при открытой системе охлаждения конденсаторов ТЭС находится в диапазоне 20 - 30°C. Максимальные изменения температуры воды в

проточных водоемах до и после сброса циркуляционной воды не должно превышать, например,  $8^{\circ}\text{C}$  - в Чехии,  $\sim 3 - 5^{\circ}\text{C}$  в России,  $\sim 3^{\circ}\text{C}$  – в США.

Последствия нарушения естественного равновесия экологических систем водоемов связывают как с самим фактором повышения  $t_{\text{охл}}$  - температуры воды в них, так и с возможным уменьшением вследствие этого концентрации растворенного кислорода, что приводит к угнетению водных организмов, а при ограничении кормовой базы и превышении пороговых (летальных) температур, составляющих для некоторых промысловых рыб до  $37 - 38^{\circ}\text{C}$ , а для большинства водных организмов  $25 - 35^{\circ}\text{C}$  - к их гибели. Поэтому, кроме ограничений на рост температуры, предъявляется в законодательном порядке также требования по скорости изменения  $t_{\text{охл}} < 5^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ , а также содержанию растворенного кислорода ( $4 - 5$  мг/л).

Эти требования накладывают существенные ограничения на прямоточные системы охлаждения ТЭС и АЭС, забирающие из окружающих водоемов или водотоков значительные расходы охлаждающей воды (в среднем  $\sim 30$  м<sup>3</sup>/с на каждые 1000 МВт установленной мощности ТЭС и  $\sim 50$  м<sup>3</sup>/с на каждые 1000 МВт установленной мощности АЭС) и полностью возвращающие их после поверхностных теплообменных аппаратов – конденсаторов паровых турбин, масло-, водо-, газо- и воздухоохладителей вспомогательного оборудования.

В последние годы увеличилось число электростанций, на которых для отвода теплоты циркуляционной воды в окружающую среду используются башенные градирни. Они основаны на замене прямоточной системы охлаждения конденсаторов турбин на оборотную систему испарительного типа. Однако в связи со значительным увеличением количества испарений при этом требуется значительно большая подпитка системы охлаждения, например для АЭС требуемые подпитки охлаждающей воды составляют порядка  $0,8-1,2$  м<sup>3</sup>/с на каждые 1000 МВт выходной мощности. Столь значительный расход испаряемой воды далеко не всегда может быть обеспечен в районах с дефицитом пресной воды.

Другим серьезной экологической проблемой, возникающей при работе систем охлаждения мощных электростанций с градирнями, является выброс в атмосферу огромного количества пара и капельной влаги, измеряемой в тысячах тонн в час на каждые 1000 МВт мощности.

Влияние градирен на микроклимат и атмосферные процессы изучено недостаточно. Однако известно, что унос капельной влаги вызывает в осенне-весенний сезон морозящий дождь. В результате этого адсорбированные из воздуха пыль и аэрозоли совместно с солями, содержащимися в циркуляционной воде, осаждаются на почве, близлежащих сооружениях, высоковольтных линиях электропередач и электротехнических устройствах. Зимой наличие влаги приводит к

обледенению близкорасположенных строений, дорог, конструкций, отрицательно сказываясь на их долговечности.

В связи с указанными недостатками или ограничениями на использование прямоточной и оборотной системы охлаждения электростанций развиваются работы по применению воздушно-конденсационных установок охлаждения (ВКУ), в которых практически отсутствуют потери воды, но при температуре окружающего воздуха выше 25-27°C работа энергоблока с номинальной мощностью невозможна. Взамен предлагаются системы комбинированного охлаждения - орошаемые воздушно-конденсационные установки охлаждения.

Экологически обоснованные нормы на эти типы систем охлаждения не установлены.

## **2.6. Тепловые аспекты работы ГЭС**

При выборе вариантов развития большой энергетики все большее значение занимают экологические последствия их сооружения и эксплуатации. При этом часто вопросы трактуются весьма консервативно – больше всего внимания уделяется выбросам пыли и токсичных окислов азота и серы от тепловых станций, которые сравнительно легко измерить и жестко лимитировать с помощью давно освоенных в развитых странах технологий. Тепловые станции на органическом и ядерном топливе являются также источником «теплового» загрязнения, так как свыше половины подведенного в них тепла отдается холодному источнику, в качестве которого выступает окружающая среда. Наиболее чистыми считаются гидроэлектростанции, для которых этот фактор не учитывается. Поскольку вклад гидроэлектростанций в энергетику достаточно велик – до 20%, а их единичная мощность достигает 5-6 млн.кВт, при анализе проектов и комплексных планов развития регионов, нельзя не учитывать

тепловых выбросов от ГЭС, тем более что в ряде случаев, например, зимой они могут на порядок превышать соответствующие выбросы для ГЭС аналогичной мощности. Летом же наоборот – действующие ГЭС, как правило, приводят к съему тепловой энергии и снижают температурный уровень соответствующих регионов. В случае, когда вырабатываемая электроэнергия передается в отдаленные районы, например, из Сибири в Европейскую часть, примерно пропорциональная передаваемой мощности энергия изымается из энергопроизводящего региона.

Оценить воздействие этих факторов на окружающую среду можно, воспользовавшись уравнением энергетического и материального балансов для стационарных потоков несжимаемой жидкости:

$$\frac{N}{G} + \frac{\Delta p}{\rho} + \Delta(gz) + \Delta\left(\frac{V^2}{2}\right) = \frac{Q}{G} - Gp\Delta T; G = \rho VF = const. \quad (9)$$

Рассмотрение энергетического баланса на участке перепада высот ( $\Delta z$ ) между начальным сечением потока с расходом ( $\Delta G$ ) и сечением восстановления скоростного напора ( $\Delta\left(\frac{V^2}{2}\right) = 0$ ) показывает, что в адиабатических условиях для современных ГЭС с КПД на уровне 90-96% почти весь статический напор ( $\Delta p = -\rho g\Delta z$ ) переводится в удельную вырабатываемую мощность ( $N_z / G$ ).

В естественных условиях при отсутствии съема технической мощности ( $N=0$ ) потенциальная энергия сброшенной воды полностью диссипирует в тепловую форму с выделением теплоты

( $Q_d = Gg\Delta z = c_p G\Delta T$ ), вызывая повышение энтропии системы

( $\Delta S = c_p G \frac{\Delta T}{T}$ ) и повышение температуры потоков, прямо

пропорциональное перепаду высот  $\Delta T = \frac{g\Delta z}{G}$ .

Легко подсчитать, что в указанном выше смысле каждые 100 м водосброса обеспечивает прирост температуры воды  $\Delta T=0.23^\circ$ , а эксплуатация ГЭС суммарной мощностью  $2.5 \cdot 10^6$  кВт на реке с циркуляционным расходом воды  $G=2550$  т/с ( $223 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>/сут) при том же 100-м напоре эквивалента съему тепловой мощности  $Q_d=2150 \cdot 10^6$  ккал/ч, рассеиваемой (диссипируемой) в естественных условиях.

Как видно, естественное тепловыделение при сбросе воды может быть сравнимо с тепловыми сбросами крупной ТЭС, мощностью которой для приведенного примера составляет 2000-2500 МВт. Отвод тепла из паросилового цикла такой установки в условиях естественного тепломассообмена с атмосферой сопряжено с испарением около

$G_i = \frac{Q_d}{r} = (2 \div 4) \cdot 10^3$  т/ч воды из охладителя в зависимости от величины

температурного напора и соответствующего вклада конвекции.

Таким образом, гидротурбину можно рассматривать как своеобразный тепловой двигатель, замещающий природное рассеивание выделяющейся на водопадах теплоты и (аналогично паротурбинным агрегатам ТЭС) нарушающий температурный и испарительный режим используемых водных ресурсов.

Существенную роль в увеличении масштабов таких нарушений играют локальный характер съема энергии и концентрация больших водных масс в сооружаемых при ГЭС водохранилищах.

Большие водные поверхности и значительные объемы запасаемой воды приводят к выраженной температурной стратификации ее по глубине, в пределе от температуры смоченного термометра на поверхности до температуры максимальной плотности  $+4^{\circ}\text{C}$  для глубинных слоев. Летом и осенью это вызывает заметное снижение температуры воды и более ранний ледостав, а в зимнее время сброс более теплой глубинной воды в нижний бьеф приводит к не замерзанию поверхностей рек на протяжении нескольких десятков километров.

Их удельная площадь (т.е. отношение зеркала к циркуляционному расходу) согласно методике ВНИИТ даже для суровых метеорологических условий сибирской зимы (например, в районе Красноярска) составляет не менее  $\omega = \frac{\Omega}{G} = 0.35 \div 0.4 \text{ м}^2 / \text{м}^3 \text{ сутки}$  в расчете на снижение температуры поверхности сброшенной воды от  $+4$  до  $0^{\circ}\text{C}$ , (соответственно средней по

глубине температуры от +4 до +2°C). При этом для рассматриваемого примера активная площадь незамерзающей воды в нижнем бьефе составит около  $\Omega = \omega_d = 70 \div 80 \text{ км}^2$ , а количество отдаваемой в окружающую среду теплоты будет равно  $Q_d = c_p G \Delta T = 18360 \cdot 10^6 \text{ ккал/ч}$ .

В общей постановке необходимо учитывать еще многие факторы, в частности изменение падающего и отражающего потоков солнечной энергии, с учетом роста поверхности радиационного и конвективного теплообмена и др. Это примерно на порядок увеличивает масштабы влияния ГЭС на конвективный и испарительный теплообмен с атмосферой по сравнению со случаем «чистого» съема мощности.

Следует отметить, что каскадное сооружение крупных ГЭС с типичными параметрами, ориентировочно соответствующими приведенными в примерах, увеличивает количественные результаты в 4-5 раз. Приведенные оценки свидетельствуют о существенном влиянии работы ГЭС на тепловой режим района расположения станции, что, по-видимому, в первую очередь должно отразиться на климатических условиях этих зон, вызывая их относительное похолодание летом и потепление зимой.

Соответствующие изменения будут происходить и в районах, расположенных ниже по течению, так как и там изменяется среднемассовая температура теплоносителя, а следовательно, и

тепловыделения. В частности, локальные выбросы тепла зимой в районах, прилегающих к нижнему бьефу, приводит к снижению среднемассовых температур рек и снижает их тепловой потенциал вдали от зоны возмущения. Это в свою очередь вызывает относительное похолодание областей, расположенных ниже каскада гидроэлектростанций (кроме упомянутых выше локальных районов интенсивных тепловых выбросов). Последнее обстоятельство может усложнять условия судоходства в устьях сибирских рек и морского побережья.

Отмеченные факторы, безусловно, влияют и на формирование атмосферных явлений, хотя оценивать их представляется чрезвычайно затруднительно. Косвенно это влияние проявляется в наблюдаемом увеличении влажности воздуха, увеличении общего количества и частоты выпадения осадков в прибрежной полосе крупных водохранилищ, появлении там туманов, смягчении суточных и сезонных колебаний температуры, изменении розы ветров и других факторах, характерных для смены континентальных климатических признаков на морские. Указанные факторы могут резко усложнять экологическую обстановку при сочетании с вредными выбросами промышленных производств.

При комплексном анализе перспектив энергетического строительства и развития различных регионов страны, моделировании глобальных атмосферных процессов и оценке отрицательных последствий изменения

климата необходимо учитывать и описанные выше тепловые воздействия ГЭС и гидросооружений.

## 2.7. Сбросы загрязненных (сточных) вод

Наряду с нуждами охлаждения мощные энергетические установки ТЭС и АЭС потребляют значительное количество воды для обеспечения работы других систем – гидрозолоудаления, промывки и химической очистки оборудования перед пуском, блочной обессоливающей установки и других. Использованная в них вода содержит значительные загрязнения и сбрасывается в окружающую среду. Масштабы этих сбросов характеризуются следующим соотношением:

$$G = W \cdot K \quad (10)$$

где  $G$  - т/ч - количество сбрасываемой воды,  $W$  – МВт - мощность станции,  $K$  - коэффициент, значение которого наводится для ТЭС в интервале 100-150, для АЭС -150-200.

Сбрасываемые воды несут в окружающую среду не только теплоту, но и, например, нефтепродукты (масла), подпадающие в общую систему охлаждения из-за различного рода неплотностей, сернистые добавки золы и шлаков, канцерогенные вещества продуктов химической промывки и консервации оборудования, использующей минеральные кислоты (соляную, серную, плавиковую, сульфаминовую и др.), а также органические кислоты (лимонную, щавелевую, муравьиную, уксусную, ортофталевую, адипиновую и др.), нетоксичные осадки реакций промывки и обессоливания в виде гидроксидов магния, железа, алюминия, карбонатов и сульфитов кальция, солей натрия и калия и др., а в ряде случаев – и токсичные вещества типа фторидов, мышьяка, ванадия, реже – ртути, германия и других элементов.

Общее содержание примесей может достигать до  $\sim 500$  мг/л при общем объеме сбрасываемой воды порядка 350 - 500 м<sup>3</sup>/ч для станции мощностью 2400 КВт, сжигающей около 2500 т/ч угольного топлива среднего качества. При этом образуется около 1000 т/ч золы и в окружающую среду выводится от 500 до 2500 кг/ч солей и гидроксидов, изменяющих водородный показатель РН сбросных водоемов. Особенно большую роль в этих изменениях играют системы гидравлического золоудаления, вода в которых насыщается различными компонентами в зависимости от вида топлива. Например, сланцы, торф, уголь с высоким содержанием свободной окиси кальция дают золу, которая превращает

промывающую воду в щелочной раствор с  $\text{pH} > 12$ , содержащий более 5 - 6%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . При содержании свободной окиси кальция менее 500 мг экв./кг значение  $\text{pH}$  будет на уровне 8,0 - 11,5 в сухих золоуловителях и 6,0 - 11,0 - в мокрых. Кроме того, в воде мокрых золоудалителей растворяются также некоторые газообразные вещества, содержащиеся в дымовых газах -  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{CO}_2$ , фтористые соединения и др.

На золоотвалах при контакте пульпы с атмосферным воздухом происходит поглощение водой  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$ . Все растворившиеся в воде вещества взаимодействуют между собой, образуя новые соединения, которые могут оставаться в растворенном состоянии или же выпадать в осадки, если их содержание в воде превышает предел растворимости при данной температуре.

Безопасной с точки зрения образования отложений считается осветленная вода, имеющая  $\text{pH} \leq 10$  и концентрацию сульфатов  $\leq 30$  мг экв./л, которая может быть возвращена в оборотную систему золоудаления, а сами золоотвалы не должны иметь контактов с природными источниками воды.

В ряде зарубежных стран широко используются сухие методы складирования, когда летучая зола и шлак перерабатываются в механически прочные и химически инертные гранулы, которые затем переводятся на место складирования (в отработанные, шахты, болота, открытые площадки с послойным утрамбованным настилом. При этом примерно в 100 раз уменьшается коэффициент фильтрации золоотвалов природной водой, что экологически более благоприятно, так как будет практически отсутствовать вымывание из золы содержащихся в ней вредных веществ.

Значительно ужесточаются нормы на остаточное содержание в сбросных водах электростанций нефтепродуктов - 0,1 мг/л вместо недавних 0,3 мг/л. Для их очистки применяются методы отстаивания, флотации и фильтрования, которые в общем виде рассматриваются в разделе 3.

### 3. Методы и средства снижения вредных выбросов энергетических установок в окружающую среду

Результаты исследований и разработок, выполненных в последние годы по изучению процессов образования и взаимодействия вредных выбросов энергетических объектов с окружающей средой и их энергофизическому мониторингу, позволяют осуществить ряд мероприятий по уменьшению нежелательных воздействий на окружающую среду при производстве энергии.

Апробированные технологии можно разделить на *пассивные и активные методы*.

Основным направлением *пассивного подхода* к предотвращению возникновения опасных концентраций загрязняющих веществ в окружающей среде ЭС является использование рассеивающих свойств атмосферы, воды, почвы в естественных процессах конвективного и диффузионного переноса примесей.

Однако надо заметить, что суммарное количество примесей, поступающих в окружающую среду, при таком подходе не снижается.

Поэтому все большее внимание уделяется *активным методам* снижения выбросов энергетических установок электростанций за счет воздействия на процессы преобразования энергии – сжигания топлива или приготовления горячих смесей, а также удаления вредных веществ из продуктов сгорания, потоков теплоносителей и других технологических сред до их выброса в окружающую среду.

Основные методы и средства в каждом из направлений заключаются в следующем.

#### 3.1. Пассивные методы

##### 3.1.1. Рассеивание в атмосфере дымовых выбросов

Задача рассеивания вредных примесей от дымовых газов электростанций решается на основе представления о строении и движении

воздуха в атмосфере. Атмосфера окружает Землю и простирается в высоту на сотни километров, однако основное количество воздуха содержится в слоях, непосредственно примыкающих к земной поверхности, так в слое до 5 км высотой содержится 50%, в слое до 11 км – 75%, а в слое до 30 км – 99% общего количества воздуха.

По характеру изменения температур и давлений с высотой атмосфера подразделяется на пять слоев (рис.1).

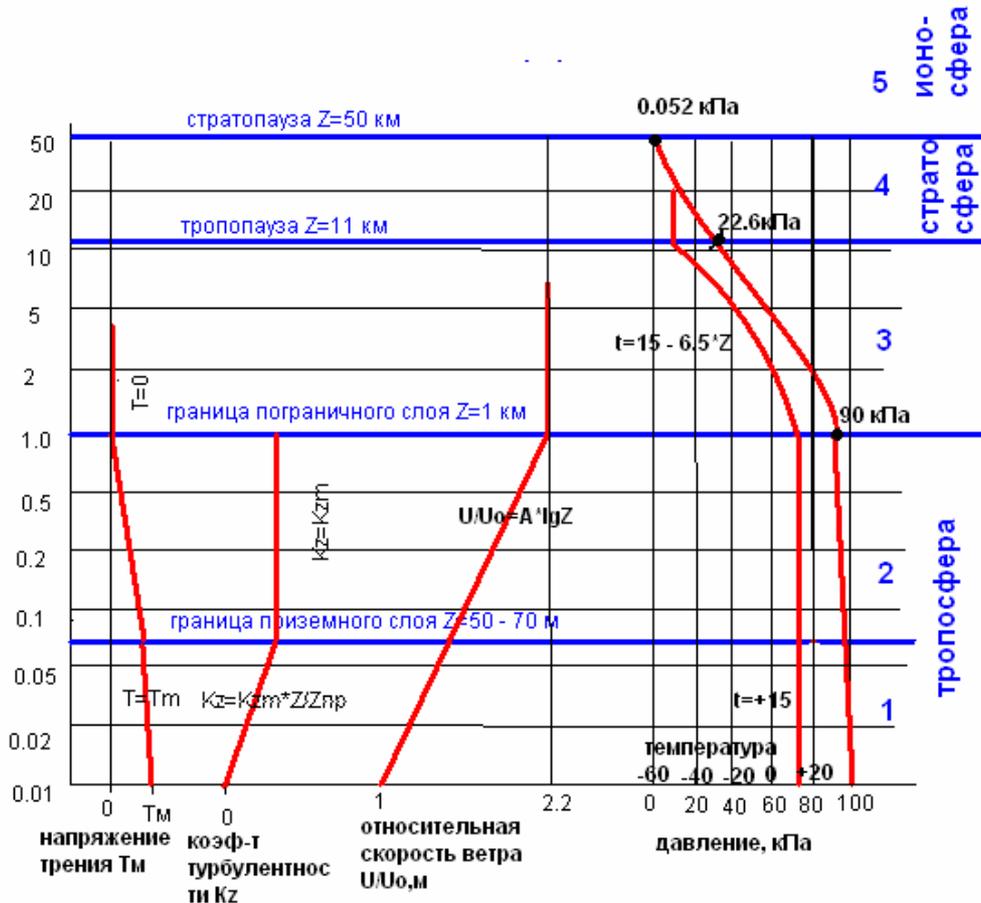


Рис.1. Структура и основные характеристики атмосферы

Наибольшее значение для рассеивания имеет нижний слой, простирающийся от земной поверхности до высоты примерно 11 км, называемый тропосферой. В нем температура воздуха монотонно падает в среднем на  $0,65^{\circ}\text{C}$  на каждые 100 м подъема от земной поверхности. Если принять на уровне моря  $t_{\text{возд}} = 15^{\circ}\text{C}$ , то на внешней границе тропосферы будет  $t_{\text{возд}} = -56^{\circ}\text{C}$ . Выше этого слоя температура не меняется, сохраняясь на этом уровне вплоть до высоты 40 км в слое, называемом стратосферой.

Состав сухого воздуха по объему в этих слоях характеризуется следующими данными: азота 78.084%; кислорода 20.946%; аргона 0,934%;

углекислого газа 0,032% и в очень малых количествах некоторых других газов.

**Статика атмосферы** характеризуется изменением давления и плотности неподвижного воздуха с высотой в условиях равновесия (рис.2)

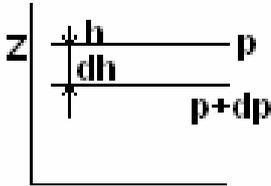


Рис.2. К выводу формулы изменения

статического давления атмосферы с высотой

$dz$

Поскольку изменение давления на нижней грани воздушного столба плотностью  $\rho$  и высотой обуславливается его весом  $dG$  в поле земного тяготения, то с учетом уравнения состояния и граничных условий можно записать следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \partial h + q &= qh + q \\ \Delta b * q * g - &= \partial b \\ q * g - &= \frac{qh}{\Delta b} \\ \frac{q}{TЯ} &= q \\ (o q) o q &= o_{-1} | q \\ \text{износ} &= o T \approx T \end{aligned} \tag{11}$$

Учитывая, что изменение абсолютной температуры в интересующем диапазоне высот невелико, после интегрирования можно получить искомую зависимость изменения статического давления атмосферы с высотой, называемую формулой Больцмана:

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{g}{RT} Z\right) \tag{12}$$

**Динамика атмосферы** характеризуется практически непрерывным движением воздуха, всегда носящего турбулентный характер. У поверхности Земли в потоке воздуха возникает явление внутреннего трения, которое описывается известным соотношением

$$\tau = \rho K_z \frac{dU}{dZ} \tag{13}$$

где  $\tau$  - касательное напряжение трения;  
 $\rho$  - плотность воздуха;  
 $K_z$  – коэффициент турбулентности в вертикальной плоскости;  
 $dU/dZ$  – изменение скорости ветра с высотой.

С учетом поведения параметров атмосферы с высотой (см. рис.1) можно условно разделить движение воздуха на три слоя, выделив в атмосфере приземный слой (до примерно 40 – 70 м), пограничный (примерно до 1 км) и свободную атмосферу (выше 1 км). Соответственно можно получить три аналитических решения для характеристики динамики атмосферы.

1. Для приземного слоя: напряжение трения достигает наибольшей и почти постоянной величины, а коэффициент  $K_z$  изменяется линейно с высотой от почти нулевого значения на поверхности Земли до некоторого максимального значения на границе следующего пограничного слоя, то есть:

$$K_z = K_{z_M} * \frac{Z}{Z_M} \quad (14)$$

$$\tau = \rho * K_{z_M} * \frac{Z}{Z_M} * \frac{dU}{dZ} = const$$

Отсюда следует известный логарифмический закон распределения скорости с высотой:

$$\ln \frac{Z_1}{Z_0} = A * \frac{U_1}{U_0}, \quad \text{где} \quad A = \frac{\rho * K_{z_M}}{t} \quad (15)$$

2. Для пограничного слоя (от 40 – 70 м до 1 км) характерно постепенное падение напряжения трения при примерно постоянном значении  $K_z = K_{z_M}$  и выравнивании профиля средней скорости ветра с высотой (уменьшении  $\frac{dU}{dZ}(Z)$ ).

3. Для свободной атмосферы (выше 1 км) напряжение трения и градиент изменения средней скорости ветра практически равны нулю:

$$\tau = 0$$

$$\frac{dU}{dZ} = 0 \quad (16)$$

Здесь средняя скорость ветра остается постоянной  $U_z = const$ , и для рассеивания дымового облака становятся существенными пульсационные характеристики скорости. Последние зависят от большого количества

факторов, таких как шероховатость прилегающей поверхности (рельефа местности), скорости абсолютного движения, распределения температуры с высотой, называемого температурной стратификацией.

Для характеристики последней зависимости вводится специальное понятие **сухоадиабатический градиент**, то есть изменение температуры частички воздуха, перемещающейся в сухой атмосфере по вертикали без теплообмена с окружающей средой.

Для сухого воздуха значение сухоадиабатического градиента составляет

$$\gamma_a = -\frac{dT}{dZ} \approx 0,65 * 10^{-2} K / m, \quad (17)$$

соответствуя понижению температуры воздуха примерно на  $0,65^{\circ}C$  на каждые 100 метров подъема.

**Турбулентная диффузия примесей. Турбулентный характер движения воздуха обеспечивает перемешивание (диффузию) примесей в атмосфере, которая в отличие от молекулярной (по закону Фика), называется турбулентной диффузией (за счет турбулентных пульсаций). Описывается следующим уравнением турбулентной диффузии в виде связи изменений концентрации примеси  $C$  в пространстве и во времени:**

$$\frac{dC}{d\tau} = -U * \frac{dC}{dx} + \sum_i \frac{d}{dx_i} K_{x_i} \frac{dC}{dx_i}, \quad (18)$$

Уравнение получается из рассмотрения материального баланса диффундирующего вещества в элементарном объеме атмосферного воздуха аналогично выводу уравнения молекулярной диффузии с учетом вклада конвективного переноса в направлении скорости ветра  $U$ .

В условиях изотропной турбулентной диффузии, когда коэффициенты  $K_i = K_x = K_y = K_z = K$  в любом направлении можно считать постоянными и равными между собой, уравнение принимает более простой вид:

$$\frac{dC}{d\tau} + U * \frac{dC}{dx} = K * \nabla^2 C \quad (19)$$

Решение этого уравнения достаточно легко (по стандартным программам) находятся численными методами на ЭВМ, давая детальную количественную картину рассеивания примесей.

Для стационарных условий, когда  $\frac{dC}{d\tau} = 0$ , возможно получение аналитического решения, показывающего качественный характер зависимостей при некоторых упрощающих предположениях.

Так, допуская, что выбросы в атмосферу из объемных источников в силу их малых размеров можно считать точечными, и принимая граничные условия в виде:

$$\begin{aligned} C &\rightarrow 0 \text{ при } Z \rightarrow \infty \text{ - на бесконечном удалении,} \\ C &= 0 \text{ при } Z = 0 \text{ - у поверхности воды (поглощение примеси)} \end{aligned} \quad (20)$$

$$K_z \frac{dC}{dZ} = 0 \text{ при } Z = 0 \text{ - у непроницаемой поверхности почвы}$$

(за счет уноса примеси снова в атмосферу),

а также считая  $U = \text{const}$  – постоянной скоростью ветра вдоль оси  $x$ , в условиях  $K = K_x = K_y = K_z$  – изотропной диффузии, получим по методу источников решение:

$$C = \frac{M}{4\pi r K} \exp \left[ \frac{-U}{2K} (r - x) \right] \quad (21)$$

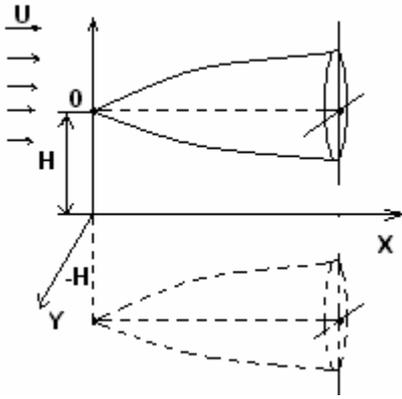
Здесь в сферической системе координат  $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$  – расстояние от точки выброса;  $x$  – проекция этого расстояния на ось  $x$  в направлении скорости ветра,  $M$  – величина выброса.

Это решение можно использовать для определения концентрации вредных примесей на поверхности Земли, полагая, что поперечные размеры дымового облака, выбрасываемого из дымовой трубы, значительно меньше продольных (то есть  $y, z \ll x$ ).

Принимая затем, что на значительном удалении от источника  $r \approx x$ , и заменяя в уравнении  $(r - x)$  приближенным выражением

$$(r - x) = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - x = \left( \sqrt{1 + \frac{y^2 + z^2}{x^2}} - 1 \right) x \approx \frac{y^2 + z^2}{2x} \quad (22)$$

и поместив начало координат в точку 0, расположенную у основания дымовой трубы с эффективной высотой  $H$ , для концентрации  $C$  получим:



$$C = \frac{M}{4\pi Kx} \exp\left[-\frac{U}{4K} \frac{y^2 + (z-H)^2}{x}\right] \quad (23)$$

на высоте  $Z=H$

$$C = \frac{M}{4\pi Kx} \exp\left[-\frac{U}{4K} \frac{y^2 + H^2}{x}\right] \quad (24)$$

на уровне  $Z=0$

Рис.3. К схеме метода фиктивного источника

Записанные решения соответствуют случаю полной проницаемости земной поверхности для примесей. Для учета уноса части примесей обратно в атмосферу с турбулентными потоками можно, как это сделал О.Саттон, ввести второй фиктивный источник на высоте  $Z = -H$  (рис.3).

Суммируя решения от обоих источников, получим выражение

$$C = \frac{M}{4\pi Kx} \exp\left[-\frac{UY^2}{4Kx}\right] * \left\{ \exp\left[-\frac{U(z-H)^2}{4Kx}\right] + \exp\left[-\frac{U(z+H)^2}{4Kx}\right] \right\}, \quad (25)$$

отвечающее граничному условию непроницаемости  $K_z \frac{dC}{dZ} = 0$  при  $Z=0$ .

При этом концентрация примеси на уровне земли будет равна:

$$C = \frac{M}{2\pi Kx} \exp\left[-\frac{U}{4K} \frac{y^2 + H^2}{x}\right], \quad (26)$$

Это вдвое больше, чем при полной проницаемости земной поверхности.

Как видно, наибольшее значение имеет концентрация на оси факела ( $y=0$ ), для которой из формулы следует:

$$C = \frac{M}{4\pi Kx} \exp\left[-\frac{U}{4K} \frac{H^2}{x}\right] \quad \text{при } y=0. \quad (27)$$

Координаты точки максимума концентрации на земной поверхности определяются из условия  $\left. \frac{dC}{dx} \right|_{Y=0} = 0$

Дифференцируя и находя корни, можно получить точку максимума концентрации примесей  $x_M = \frac{UH^2}{4K}$ , а также выражение для определения максимально-разовой концентрации

$$C_{MAX} = \frac{2M}{\pi eUH^2} \quad (28)$$

Как видно, в простейших условиях максимально-разовая концентрация примесей на уровне земли прямо пропорциональные количеству выбросов, обратно пропорциональна скорости ветра и квадрату высоты трубы.

В реальных случаях при выбросах из дымовых из дымовых труб ТЭС задача существенно усложняется в связи с необходимостью учета состояния атмосферы, неоднородностей турбулентной структуры, подъема факела над устьем трубы и др., однако структура зависимостей по основным факторам остается аналогичной.

Одна из формул, рекомендованных методикой Главной Геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова для практических расчетов концентрации примесей в приземном слое атмосферы, выглядит следующим образом:

$$C_M = \frac{AmnMF}{H^2} \sqrt[3]{\frac{N}{VT}}, \quad (\text{мг/м}^3), \quad (29)$$

где  $A$  – коэффициент температурной стратификации атмосферы, зависящий от метеорологических условий,

$M$  – суммарный выброс загрязняющих веществ;

$H$  – высота дымовой трубы, м

$V$  – объем выбрасываемых дымовых газов ( $\text{м}^3/\text{с}$ ),

$T$  – разность между температурой газов и окружающим воздухом;

$m, n$  – безразмерные коэффициенты, зависящие от скорости выхода газов из трубы;

$F$  – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость осаждения твердых частиц золы в атмосфере (для газовых примесей = 1);

$N$  – число дымовых труб.  
 Отсюда, минимально допустимая высота дымовой трубы при  
 сооружении ТЭС для обеспечения необходимых ПДК определяется по  
 формуле:

$$H = \frac{\sqrt{AmnMF} \sqrt[6]{N}}{\sqrt[6]{VT} \sqrt{C_M}} \quad (30)$$

Нормированная методика расчета позволяет определить все необходимые коэффициенты и рассчитать основные параметры дымовых труб в зависимости от мощности и района расположения станции. В настоящее время освоенными являются дымовые трубы высотой 320 – 360 м, осваивается строительство труб высотой 420 м и более.

Вопрос о предельной мощности ТЭС по условиям защиты биосферы от вредных воздействий дымовых газов должен решаться с учетом имеющегося топлива, фоновой загазованности места сооружения, возможностей снижения выбросов активными методами.

### 3.1.2. Процессы в водоемах при сбросе сточных вод электростанций

Водосистемы в целом – это сложные экологические системы существования биоценоза (сообщества живых организмов растений и животных), а также биотопа (неживой окружающей среды), между которыми устанавливаются обмен солнечной энергией, теплом, газами, водой, минеральными и органическими веществами, на двух – трех различных уровнях биотопа, в том числе на: поверхности воды; в толще воды; на дне.

Живые обитатели водоемов (гидробионты, подразделяющиеся на планктон, способный противостоять течению воды, и нектон, не способный к этому) ведут борьбу за существование, в первую очередь пищу, либо синтезируя органические вещества из неорганических соединений окружающей среды, либо усваивая готовые органические вещества.

Растения водоемов, используя фотосинтез, выделяют кислород, но основная часть кислорода поступает в водоем путем аэрации при контакте поверхности воды с воздухом.

Микроорганизмы (бактерии) интенсифицируют процесс минерализации органики при ее окислении кислородом.

Основными процессами естественного самоочищения загрязненных водоемов являются: осаждение грубодисперсных и коагуляция коллоидных примесей; окисление органических смесей; окисление минеральных примесей кислородом; нейтрализация кислот и оснований за счет буферной емкости воды водоема, приводящая к изменению ее pH; гидролиз ионов тяжелых металлов, приводящий к образованию малорастворимых гидроксидов и выделению их из воды; установление углекислотного равновесия в воде, сопровождающегося выделением твердой фазы ( $\text{CaCO}_3$ ) или переходом ее части в воду.

Эти процессы зависят от гидробиологической и гидрохимической обстановки в водоемах. Основными факторами являются: температура воды; минералогический состав примесей и их концентрация; концентрация кислорода; pH воды.

Особенно большое значение имеет кислородный режим водоема. Расход кислорода на минерализацию органических веществ определяется через биохимическое потребление кислорода (БПК) ( $\text{мг O}_2/\text{сутки}$ ), обычно за пять суток пятисуточной или полной потребностью кислорода. В случае большого дефицита кислорода происходит накопление и загнивание органических веществ (анаэробные процессы).

Действие токсичных веществ проявляется в зависимости от их концентраций: при больших концентрациях наступает гибель гидробионтов; при меньших изменяется обмен веществ, темп развития, мутагенез, потеря способности к размножению.

Для гидробионтов наиболее благоприятен показатель  $\text{pH}=6.5 - 8.5$ . Однако его нельзя считать постоянной величиной, он колеблется даже в течение суток – ночью вода насыщается  $\text{CO}_2$ , и pH падает, днем наоборот.

Температура воды также оказывает мощное воздействие на биоценоз – через скорость протекания химических реакций, с другой стороны – через скорость восстановления дефицита кислорода, ускоряя эти процессы с ростом температуры.

Согласно «Правилам охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами» водоемы подразделяются на хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения; водоемы для централизованного питьевого водоснабжения; водоемы для купания, спорта и отдыха; рыбохозяйственные водоемы, в том числе водоемы для сохранения и воспроизводства ценных пород рыб с высокой чувствительностью к кислороду ( $>6 \text{ мг/кг}$ ) и для других пород рыб ( $>4 \text{ мг/кг}$ ).

Соответственно этим правилам устанавливаются нормативные требования к составу и свойствам воды каждой категории.

В связи с тем, что воздействие даже одной примеси может проявиться в зависимости от ее концентрации, при установлении ПДК в водоемах ориентируются на минимальную (подпороговую) концентрацию по одному из следующих показателей:

- ППК органолептических характеристик (цвет, вкус, запах)
- ППК санитарного режима водоема (БПК, O<sub>2</sub>, pH)
- ППК токсического воздействия

Значение ПДК(мг/кг), представляющие интерес для энергетики, даны в табл.15.

Таблица 15.

Величины ППК для водоемов различного назначения

<i>Загрязняющее вещество</i>	<i>Для водоемов хозяйственно- бытового назначения</i>	<i>Для рыбохозяйственных водоемов</i>
	<i>ППК по санитарно- токсикологическому показателю</i>	
Аммиак	-	0.05
Ванадий	0.1	-
Гидразин	0.01	-
Железо	0.5	-
Медь	0.1	0.01
Мышьяк	0.05	0.05
Никель	1	0.01
Нитраты (по азоту)	10	-
Полиакриламид	2	-
Ртуть	0.005	-
Свинец	0.1	0.1
Уротропин	0.5	-
Формальдегид	0.5	-
Фтор	1.5	-
	<b>ППК по общесанитарному показателю</b>	
Аммиак (по азоту)	2	-
Хлор активный	-	-
Цинк	1	-
Серной кислоты соли	500	-
	<i>ППК по органолептическому показателю</i>	
Нефть высокосернистая	0.1	-
Нефть и нефтепродукты в растворе и эмульсии	0.5	0.05

Фенолы	0.001	0.001
--------	-------	-------

При одновременном сбросе нескольких токсичных веществ должно выполняться требование

$$\sum \frac{C_i}{ПДК_i} \leq 1 \quad (31)$$

Режимы сброса сточных вод могут быть единовременными, периодическими, непрерывными с постоянным расходом, непрерывными с переменным расходом, случайными.

Величина предельно-допустимого выброса (ПДВ) примесей в водных стоках рассчитывается для конкретных условий разбавления (смешения) на основе балансовых и гидродинамических представлений:

$$C_{CM} = n_0 [n_{P.C} (C_{P.C} - C_{\phi}) + C_{\phi}] \quad (32)$$

где  $C_{P.C}$  – концентрация примесей в сточных водах до выпуска в водоем в расчетном стоке,  $C_{\phi}$  – фоновая концентрация в водоеме,  $n_{P.C}$  – кратность разбавления в расчетном отводе,  $n_0$  – кратность начального разбавления до выпуска.

Время, необходимое при длительной аэрации растворов с целью окисления примесей, определяется из кинетического уравнения:

$$\frac{dC}{d\tau} = -kC \quad (33)$$

в виде

$$\tau = \ln(C_0/C) / k \quad (34)$$

где  $k$  – константа потребления кислорода,  $C_0$  – начальная концентрация примесей.

### 3.1 3. Рациональное размещение электростанций

Ряд ограничений и технических требований при выборе площади под строительство энергетических установок электростанций диктуется экологическими соображениями. Во-первых, должен приниматься во внимание фоновый фактор, то есть фон уже имеющихся загрязнений от промышленных предприятий и существующих станций и имеющийся запас до ПДК. Во-вторых – обеспечение водой системы охлаждения ТЭС и АЭС, где экологические факторы также играют весьма существенную роль. В-третьих, дополнительным фактором является уровень шума. Так, например, уровень шума непосредственно в помещении станции достигает величины 80-90 дБ. Однако уровень предельно допустимого шума в прилегающих к ЭС жилых домах ограничивается в ночное время в

пределах 35 – 50 дБ. Для определенного типа энергооборудования это ограничение является достаточно серьезным, например, для ГТУ, предназначенных для покрытия пиковых нагрузок и требующих размещения как можно ближе к потребителю – в густонаселенных районах. В-четвертых, должны рассматриваться проблемы надежного топливоснабжения, при решении которых возникает ряд серьезных экологических вопросов. Например, если принять среднюю выработку электроэнергии на ТЭС 10 – 12 млрд. кВт·ч, то для работающей на угле станции за этот период надо сжечь 8 млн. тонн угля. Для перевозки этой горы угля необходимо около 150 тысяч вагонов. Непрерывный подвоз топлива, выделение пыли при транспортировке, потери на складах при разгрузке и складировании, загруженность транспортных магистралей – вот далеко не полный перечень факторов. Оптимизировать размещение станций можно путем компактной компоновки мест производства и потребления, возможно даже с отказом от централизации. В-пятых, встает проблема строительства линий электропередач, требующих огромных полос отчуждения из-за отрицательного влияния электромагнитного облучения на биосферу. Наконец, в-шестых, возникает проблема размещения и утилизации золоотвалов и шлаков.

### 3.2. Активные методы снижения вредных выбросов энергетических установок в окружающую среду

Суть активных методов снижения вредных выбросов заключается в целенаправленном воздействии на процессы преобразования энергии сжигания топлива или приготовления рабочей смеси, а также удаления вредных веществ из продуктов сгорания и воды до их выброса в окружающую среду.

Применительно к организации технологических процессов на ТЭС основными из этих методов являются следующие.

#### 3.2.1. Снижение выбросов окислов серы

Сера является одним из главных токсичных компонентов, содержащихся практически во всех органических топливах. Особенно много ее в углях и нефти европейских месторождений, она содержится даже в природном газе среднеазиатских и нижневолжских месторождений.

Активное уменьшение выбросов серы энергоустановками может идти по трем направлениям:

- Очистка топлива на специальных перерабатывающих заводах

- Переработка топлива на самой ТЭЦ перед сжиганием
- Очистка продуктов горения (дымовых газов) от окислов серы.

Поскольку сера содержится в топливах главным образом в виде сложных полигетероциклических соединений, химически малоактивных и термостабильных, для выделения серы требуется воздействие высоких температур в сочетании с воздействием активных химических веществ.

#### Переработка сернистых топлив перед сжиганием

**Удаление серы из твердого топлива (угля).** Сера в твердом топливе содержится главным образом в трех формах: в виде включений колчедана  $FeS_2$ , в составе молекул органической массы, в сульфатной форме (сернокислых солях кальция и щелочных металлов).

Колчеданную серу можно отделить в процессе простейшего обогащения

угля, используя большую плотность колчедана ( $\sim 5 \text{ т/м}^3$ ) по сравнению с

остальной массой угля ( $\sim 2 \text{ т/м}^3$ ); однако это дает ощутимый результат

только в случае, если колчедан составляет достаточно значительную

величину от общей серы и включения колчедана достаточно крупны.

Отсепарированный колчедан может быть использован для получения

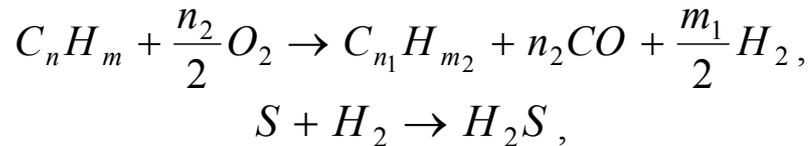
серной кислоты.

Для отделения от угля колчеданной и органической серы может быть применено гидротермическое обессеривание, заключающееся в обработке измельченного топлива в автоклавах при  $P=1,75 \text{ МПа}$  и  $T = 300^\circ \text{C}$  щелочными растворами, содержащими гидраты окисей натрия и калия. Полученный при этом уголь с малым содержанием серы отделяется от жидкости центрифугированием, а затем сушится. Жидкость, содержащая сульфаты натрия и калия, регенерируется в результате обработки  $H_2CO_3$ , а из полученного при этом сероводорода извлекается элементарная сера.

**Удаление серы из жидкого топлива (нефть, мазут)** может быть осуществлено с воздействием высоких температур двумя способами:

- с использованием окислителей (газификация)
- без использования окислителей (пиролиз).

**Процесс газификации** осуществляется при  $T \sim 900 - 1300^\circ\text{C}$  при ограниченном доступе кислорода в виде следующей итоговой реакции:



$$m_1 + m_2 = m; \quad n_1 + n_2 = n$$

В результате реакции образуется газ, горючими компонентами которого являются метан и его гомологи, окись углерода и водород. Из серы топлива при этом образуется сероводород, который является более активным веществом по сравнению с  $SO_2$ , и который должен быть удален перед поступлением горючего газа в топку котла.

Применяя паровоздушное дутье, можно получить газ с низкой теплотой сгорания ( $\sim 4.5 \text{ МДж/м}^3$ ), в которую переходит лишь 75% химической энергии топлива. При парокислородном дутье можно повысить теплоту сгорания до  $12 \text{ МДж/м}^3$ .

Эти варианты газификации осуществляются на специальных установках, один из примеров которых приведен на рис.4.

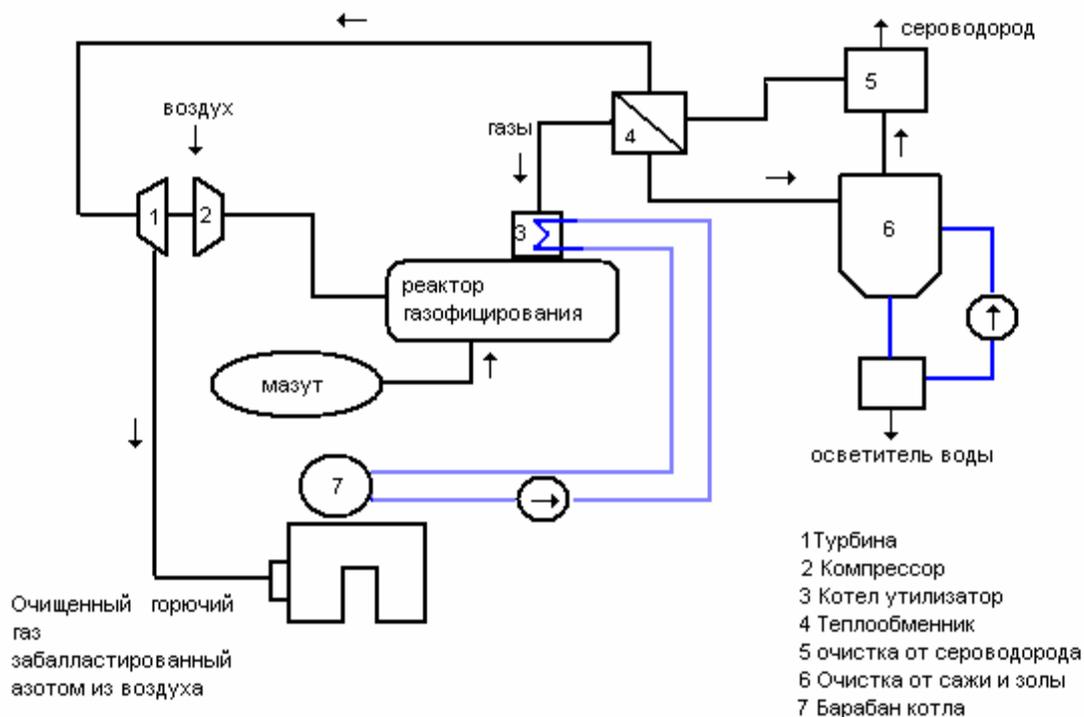


Рис.4. Схема установки ИВТ РАН - ВНИИНП по газификации мазута на воздушном дутье.

Для очистки горючего газа от сероводорода  $H_2S$  применяется метод адсорбции - поглощения вещества поверхностью сорбента, в качестве

используют карбонат кальция  $Ca_2CO_3$ , схема установки показана на рис.5. Аналогичные схемы используются фирмами Германии и США для перспективной газификации угля в кипящем слое на установках ПГУ, уменьшающих выбросы серы на 90% и выбросы теплоты на 40%.

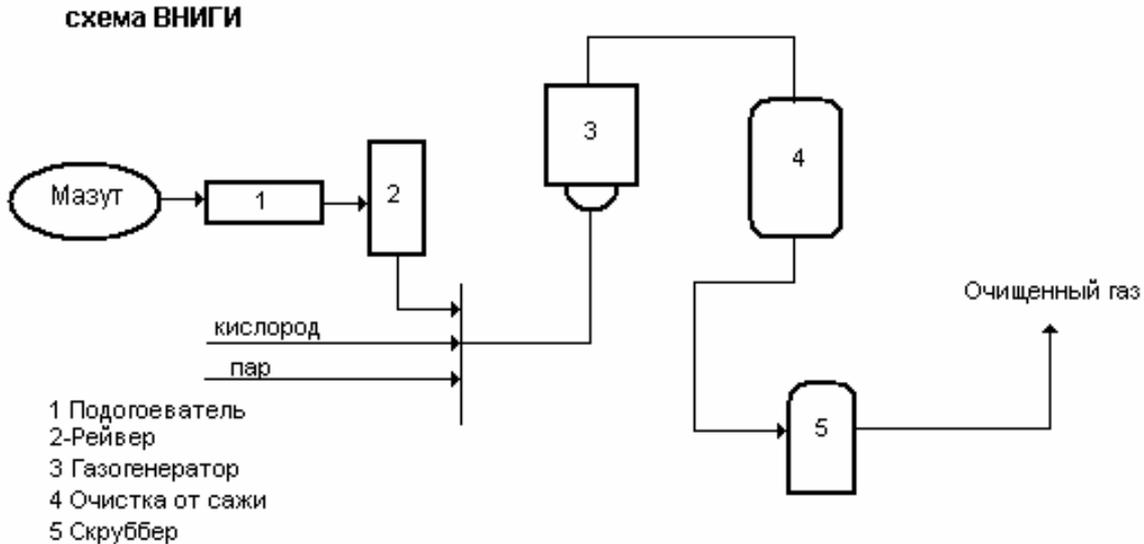


Рис.5. Схема установки ВНИГИ по очистке горючего газа от сероводорода.

- Процесс пиролиза** производится при нагревании мазута до 700 - 1000°С без доступа окислителя по следующим вариантам подвода теплоты:
- в движущимся слое твердого теплоносителя (восходящий и нисходящий потоки) кварца, нефтяного кокса с размерами частиц ~3-5мм для почти неподвижного слоя с малыми скоростями и до 1000ммк и менее в случае циркулирующего теплоносителя;
  - в потоке жидких теплоносителей (расплавы солей шлама);
  - в потоке перегретого пара;

Быстрый нагрев (за ~0,02 – 0,4с) приводит к разделению фракций и выделению горючего газа, который затем очищается от  $H_2S$ ; а также жидких конденсирующихся смолопродуктов, которые при охлаждении разделяются на легкие (бензол и другие, используемые как химическое сырье); и кроме того - тяжелых фракций, которые подвергаются повторному пиролизу или газификации (образуя нефтяной кокс).

Очистка горючего газа от сероводорода  $H_2S$  как обычно осуществляется абсорбцией - поглощением вещества из газообразной смеси объемом жидкости, например, раствора моно- и диэтанолamina при температуре 30 - 40°С в виде реакции



При  $T > 105^\circ C$  реакция идет в обратном направлении, с восстановлением моноэтанолamina, который направляется обратно в

абсорбер, а сероводород, десорбируемый из раствора. Схема установки дана на рис. 6.

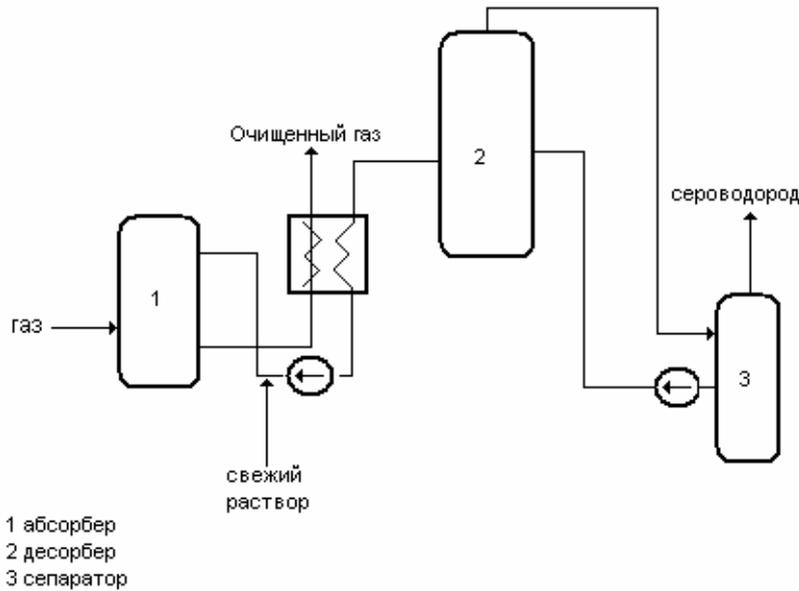


Рис.6. Схема установки для очистки горючего газа от сероводорода с регенерацией сорбента.

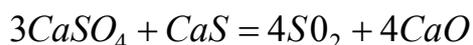
Абсорбция сероводорода может быть также осуществлена с помощью растворов солей щелочных металлов, в которых промывается газ, а раствор потом регенерируют продувкой сжатым воздухом.

Некоторые преимущества имеет вакуумный вариант процесса однако все “мокрые” способы (в раствор) сопряжены с охлаждением горючего газ, что вызывает большие тепловые потери. В связи с этим разрабатываются “сухие” способы очистки, например, использованием железной руды, при контакте  $H_2S$  с которой гидроксид железа переходит в сульфат железа, образуя ферросульфаты, которые затем регенерируются в процессе выжига в присутствии водяного пара с образованием элементарной серы. Так как содержание  $H_2S$  в горячем газе сравнительно велико, его улавливание происходит более эффективно, чем  $SO_2$ , и большинство способов очистки являются более рентабельными.

Помимо высокотемпературных процессов очистки жидкого топлива от серы, может применяться также гидроочистка, протекающая при температуре 300 - 450°C и давлении 10МПа в присутствии катализаторов (окислов молибдена, кобальта, никеля) Она сводится к взаимодействию водорода с сероорганическими соединениями, дающими сероводород  $H_2S$ , который затем улавливается по приведенным выше способам. Однако происходящее отравление дорогих катализаторов и необходимость их замены ведет к удорожанию этого метода.

## Связывание серы при сжигании в кипящем слое

Топливо (твердое, газ и жидкое) может сжигаться в кипящем слое размолотого известняка, в который погружены для интенсивного охлаждения поверхности нагрева котла. При температуре 900°С происходит диссоциация  $CaCO_3$  на  $CO_2$  и  $CaO$ , в реакцию с серой вступают  $CaO$ , образуя в конечном итоге сульфат кальция  $CaSO_4$ . Степень очистки топлива от серы достигает 90%. Часть кипящего слоя, поглотившего серу топлива, затем подается на регенерацию при температуре 1000 - 1500°С продуктами сгорания по реакции



Газообразные продукты реакции содержат до ~10% сернистого ангидрида, который может быть использован для производства серной кислоты, а регенерированная окись кальция возвращается в топочное устройство котла.

**Для осуществления этого способа требуется создание принципиально новых конструкций котла, подготовки фракций известняка, установок для регенерации.**

## Очистка продуктов сгорания от окислов серы

При сжигании топлива обычным путем (без  $CaCO_3$ ) почти вся содержащаяся в них сера находится в дымовых газах в форме окислов  $SO_2$  ( $\approx 99\%$ ) и  $SO_3$  ( $\approx 1\%$ ).

Применение *«мокрых» способов очистки* с помощью скрубберов, то есть, установок для промывки дымовых газов водой, позволяет поглотить достаточно существенную часть  $SO_3$  (с образованием серной кислоты  $H_2SO_4$ ) и лишь в малой степени -  $SO_2$ .

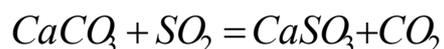
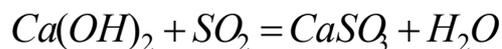
Для увеличения поглощения  $SO_2$  при малых концентрациях в дымовых газах необходимо использовать более эффективные поглотители – водные растворы или взвеси веществ, переводящие окислы серы в сульфаты и сульфиты.

При этом все *«мокрые»* способы разделяются на две группы:

- с использованием уловленной серы,
- без ее использования.

**В способах первой группы** в качестве таких поглотителей может быть использован известняк  $\text{CaCO}_3$  (карбонат кальция) или известь (гидрид окиси кальция).

Метод очистки основан на нейтрализации сернистой кислоты, получившейся в результате растворения  $\text{SO}_2$  из дымовых газов щелочными реагентами с протеканием следующих реакций



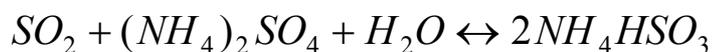
В результате получается сульфит кальция, частично окисляющийся в сульфат, который, однако, в большинстве случаев не используется и направляется в отвал, хотя возможно было бы его применение в качестве строительного материала.

**К способам второй группы** относится сульфитный способ очистки газов от  $\text{SO}_2$ , осуществляемый при низкой температуре около  $40^\circ\text{C}$  по реакции

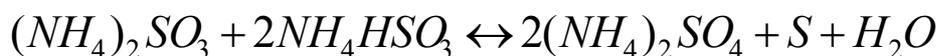


Образующийся раствор сульфит-бисульфит поступает в испаритель-кристаллизатор, где при нагреве до  $110^\circ\text{C}$  происходит разложение этого продукта на сульфит натрия, который затем окисляется до сульфата натрия и выводится из системы, и двуокись серы, используемую в качестве товарной продукции. Степень очистки дымовых газов от  $\text{SO}_2$  достигает 90%.

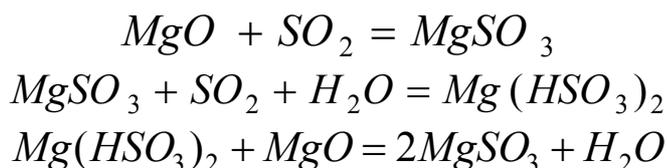
Близким к этому способу является *аммиачно-циклический*, при котором используется реакция



Отреагировавший раствор сульфит-бисульфита аммония нагревается до кипения для разложения на сульфат аммония и двуокиси серы. Выделение других солей побочных реакций осуществляется в автоклаве при повышенной до  $140^\circ\text{C}$  температуре с образованием сульфата аммония и элементарной серы по реакции



Большую степень очистки (до 90 -92%) обеспечивает *магнезитовой* способ связывания  $\text{SO}_2$ , который осуществляется по следующим реакциям



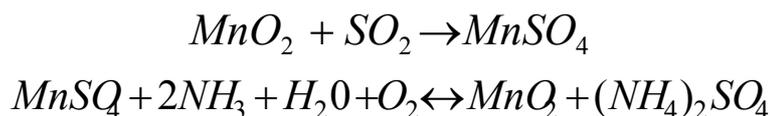
Образовавшийся сульфит магния  $MgSO_3$  направляется на дальнейшую переработку, где в процессе обжига при 800 - 900°C подвергается термическому разложению с выделением исходных концентрированных продуктов



Окись магния возвращается в процесс, а концентрированный  $SO_2$  перерабатывается в серную кислоту или в элементарную серу.

**При всех «мокрых» способах очистки дымовых газов от окислов серы температура уходящих газов снижается с 130-170°C до 20-50°C, что резко ухудшает рассеивание остаточных примесей в атмосфере, поскольку охлажденные газы слабо поднимаются над устьем дымовой трубы, и необходим их подогрев.**

При «сухих» методах сероочистки в качестве абсорбентов применяются окиси алюминия, марганца, железа, калия, активированный уголь, полукокс, которые обеспечивают степень очистки до 90%. Примером происходящих реакций может служить обработка дымовых газов окисью марганца с дальнейшей обработкой получаемого сульфата марганца аммиаком:



Однако вследствие больших потерь абсорбента эксплуатационные потери при сухих способах очистки обычно оказываются выше, чем при мокрых.

### 3.2.2. Снижение выбросов окислов азота

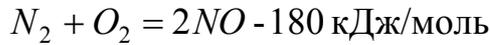
Окислы азота (очень токсичные) образуются за счет окисления азота, содержащегося в топливе и в воздухе, поэтому они обнаруживаются в продуктах сгорания всех видов топлива.

Наиболее полно совокупность явлений, происходящих при этом, может быть описана на основе теории академиков Н.Н. Семенова, Я.Б. Зельдовича и Д.А. Франк-Каменецкого.

Условием окисления азота воздуха является диссоциация молекулы кислорода воздуха под воздействием высоких температур, идущая с поглощением теплоты:



Атомарный кислород реагирует с молекулой азота, а образовавшийся в результате эндотермической реакции атомарный азот вступает в экзотермическую реакцию с молекулярным кислородом, имеющую сложный цепной характер.



В результате реакций в топочной камере образуется в основном окись азота NO (более 95%). Образование двуокиси NO<sub>2</sub> за счет окисления NO требует значительного времени и происходит при низких температурах в основном уже в атмосфере окружающей среды после выхода газов из дымовой трубы.

Изменение концентрации NO в единицу времени по итогам реакций описывается соотношением:

$$\frac{dC_{NO}}{d\tau} = K_1 C_{N_2} C_{O_2} - K_2 [C_{NO}] \quad (35)$$

где  $K_1, K_2$  – константы и концентрации.

Равновесная концентрация NO получается из последнего выражения при  $\frac{dC_{NO}}{d\tau} = 0$ . Отсюда при известных значениях констант следует

$$[C_{NO}] = 4,6 \sqrt{C_{O_2} C_{N_2}} \exp\left(-\frac{90 \cdot 10^3}{RT}\right) \quad (36)$$

При рассмотрении первого источника образования NO в топках котлов вместо концентрации кислорода применяется величина избытка воздуха  $\alpha$  при следующей связи между ними:

$$C_{O_2} = 300 \frac{(\alpha - 1)V_0}{V_\Gamma}, \quad (37)$$

где  $V_0$  – теоретическое количество сухого воздуха, необходимое для полного сгорания 1 кг топлива при  $\alpha = 1$ ,  $V_{\Gamma}$  – объем дымовых газов, образующихся из 1 кг топлива при полном сгорании с  $\alpha = 1$ . Так как  $V_{\Gamma} = V_{\Gamma}^0 + (\alpha - 1)V^0$ , можно получить

$$C_{O_2} = 300 \frac{\alpha - 1}{V_{\Gamma}^0 / V^0 + \alpha - 1} \quad (38)$$

Рассматривая величину  $\Delta \alpha_{\Gamma} = \frac{V_{\Gamma}^0}{V^0} - 1$  как увеличение теоретического объема газов по сравнению с теоретическим объемом воздуха, необходимого для полного сгорания, можно получить уравнение для равновесной концентрации

$$[C_{NO}] = 2500 \sqrt{\frac{\alpha - 1}{\alpha + \Delta \alpha_{\Gamma}}} \exp\left(-\frac{10,8 \cdot 10^3}{T}\right), \quad (39)$$

где величина  $\Delta \alpha_{\Gamma}$  колеблется в пределах 0,04-0,10 для каменных углей, 0,15-0,20 – для бурых углей, 0,075 – для мазута и 0,125 – для природного газа.

Изменение избытка воздуха от  $\alpha = \infty$  (чистый кислород) до  $\alpha = 1,2$  при той же температуре горения снижает содержание NO примерно вдвое.

Вторым источником образования окислов азота является связанный азот твердых и жидких топлив, концентрация которого  $N^{np}$  определяет выход окиси азота

$$C_{NO}^T = 10 m \frac{N^{np}}{V_{\Gamma}^{np}}, \quad (40)$$

где  $V_{\Gamma}^{np}$  – объем газов на 1 МДж теплоты топлива,  $m = 0,2$  для крупных паровых котлов и 0,4 - для мелких.

Общее количество окислов NO определяется суммированием двух источников

$$C_{NO} = C_{NO}^{возд} + C_{NO}^{топл} \quad (41)$$

#### *Методы подавления образования окислов азота в топках котлов*

Из анализа, сделанного выше по основным факторам образования окислов азота, вытекают следующие методы их подавления в топочной камере.

1. Снижение температуры газов в зоне горения посредством возврата (рециркуляции) дымовых газов в топочную камеру. Использованные газы

с температурой 300 - 400°C (обычно после водяного экономайзера) специальным дымососом направляются в топку либо через горелки, либо подмешиваются в дутьевой воздух перед горелками в количестве 20-25%, что позволяет снизить содержание NO на 40-50%.

2. Уменьшение коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  до 1,03-1,07 позволяет снизить концентрацию NO на 20-30% от уровня их содержания в 900-1500 мг/м<sup>3</sup> при  $\alpha = 1,12-1,20$ , но может приводить к механическому недожогу твердого топлива, нужна точная дозировка воздуха в каждую горелку.

3. Двухстадийное сжигание топлива – наиболее радикальный способ снижения образования NO (на 25-50%), когда в первичную зону горения подается воздуха меньше, чем это теоретически необходимо для сжигания топлива ( $\alpha = 0,8-0,85 < 1$ ) и следовательно снижается температура горения в ней, а затем во вторичную зону попадает чистый воздух или обедненная топливная смесь для дожигания продуктов неполного сжигания в первичной зоне ( $\alpha = 1,025 < 1$ ).

4. Применение специальных горелочных устройств для организации двух- (и более) стадийного горения или получения растянутого по длине топочной камеры факела.

5. Подача воды и пара в зону горения ( $\approx 5-10\%$  от всего количества воздуха) для снижения температурного уровня в топке (как и в методе подачи рециркулирующего газа).

6. Снижение теплового напряжения (теплового потока) в топочном объеме за счет увеличения габаритов камеры с целью уменьшения температуры в ней.

7. Увеличение степени экранизации топки (применение двухсветных экранов) с той же целью снижения температуры в ней, поскольку при этом больше тепла воспринимается рабочим теплом.

Перечисленные способы при комплексном применении могут существенно понизить образование окислов  $NO_x$  особенно в топках на природном газе (в 5-10 раз), несколько меньше на жидком топливе (в 3 раза) и ограниченно на твердом топливе (в 2 раза).

#### Удаление окислов азота из дымовых газов

Удаление окислов азота из дымовых газов считается возможным, но не получило широкого распространения из-за трудностей, связанных с низкой их концентрацией и чрезвычайной химической устойчивостью (особенно окиси азота).

Возможным считается два направления очистки: улавливание окислов с последующей переработкой в товарную продукцию (азотная кислота, азотнокислые соли) и разрушение окислов до нетоксичных составляющих.

В первом способе используются уже рассмотренные выше процессы абсорбции (во всем объеме) и адсорбции (на поверхности) поглотителей, например, щелочей ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) и растворов аммиака при абсорбции или силикогелей и торфощелочных сорбентов при адсорбции.

### 3.2.3. Особенности газовой очистки на АЭС

Специфической особенностью газовых выбросов на АЭС является наличие радиоактивных инертных газов – аргона, ксенона, радона и других, образующихся в процессах первичных и вторичных ядерных реакций. Газовая очистка в этих условиях производится по двум направлениям.

1) Газообразные и аэрозольные отходы из монтажных пространств, боксов парогенераторов, защитных кожухов оборудования вентилируются в воздушных потоках на фильтрах из тканей, волокнистых, зерновых и керамических материалов. Здесь убирается большая часть аэрозолей (до 99,9%). Далее эти потоки направляются в газовые отстойники (газгольдеры), где разлагаются короткоживущие изотопы азота, аргона, хлора и др. Однако при выдержках в газгольдерах возможно образование высокой концентрации водорода ( $\text{H}_2$ ), который сжигается химическим путем на палладиевом катализаторе при подводе кислорода ( $\text{O}_2$ ).

2) Вторым направлением обработки газов АЭС является сорбция радиоактивных изотопов на активированном угле, или других органических и неорганических сорбентах.

### 3.2.4. Снижение выбросов твердых частиц

Способы улавливания твердых частиц из дымовых газов тесно связаны с физико-химическими характеристиками летучей золы – ее плотностью, дисперсионным составом (распределением частиц по размерам), электрическим сопротивлением, слипаемостью.

В соответствии с этими основными типами золоулавливающих устройств на ТЭС являются: инерционные (циклонные) установки в «сухом» и «мокрым» исполнении; тканевые и другие (в том числе керамические) фильтры; электрофильтры; а также комбинированные установки.

**Батарейные циклоны** используют инерционность движения твердых частиц повышенной плотности в потоках дымовых газов (с коэффициентом улавливания от 75-80% до 92-94%). Основываются на

следующей схеме материального баланса при движении в криволинейном канале (рис.7):

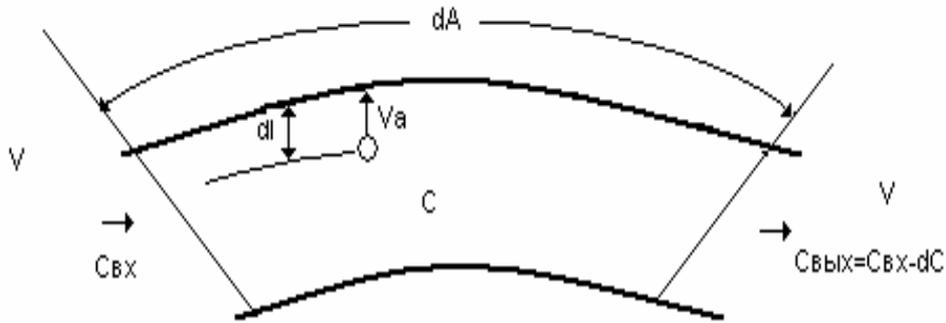


Рис.7. Расчетная схема инерционного золоулавливания.

Изменение массы  $G$  запыленного потока между двумя выделенными на рис.13 сечениями в единицу времени составляет:

$$dG = G_{\text{вых}} - G_{\text{вх}} = V(C_{\text{вх}} - dC) - VC_{\text{вх}} = -VdC, \quad (42)$$

где  $V$  –объемный расход дымовых газов, м<sup>3</sup>/с;  $C$  – концентрация золы в них, кг/м<sup>3</sup>.

Поскольку изменение массы  $dG$  происходит вследствие осаждения частиц на поверхности  $dA$  стенки криволинейного канала под действием центробежных сил при средней скорости смещения частиц  $V_a$  и их концентрации  $C_a$ , то

$$dG = V_a C_a dA. \quad (43)$$

Отсюда следует

$$dC/C_a = -\frac{V_a}{V} dA = -d\Pi, \quad (44)$$

где  $d\Pi$  - параметр золоулавливания.

Полученное соотношение легко интегрируется в следующих случаях:

1. Если скорость дрейфа частиц  $V_a$  остается неизменной вдоль всей поверхности осаждения, то для параметра золоулавливания следует простое выражение

$$\Pi = \frac{V_a}{V} A \quad (45)$$

2. Если в потоке с достаточно мелкими частицами осуществляется активное турбулентное перемешивание, когда можно принять, что концентрация частиц у стенки мало отличается от средней в рассматриваемом сечении канала, то есть  $C = C_a$ , то

$$\varepsilon = \frac{C_{\text{был}}}{C_{\text{вх}}} = \exp(-\Pi), \quad (46)$$

где параметр  $\varepsilon$  характеризует степень проскока частиц.

3. Если в потоке осадительные силы полностью отсутствуют или настолько малы, что можно принять неизменной и одинаковой концентрацию частиц у поверхности стенки канала и во входном сечении, то есть  $C_a = C_{\text{вх}}$  (это может наблюдаться либо при ламинарном течении, либо при очень крупных частицах), то

$$\varepsilon = 1 - \Pi, \text{ или } \eta = \Pi, \quad (47)$$

где  $\eta$  – степень улавливания.

Общее решение для рассмотренных случаев представлено на рис.8.

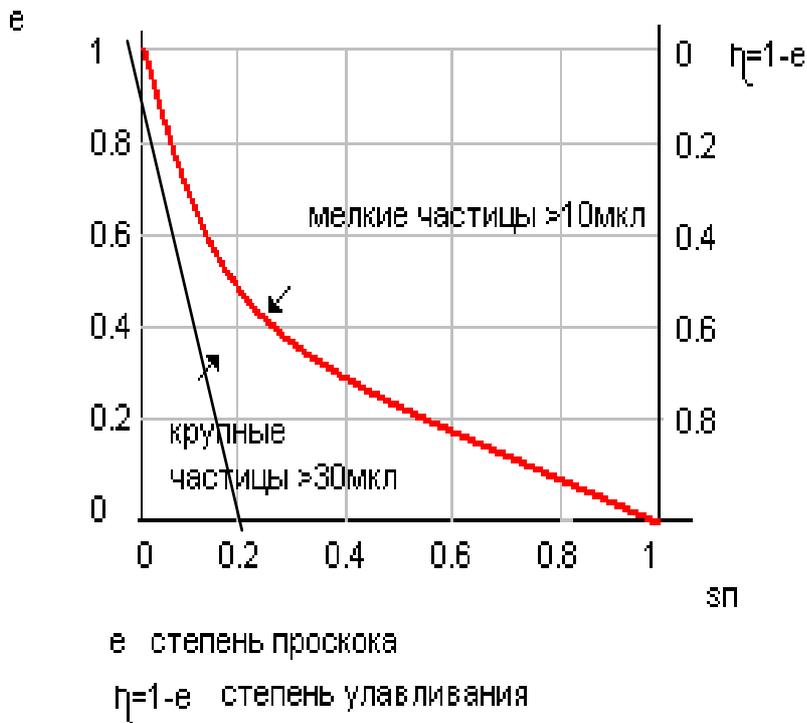


Рис. 8. Изменение степени проскока и улавливания частиц.

Рассмотренные принципы реализуются в инерционных (циклонных) золоуловителях, общая конструктивная схема которых показана на рис.9.

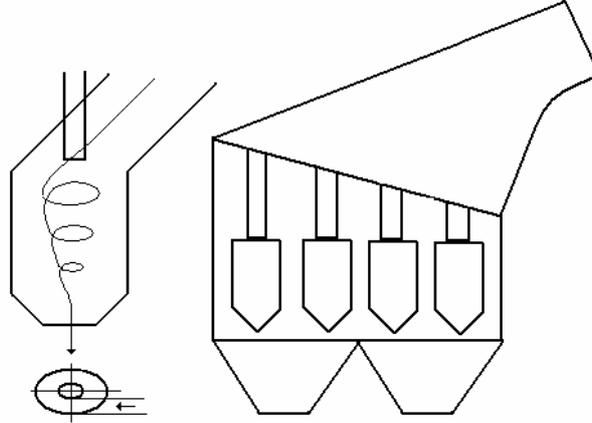


Рис.9. Конструктивная схема циклонных золоуловителей.

Сухие инерционные золоуловители (циклоны) обеспечивают степень очистки дымовых газов от 70 - 75 до 80 - 85% в зависимости от характеристик летучей золы.

Для повышения эффективности очистки до 90 – 97% используется «мокрый» вариант циклонных золоуловителей (скрубберов). Их отличие от «сухого» варианта заключается только в наличии на стенках стекающей пленки воды, что уменьшает вторичный захват потоком отсепарированной за счет центробежных сил золы и способствует ее лучшему отводу в приемный бункер.

Существенное значение для эффективной работы циклонов, наряду с рассмотренными характеристиками, имеет свойство слипаемости золы (цементации из-за содержания свободной извести СаО). По этому показателю различаются четыре группы: I группа – не слипающиеся золы; II группа – слабо слипающиеся; III группа – средне слипающиеся; IV группа – высоко слипающиеся. Золы с высокой слипаемостью сильно забивают циклоны и плохо удаляются из бункеров.

**Тканевые (рукавные) фильтры**, основанные на отделении из фракционного (дисперсионного) состава золы частиц больших размеров, в системах очистки на электростанциях широкого распространения не получили из-за больших габаритов и низкого срока службы, хотя работы по перспективным материалам продолжают. В частности, рассматриваются: стекловолокно,(в том числе армированное графитом),

полиэфир, различные сорта керамики, опытные образцы которых обеспечивают очистки до 99,5 - 99,9%

**Электрофильтры** являются наиболее перспективными типом очистителей с коэффициентом улавливания 0,99-0,995% при малом гидравлическом сопротивлении.

В электрофильтрах задымленный газ движется по каналам, образованным осадительными электродами, между которыми через определенные расстояния расположены коронирующие электроды. К осадительным электродам подведен положительный, а к коронирующим – отрицательный полюс постоянного тока высокого напряжения. При достаточной напряженности электростатического поля происходит ионизация дымовых газов, и частички золы получают заряд (обычно отрицательный), в затем они под действием электростатических сил осаждаются на положительных осадительных электродах. Далее с помощью ударных механизмов они стряхиваются с электродов, попадая в бункер под действием силы тяжести.

Эффективность электрофильтров зависит от электропроводности золы, по величине которой выделяются три группы: I группа зол с высокой электропроводностью ( $\rho < 10^2$  Ом·м) легко теряет электрический заряд и легко приобретает; II группа со средней проводимостью ( $10^2 < \rho < 10^8$  Ом·м); III группа – электрические изоляторы ( $\rho > 10^8$  Ом·м), уменьшают напряженность поля. Наибольшая эффективность достигается при средней электропроводности для зол II группы; при низком удельном сопротивлении (I группа) возможен вторичный срыв и унос частиц, так как они быстро теряют электрический заряд и плохо держатся на электродах; при высоком сопротивлении (III гр.) падает скорость дрейфа частиц и может возникнуть обратная корона, вызывающая пробой слоя золы на осадительных электродах. Снижение электрического сопротивления достигается при кондиционированием дымовых газов водой, сернистым ангидридом, аммиаком и др., а также при повышении температуры газа.

**Комбинированные золоулавливатели** включают электрофильтры и предвключенные батарейные циклопы или мокрые инерционные уловители (скрубберы).

Кроме летучей золы, выбрасываемой из дымовых труб, локальное загрязнение атмосферы приземных слоев происходит от пыления золоотвалов ТЭС, для устранения которого предусматривается покров золы грунтом с посевом травы или утрамбовкой поверхности, поливом водой или специальными закрепляющими составами типа жидкого стекла, полимерным материалов и т.п.

### 3.3. Активные методы очистки сточных вод ТЭС

Для очистки производственных сточных вод в настоящее время применяют самые разнообразные методы физико-химической технологии, существенно различающиеся как по характеру используемых процессов, так и по технологическому оформлению.

Обычно методы очистки сточных вод подразделяются на физические (механические), физико-химические, химические и биологические. Подбор наиболее эффективного метода осуществляется в зависимости от типа удаляемых примесей в загрязненной воде, прежде всего, в зависимости от гомогенного или гетерогенного характера образованной при этом системы, которые в свою очередь подразделяются на ионные, молекулярные, коллоидные растворы и взвеси. В каждой из этих четырех групп (систем) подобраны соответствующие наиболее эффективные методы очистки.

Классификация и содержание основных типов водных загрязнений и методов их очистки, применяемых промышленности, в том числе энергетике, представлены на этой основе в табл.16.

Таблица 16.

Классификация и содержание основных типов водных загрязнений и методов их очистки

<i>Гетерогенные системы</i>		<i>Гомогенные системы</i>	
<i>Взвеси:</i> -суспензии и эмульсии, обуславливающие мутность воды; -патогенные микроорганизмы и планктон	<i>Коллоидные растворы:</i> -коллоидные и высокомолекулярные растворы, обуславливающие окисляемость и цветность воды; -вирусы	<i>Молекулярные растворы:</i> -газы, растворимые в воде; -органические вещества, придающие воде запах и привкус	<i>Ионные растворы:</i> -соли; -кислоты; -основания; придающие воде жесткость и щелочность
1	2	3	4
Механическое	Обработка:	Десорбция газов и	Перевод ионов в

безреагентное разделение: -седиментация -фильтрование микропроцеживание центрифугирование	-хлором, двуокисью -озоном -др. окислителями	легких летучих органических соединений при аэрировании	малодислоцированные соединения; -нейтрализация -образование комплексных ионов.
<b>Продолжение таблицы 16</b>			
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Добавление реагентов с последующим отстаиванием и фильтрованием	Адсорбция на гидроокисях алюминия и железа, а также на высокодисперсных глинистых минералах с последующей коагуляцией в свободном объеме или контактной коагуляцией	Обработка: -хлором -двуокисью Cl, -озоном другими окислителями	Перевод ионов в малорастворимые соединения: -образование малорастворимых солей, -гидратов окислов, -окисление закисных форм металлов
Адгезия на гидроокисях алюминия и железа и на глинистых минералах с посредствующим удалением из воды путем отстаивания и фильтрования	Адгезия при помощи высокомолекулярных флокулянтов катионного типа (типа взаимного прилипания твердых тел при контакте)	Адсорбция на активированных углях; и других сорбентах (поглощение на поверхности)	Фиксация ионов на твердой фазе ионитов: Н- катионирование ОН- анионирование
Агрегация при помощи флокулянтов (солей, кремниевой кислоты, поверхностно- активных веществ ПАВ и др.) с последующим удалением фильтрованием -слипание биологических клеток в многоклеточные образования	Воздействие на вирусы -окислителями -излучениями: ультрафиолет (УФО) ультразвуком (УЗО) другим излучением и. ионами тяжелых металлов (меди, серебра), замутнителями с последующим удалением из воды	Экстракция органическими растворителями: -бутилацетатом -этилацетатом (вытягивание, разделение смесей с помощью растворителя)	Сепарация (отделение) ионов при различном фазовом состоянии воды: перевод воды в газовое состояние (испарение и дистилляция), -перераспределение ионов в несмешивающихся жидкостях (экстракция), -перевод воды в твердое состояние (вымораживание),

Флотация - отделение пустой природы методом всплывания с пузырьками воздуха	Ультрафильтрация-отделение коллоидных через малопроницающие перегородки	Эвапорационная очистка методом: азеотропной отгонки не разделяющейся на части смеси при выпаривании	Использование подвижности ионов в электрическом поле (электродиализ)
<b>Продолжение таблицы 16</b>			
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Воздействие на патогенные микроорганизмы и споры -окислителями (хлором и двуокись хлора, озоном и йодом) -излучениями: -УФО -УЗО - и др. -ионами тяжелых металлов (Cu, Ag и др.) -замутнение с последующим удалением их из воды	Использование методов обработки воды: - электрическими полями (электрокоагуляция, электрофорез) -магнитными полем для удаления ферромагнитных примесей (перенос дисперсных частиц или газовых пузырей в растворе под действием электромагнитных сил	Использование мембран для отделения газов	Использование метода обратного осмоса (филтпропрессовые, рульные, трубчатые и др. мембраны), -магнитного и акустического полей (осмотическое проникновение сквозь полупроницаемую перегородку, разделяющую раствор и чистый растворитель)

Применение методов групп 1 и 2 приводит к выделению примесей из воды без изменения их химического состава, а методов групп 3 и 4 - с его изменением.

Наибольшее распространение на ТЭС для промышленной очистки сточных вод нашли методы 1 - ой группы (в основном, отстаивание, флотация и фильтрование), методы 2-ой группы ( коагуляция и сорбция, в том числе ионный обмен), 3-й группы (известкование, процессы разложения и окисления веществ).

### 3.4. Особенности очистки сточных вод АЭС

Специфической особенностью сточных вод АЭС является возможность наличия в них радиоактивных загрязнений, которые должны быть

удалены до достижения необходимых ПДК. Очистка производится с использованием специальных установок типа СВО (специальная водоочистка), разработанных для АЭС с реакторами различных типов (ВВЭР, РБМК) и различных схем (одноконтурных, двухконтурных), жестко привязанных к используемой технологии.

Все типы спецводоочистки работают по безопасному принципу, когда часть воды из соответствующего контура выводится для очистки, а очищенная вода возвращается обратно в контур. Типовая схема очистки содержит механические фильтры, испарители, ионообменные фильтры (смолы); дистилляторные и выпарные установки, отходы от работы которых захорониваются на территории станции.

#### **4. Гибридные методы контроля загрязнений природной среды при энергофизическом мониторинге**

Контроль параметров природной среды при энергофизическом мониторинге представляет задачу существенно более сложную, чем те, с которыми приходится сталкиваться в отдельных областях техники, химии, физики, биологии. Большое количество нормируемых химических компонентов и физических параметров, сложность и непредсказуемая изменчивость состава отбираемых проб, глобальные масштабы полей отбора, человеческий фактор, часто направленный на сокрытие следов экологических нарушений и аварий, требует особого подхода к организации такого контроля.

Принципиально при этом можно использовать все многообразие применяемых методов и средств исследований в других областях, но специфическими для контроля параметров природной среды являются гибридные методы, сочетающие в едином процессе отбор пробы (пробоотбор), пробоподготовку и определение целевых компонентов пробы с измерениями, не требующими аналитических методов. В общем случае гибридные методы контроля параметров природной среды должны объединять в едином цикле как минимум два различных селективных процесса, имеющих различные механизмы селективности по отношению к определяемым показателям. Необходимость высокой избирательности применяемого метода в условиях сложности и слабой предсказуемости появления и состава загрязнений, особенно при нелегальных выбросах, и в то же время практическое отсутствие ограничений по объему пробы создают возможность успешного использования на первом этапе контроля не только индикаторных (идентифицирующих) методов высокой чувствительности, но и относительно малочувствительных методов, требующих разделения и концентрирования определяемых веществ с одновременным их селективным извлечением из большого объема пробы. После этого на втором этапе гарантировано успешное применение высокоточного первичного преобразователя (датчика), селективного к определяемым веществам.

Возможные сочетания подобных методов в едином гибридном методе приведены в прогностической матрице (табл.17). Ее столбцы представляют известные методы разделения и/или концентрации компонентов пробы, а строки – методы получения идентифицирующего сигнала. Таким образом, клетки матрицы, образованные пересечением строк и столбцов, характеризуют гибридные методы, в том числе и новые, основанные на сочетании различных процессов пробоподготовки. и определения вещества. Добавление к матрице

дополнительных показателей, например, технического или экономического характера, приводит к трех- (и более) мерной классификации возможных гибридных методов. В техническом плане это может быть применимость метода, определяемая для известных методов по количеству опубликованных результатов апробации и патентов, а для неизвестных сочетаний – по двум обязательным критериям. Первый из них – принципиальная возможность получения идентификационного сигнала от обнаруживаемого вещества загрязнения (например, совместимость метода анализа и фазового состояния объекта этого анализа). Второй – возможность существования двух (и более) идентификационных процессов, способных обнаружить и вовлечь в анализ одно и то же вещество (группу веществ) загрязнителя.

Наиболее целесообразным является такое построение автоматизированных систем гибридного контроля, когда полученный идентифицирующий сигнал сам формирует взятие и подготовку пробы для количественного анализа, а в качестве транспортной (подвижной) фазы выступает сама проба. Основанные на этом подходе аналитические системы фактически «сами себе» приготавливают в ходе анализа

### Прогнозная матрица гибридных методов

*Условные обозначения:* + известен; ++ широко применяется; +++ лидирует; 0 возможен

<i>Методы определения целевых компонентов пробы</i>		<i>Методы</i>		
		селективная сорбция - десорбция из потока пробы	Проточно-инжекционные методы	
			прямой (инжекция пробы в поток с реагентом)	Обратный (инжекция реагента в поток пробы)
1		2	3	4
Анализ	химическая дериватизация (окрашивание)	*	+++	+

на основе	фотохимическая дериватизация		*	*	*
химических процессов	Пироли- ти- ческая дериват и- зация	плазменно-ионизационный метод	+	0	-
		плазменно-фотометрический метод	+	0	-
Анализ на основе электрохимических процессов	Кондуктометрический метод		+	+	+
	Вольтамперометрический метод		+	+	0
	Ионометрический метод		+	+	0
Анализ на основе тепловых процессов	Калориметрические методы		+	+	+
	Катарометрические методы		+	-	-
	Криоскопические методы		+	-	-

препараты (растворы) сравнения и способны селективно концентрировать анализируемые вещества также в ходе анализа.

Примером подхода являются разработанные в НИЦБ РАН люминесцентные (флуориметрические) детекторы, обеспечивающие на три – четыре порядка более низкий предел обнаружения по сравнению с другими методами. Здесь в качестве источника возбуждения флуорисценции использовано тормозное излучение Черенкова-Вавилова, а дальнейшее взятие пробы и ее концентрирование (в 100 раз) осуществлено на слоевых селективных поглотителях (электрополяризуемых сорбентах), периодически десорбируемых с помощью смены знака поляризации для повторения проб. Система обеспечивает считывание фона - аналитического сигнала веществ в пробе без вклада от извлеченных «целевых» анализируемых веществ и способна в автоматическом режиме осуществить до 30 видов проб для детального химического анализа, зарегистрировать факт превышения нормального содержания компонента, подать сигнал тревоги.

Таблица 17

контроля параметров природной среды в энергофизическом мониторинге

без видимых преимуществ; - предположительно невозможен; \* возможен новый метод

<i>разделения и /или концентрирования пробы</i>						
электромиграционные методы			хроматографические методы			
Электр о- осажде ние	электрофорез		жидкостная хроматография			газовая и флюидная хроматогра- фия
	в непод- вижно м носителе	в поток е	в колонк е	в открытом слое сорбента		
				ТСХ	Проточн ая ТСХ	
5	6	7	8	9	10	11
-	+	*	+	+++	*	0
-	*	*	+	+	*	+
-	-	0	+	+	-	+++
-	-	0	+	+	-	+++
0	+	+	+++	-	*	+
+	+	+	+	-	+	+
-	-	*	+	-	*	-
-	-	0	+	-	0	+
-	-	-	-	-	-	+++
0	-	0	0	-	-	0

		1	2	3	4	
Анализ на основе процесс- сов взаимо- действи- я излуче- ния с вещес- твом	Опти- чес- кие мето- ды	рефрактометрические методы	0	0	-	
		методы на основе эффекта Керра	*	0	0	
		поляриметрич. методы	*	0	0	
		методы на основе эффекта Фарадея	+++	0	0	
		Люми- несце- нт- ные мето- ды	фотолюминесценция	+	+	+
			хемолюминесценция	*	+	+
			сонолюминесценция	*	0	0
			люминесценция в радиаторе Черенкова	*	*	*
			химическое тушение люминесценции	*	*	*
			хронолюминесценция	*	0	0
	фосфоресценция		*	0	0	
	радиолюминесценция	*	0	0		
	фотоабсорбционные методы	+++	+++	+		
	Моле- курн- о- спект- роско- пичес- кие мето- ды	спектрофотометрические методы		+	+	+
		спект- ро- флуор- и- метри- чес- кие мето- ды	эмиссии	+	+	+
			возбуждения	+	+	+
		магнито-резонансные методы		+	0	0
	масс-спектрометрические методы		+	0	0	

	Атомно-спектроскопические методы	рентгеновская эмиссия и флуоресценция		+	0	0	
		фотоэлектронная и Оже-спектроскопия		-	-	-	
		атомно-эмиссионная и флуоресцентная спектроскопия		+	0	0	
	Ядерно-спектроскопические методы	Мессбауэровская спектроскопия		-	-	-	
		активационный анализ		+	0	0	
		радиохимический анализ (метка)		+	0	0	
		Радиометрические методы	обратное рассеяние		+	0	0
			электронный захват		+	-	-
			тормозное излучение (эффект Вавилова-Черенкова)		*	0	0

Продолжение таблицы 17

5	6	7	8	9	10	11
-	+	+	+++	-	-	+
-	*	*	-+	-	-	0
-	+	*	+	-	-	+
-	*	*	+	-	-	0
-	+	+	+++	+++	+++	+
-	-	*	+	0	0	+

-	*	*	+	*	0	+
-	-	*	+	-	-	-
-	*	*	+	0	*	+
-	0	0	+	0	*	+
-	0	0	+	+	0	+
+	+	+	+	+++	+	+
+	+++	+++	+++	+++	+++	+++
+	+	+	+++	+	+	+
-	+	+	+	+	*	0
-	+	+	+	+	*	0
-	0	0	+	0	-	-
+	+	*	+	-	-	+++
+	+	0	*	+	0	0
+	0	-	-	+	-	-
+	0	*	+	0	-	+
+	+	-	0	+	-	-
+	+	+	+	+	-	+
+++	+	+	+	+	+	+
+	0	+	*	0	0	0
-	-	-	-	-	-	+++
+	*	*	*	0	0	0

## 5. Процедуры оценки и регулирования воздействий на окружающую среду

5.1. Международная практика проведения процедуры оценки воздействия на окружающую среду – ОВОС (основные принципы и методология)

Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) по определению одного из ее создателей Р. Манна означает деятельность, направленную на выявление и прогнозирование ожидаемого влияния на среду обитания, здоровье и благосостояние людей со стороны различных мероприятий и проектов, а также на последующую интерпретацию и передачу полученной информации. Главное значение методологии ОВОС состоит в создании научной основы по системе подготовки и принятии решений об экологической безопасности проектов, реализация которых может оказать воздействие на природную среду.

Для подготовки исходных материалов и проведения процедур ОВОС на качественном уровне целесообразно использовать метод, разработанный Л.Леопольдом с сотрудниками Геологической службы США. Метод получил название матрицы Леопольда. Матрица представляет собой контрольный список, который включает в себя качественную информацию о взаимосвязях типа «причина-следствие», и таким образом полезна в качестве источника информации о прогнозируемых результатах. Это открытая матрица, которая содержит около 100 наименований факторов воздействия (по одной оси) и условий окружающей среды (по другой оси). В общем виде матрица представляет собой таблицу следующего содержания (табл. 18).

Таблица 18

Матрица Леопольда

Экологические сектора (факторы)	Этапы жизненного цикла проекта			
	Подготовка	Производство	Использование	Уничтожение
Значительность отходов				
Загрязнение и деградация почвы				
Загрязнение воды				
Загрязнение воздуха				
Шум				
Потребление энергии				
Потребление сырья				

В матрице используются как качественные, так и количественные данные (шкала от 1 до 10000), однако она не содержит средств, позволяющих их различить. Кроме того, предсказуемые величины не учитывают в явной форме различия будущих состояний «при осуществлении вмешательства» и «при его отсутствии».

Мощным средством наглядного представления ОВОС является картографическое моделирование, дающее возможность комплексного анализа основных закономерностей структуры воздействия сложных процессов и структур в больших геосистемах. По каждому отдельному виду воздействия может использоваться отдельная карта анализируемой территории, но рекомендуется использовать не более 7-- 8 (максимум 10) карт, ячейки которых совмещаются либо последовательно, либо в отдельном сочетании.

Понятно, что объективность метода определяется достоверностью исходной картографической основы и квалификацией экспертов. Хотя при этом используются количественные данные, но сама оценка и принятие решений носит в большей степени качественный характер.

Попытка создания и практического использования количественных методов оценки воздействий на окружающую среду была реализована в лаборатории Бателле (США). Метод Бателле основан на анализе четырех основных категорий факторов (сфер): экологической, физико-химической, сферы чувственного восприятия и сферы человеческих взаимоотношений - социума. Для оценки каждого фактора в методе Бателле был разработан индекс качества окружающей среды, ранжирующий факторы от 0 до 1 по методу значимой функции. Каждый фактор-индикатор воздействия задается как разность между существующим и на момент оценки состоянием окружающей среды и ее состоянием после реализации воздействия, каждому из которых в окружающей среде присвоен свой относительный вес.

Для использования метода необходимая достоверная информация по назначению весовых коэффициентов единообразным образом всеми пользователями.

Наиболее эффективными подходами для этого является так называемое «имитационное» моделирование процессов и их многопараметрическая оптимизация (поиск наилучшего решения). Это, вообще говоря, осуществляется лишь по отдельно взятым (выделенным) доминирующим критериям, в предположении, что все остальные лежат в допустимой области ограничений.

Выполнение прогноза по частным математическим моделям позволяет получить тренды достаточно простых (в пределах возможной формализации) процессов, которые для дальнейшего анализа ранжируются по «действующим факторам», таким как избыточные выбросы и т.п.

Далее возможно создание банка (базы) данных ЭВМ, которые могут обрабатываться на основе так называемых экспертных систем, действующих по аналогии с уже рассмотренными проектами, но механизм выявления нестандартных ситуаций отсутствует.

Этот недостаток устраняется следующим приемом:

- автоматизацией системы (строится по адаптивному методу)
- диалоговым режимом работы группы экспертов на основе обсуждения первичного документа – «Заявления разработчика «воздействия на окружающую среду (ЗВОС)».

Подготовка ЗВОС преследует три цели:

- обеспечение гарантий того, что анализ окружающей среды производится до начала реализации проекта;
- облегчение оптимального выбора варианта проекта по критериям экологической безопасности;
- подготовка детального отчета о принятом природоохранном решении для последующей эксплуатации со стороны федеральных органов, конгресса, президента, Верховного суда, общественности.

Ответственность за подготовку ЗВОС возлагается на учреждение - заявителя (ведущего). Если проект предлагается или выполнен негосударственной организацией (например ЭС строится частной фирмой), то за подготовку ЗВОС отвечает Государственное ведомство, ответственное за проект перед федеральными органами (в данном случае – агентство, выдавшее лицензию).

В соответствии с установленными правилами по всем видам федеральных мероприятий (включая строительство, административные мероприятия, законодательные предложения, выдачу патентов, лицензий, разрешений, финансирование и др.), ЗВОС должен содержать:

- описание предложенного проекта, заявление о целях и описание подвергающихся влиянию объектов окружающей среды;
- рассмотрение взаимоотношений между планируемым использованием земли, программными мероприятиями и контролем за районами, подвергающимися воздействию;
- сведения о позитивном или негативном, вторичном или косвенном, а также прямом или непосредственном вероятном воздействии; сведения о вероятном воздействии на окружающую среду соседних государств;
- рассмотрение альтернативных вариантов;

- возможные вредные влияния, которых нельзя избежать в результате технологической недостижимости их подавления на современном уровне знаний;
- взаимоотношения между локальным и краткосрочным использованием природной среды, включая эксплуатацию природных ресурсов, с прогнозом последствий этих действий;
- сведения о невыполнимых и необратимых потерях природных ресурсов;
- описание федеральных компенсаций, возмещающих ущерб природной среде, который наносится в результате вредных воздействий предложенного проекта или его вариантов;
- заключения и комментарии, поступившие от рецензентов.
- Основой оценки воздействия на окружающую среду является базовая концепция и содержательное описание возможных вариантов развития ожидаемых событий (сценариев) в процессе реализации рассматриваемого проекта.

Разработка сценариев для сложных комплексных проектов предусматривает введение некоторых допущений относительно тех действующих факторов, количественные показатели которых не поддаются прямому измерению или формализации. Обоснование таких допущений должно приводиться в ЗВОС как реперная (отправная) точка для экспертной группы.

Цель процедуры ОВОС – обеспечение экологически безопасного развития. Эта цель в большинстве проектов представляется в виде системы ограничений, затрудняющих или удорожающих реализацию проекта. Разработчики ОВОС, имеющие опыт острых дискуссий с авторами и лоббистами проектов, с целью утверждения своих заключений используют чрезвычайно эффективный прием – так называемый метод перевоплощения. В соответствии с ним разработчик ОВОС берет за основу расчетные модели целевых процессов будущего объекта, указанные в ЗВОС, вводит критерий экологической безопасности и повторяет расчеты авторов проекта. Такой прием особенно эффективен, если авторы проекта принимают концепцию минимализации воздействия, а исходная информация достоверна. Если же в ней есть неопределенность, то разработчики ОВОС вправе потребовать от авторов проекта раскрытия этой неопределенности и дополнительной проработки ЗВОС, который является основополагающим документом для дальнейшего рассмотрения.

Итоговым документом ОВОС является экспертное заключение и предварительный вариант рекомендации по ЗВОС для органов, принимающих решение о разрешении реализации проекта (без доработки, с доработкой, с запрещением). Оно публикуется в официальном издании.

Принятая в США процедура ОВОС показана в табл.19.

### Организация процедур ОВОС в США

№ п.п.	Этапы прохождения проекта	Участвующие инстанции						
		Общественность	Государственные и местные агентства	Федеральные агентства и эксперты	Совет по качеству окружающей среды	Проектировщик	Конгресс президент секретарь	Суд
1	Предложения по проекту					Д		
2	Решение о природоохранной значимости				К	Р	юридический отвод решения	Р
3	Оценка окружающей среды, подготовка ЗВОС	Общественные слушания К	К	К	К			
4	Обработка проекта ЗВОС							
5	Рецензирование ЗВОС	КЗ	КЗ	КЗ	О			
6	Подготовка окончательного ЗВОС					Р		
7	Окончательная обработка ЗВОС и передача рекомендаций ответственному лицу	О	О	О	О		Судебное разбирательство адекватности ЗВОС	Р
9	Передача рекомендаций лицу, принимающему решение					Р	Р	
10	Начало внедрения проекта						Судебное разбирательство	Р

							решения	
--	--	--	--	--	--	--	---------	--

Обозначения: **Д** - пакет документов; **О** – обработка документов; **Р** - принятие решения; судебное отклонение решения; **КЗ** – критические замечания; **К** - консультации, рецензии и экспертные заключения

Основные этапы прохождения процедуры ОВОС заключаются в следующем.

- 1) Учреждение – заявитель разрабатывает предложение о мероприятии и определяет, окажет ли оно существенное влияние на окружающую среду, если да, то оно подготавливает ЗВОС.
- 2) При разработке проекта проектировщик имеет право консультироваться с Советом по качеству окружающей среды (СОКОС) и другими федеральными, местными или отраслевыми органами, а также в интересах дела – организовывать публичные слушания с общественностью и конкурентами.
- 3) Проект ЗВОС должен быть размножен заявителем и передан в СОКОС, бюро по охране окружающей среды, федеральные, местные и отраслевые органы, фирмам – конкурентам и общественности для анализа и комментариев.
- 4) После завершения периода экспертизы (4-6 недель) окончательный вариант ЗВОС вновь передается в Бюро по охране окружающей среды и во все остальные перечисленные в п.3. организации.
- 5) Вариант ЗВОС, в котором учтены все критические замечания, передается руководителю или секретарю ведомства, ответственного за решение.
- 6) Ответственным лицом или группой принимается решение. Если проект требует законодательного утверждения, ЗВОС направляется в Конгресс и президенту для рассмотрения и вынесения решения.
- 7) К реализации проекта приступают только после прохождения всех этапов. В этой связи важно отметить, что в Верховный суд могут быть переданы ходатайства и жалобы местных жителей, несогласных с решением, для судебного разбирательства.

Положительные моменты этой процедуры:

- а). Государство получило реальный механизм предотвращения возможных отрицательных последствий загрязнения и деградации окружающей среды; и обусловленных этим проявлений социальной напряженности.

- б). Предприниматели стали учитывать критерии экологической безопасности при разработке проектов.
- в). Население впервые получило объективную информацию о фактической экологической ситуации и прогнозированию неблагоприятных последствий реализации того или иного проекта на территории его проживания, а также возможность обоснованно отстаивать свои права в суде.

Четкая методология процедуры ОВОС заслужила быстрое признание и распространилась почти во всех развитых странах мира. С конца 90-х годов прошлого столетия вступила в действие Директива ЕЭС «Оценка воздействия некоторых государственных и частных проектов на окружающую среду» (85/337/ЕЭС), устанавливающая изложенные принципы ОВОС в странах Европы.

Декларацией по экологическому праву (1990 г.) подтверждены основные изложенные принципы ОВОС, установленные Директивой, и дополнительно рекомендовано включить в ОВОС:

- Экспресс-анализ вредных воздействий проектов на сопредельную территорию.
- Указание на наличие или отсутствие законодательных актов (в том числе международных), предусматривающих природоохранные меры при разработке проектов.
- Альтернативные варианты проектов.
- Оценку воздействия на затрагиваемое население и на качество окружающей среды в целом.
- Изучение кумулятивного воздействия будущего загрязнения, в том числе на сопредельные территории в целом.
- Выявление научных неопределенностей.

Данные, собранные в процессе ОВОС, рекомендуется хранить и систематически использовать для улучшения качества окружающей среды и накопления научных экологических знаний.

## *5.2. Основные принципы экономического регулирования природоохранной деятельности в промышленности и развитие энерго- и ресурсосберегающих технологий*

До середины 80-х годов XX века экологическая политика большинства государств в области сокращения техногенного воздействия

на окружающую среду во многом строилась исходя из приоритета административно-правовых мероприятий. Одним из ее положительных результатов было создание структуры государственных органов и общественных организаций, в функции которых входит обеспечение охраны природы в масштабах от местного уровня до национального. Кроме того, были созданы основы национального экологического права, стандартов, норм регламентирующих различные виды деятельности хозяйственных субъектов и физических лиц по критериям экологической безопасности.

Нельзя сказать, что данное направление исчерпало себя, оно постоянно совершенствуется, однако эффективность в значительной мере снизилась. Причина заключается в отсутствии стимулирующей природоохранной мотивации при применении только административно-правовых мероприятий. Вот почему с начала 80-х годов и до настоящего времени в методах национальной экологической политики основное внимание стало уделяться экономическим методам, стимулирующим оптимальное использование окружающей среды. Сложность реализации таких методов для практических целей заключается в трудности преодоления субъективизма при определении стоимости отрицательных воздействий на окружающую среду.

В основе этих экономических методов лежат как идеи платежей за загрязнение (постоянных, а не только штрафных) и сборов на обработку и захоронение отходов, так и идеи субсидирования мероприятий на технические системы экологической безопасности, в том числе в части развития энерго- и ресурсосберегающих технологий.

Основными управляющими факторами (так называемыми инструментами политики вмешательства) являются стимулы и льготы, иницирующие субъекты к самостоятельным шагам по защите природы, а также санкции и ограничения при невыполнении условий соглашения по получению этих стимулов и льгот. По существу, экономические механизмы действуют путем изменения цен на конкретные товары или услуги за счет включения в их структуру природоохранной составляющей для компенсации последующих издержек на контроль и ликвидацию загрязнения. Но рынок есть рынок, и цена должна быть не слишком высокой для потребителя. Главный принцип здесь – «платит тот, кто загрязняет», особенно, если речь идет о стрессовых поражениях окружающей среды с презумпцией неотвратимости наказания, причем размер штрафов (если не применена более жесткая мера пресечения) должен намного превышать стоимость предупредительных мер как стимула развития энерго- и ресурсосберегающих технологий и

изобретений. Право на льготные выбросы и сбросы получают те, кто развивает эти технологии.

**Основные механизмы экономического регулирования природоохранной деятельности в развитых зарубежных странах (по опыту США, Европы, Канады и Японии) представлены в табл.19.**

Таблица 19.

Основные механизмы экономического регулирования природоохранной деятельности в развитых зарубежных странах

№ п. п.	Основные стадии промышленного производства	Стимулы и льготы	Санкции и ограничения
1	2	3	4
1	Подготовка или реконструкция производства	Целевые субсидии и льготные кредиты на природоохранные проекты Снижение ставок налогообложения на инвестиции в охрану окружающей среды Государственные льготные субсидии и дотации на разработку и освоение энерго- и ресурсосберегающих технологий и экологически безопасных технологий Государственные бюджетные ассигнования, беспроцентные ссуды и займы на разработку, строительство или реконструкцию технических систем экологической безопасности Полная или частичная компенсация за закрытие или реконструкцию экологически опасных технологий или процессов Страховые льготы по залоговым обязательствам	Ужесточение стандартов качества природной среды Отказ в выдаче лицензии на экологически опасные производства и сертификатов на экологически опасные продукты и технологии Повышение тарифов и налогов на использование природных ресурсов, коммунальные услуги и инфраструктуру, на потенциально опасные (экологически) технологии производственных процессы и предприятия Судебные иски на возмещение государственных затрат при невыполнении условий соглашений, обеспечивающих получение стимулов и льгот
2	Производство	Государственные дотации на строительство и реконструкцию технических систем экологической безопасности	Штрафы за загрязнение природной среды Приостановка и закрытие экологически опасных

		<p>Снижение сроков амортизации технических систем экологической безопасности</p> <p>Льготные кредиты, займы и налоговые скидки на природоохранные мероприятия в процессе строительства</p> <p>Прямая финансовая помощь государства (премии) за досрочное выполнение природоохранных мероприятий</p> <p>Призы и награды, в том числе именные, неправительственных организаций и различных фондов для фирм, использующих лучшие в своей сфере деятельности технологии, снижающие загрязнение окружающей среды</p> <p>Целевые субсидии, льготные займы и ссуды на использование вторичных ресурсов в производстве</p> <p>Дотации на удаление, классификацию, транспортировку и переработку отходов производства в централизованной системе</p> <p>Соглашение на использование полной или частичной суммы штрафов за экологические нарушения на конкретные мероприятия по защите окружающей среды</p> <p>Льготные тарифы за использование централизованных систем водоснабжения и канализации</p>	<p>технологий и процессов</p> <p>Ужесточение стандартов экологической безопасности производства</p> <p>Повышение тарифов и дополнительные налоги за использование природных ресурсов, коммунальных услуг и инфраструктуру при отказе от реконструкции, вывода или закрытия экологически опасных технологий и производств</p> <p>Приостановка действия или изъятие лицензий на право производства, дополнительная экспертиза сертификатов на технологии и процессы для повторного подтверждения, пересмотра или запрещения</p> <p>Судебные иски на возмещение государственных затрат при невыполнении соглашений, обеспечивающих получение стимулов и льгот</p>
3	Реализация продукции (прибыль)	<p>Разрешение на полную или частичную передачу (продажу) лимитов на загрязнение окружающей среды между производителями</p> <p>Этикитирование экологически чистой продукции</p> <p>Разрешение включения части природоохранных затрат в цену продукции</p> <p>Дополнительные таможенные льготы на экспорт и импорт</p>	<p>Плата за загрязнение окружающей среды (выбросы и сбросы)</p> <p>Снятие с товара экологической этикетки</p> <p>Плата за удаление, классификацию, транспортирование и переработку или захоронение отходов производства</p> <p>Штрафы за ущерб природной среды</p>

		товаров, имеющих более высокий рейтинг экологической безопасности в своей группе товаров аналогичного назначения	Дополнительные таможенные пошлины за экспорт и импорт экологически опасных товаров, ужесточение стандартов качества товаров по критериям экологической безопасности Запреты на продажу экологически опасных товаров Судебные иски на возмещение государственных затрат при невыполнении соглашений, обеспечивающих получение стимулов и льгот
--	--	--	---

***Поскольку потребление энергии было и остается основой развития материальной культуры общества, то односторонний подход к выбору его промышленно-технологической базы имеет четкие причинно-следственные связи с общественными кризисами на всех уровнях – локальных, национальных и глобальных.***

В самом понятии «природно-ресурсный потенциал» в качестве активного компонента обычно рассматривается только вторая часть, а первая всегда принималась лишь как качественная характеристика свойств и происхождения исходных вещественно- энергетических ресурсов для системы материального производства и потребления. В свою очередь в этой систем (производства и потребления) главным и почти единственным регулятором рыночных отношений (правила и нормы которых в развитых капиталистических странах отлаживались опытом многих поколений) является экономическая ответственность, определяющая поведение субъекта экономического (в нашем случае производительного и потребительского) процесса. Нарушение экономических законов приводило к потерям, учесть которые можно на уровне отдельного экономического акта и в масштабах экономических интересов более высокого иерархического уровня.

Результат экономических отношений с достаточно высокой достоверностью прогнозируется. Для этого основанием служат развитая экономическая теория и ее практические приложения в различных областях экономики, вплоть до возникновения кризисов общественного развития, которые разрешались путем введения в оборот «производство-потребление» новых ресурсов.

Однако, с начала 70-х годов XX столетия четко обозначилась иная качественная ступень этих кризисов – экологическая, связанная с уже названной первой их частью.

Начинают развиваться основы теории экологической безопасности, которые раньше воспринимались скорее как морально-этические нормы поведения или, в крайнем случае, как ориентация на экономическую

оценку потерь общества от ущерба (вреда), наносимого потребительскими интересами свойствам живой природы, т.е. экологическая ответственность – это нечто вторичное и экономическое.

Сейчас понятие «экологическая ответственность» введено в ранг социально-экономического критерия, необходимого для стратегического планирования развития различных сфер деятельности, и прежде всего интересующие нас энергопромышленных технологий.

Прежде всего, создаются предпосылки для совершенствования системы природопользования и ограничения негативного воздействия на природную среду.

Ужесточение правовых и законодательных мер сопровождалось совершенствованием стандартов и норм, регламентирующих уровни антропогенного воздействия на окружающую среду. Отработанная система экономического регулирования способствовала быстрому росту инвестиций в экологическое приборостроение, разработку и практическую реализацию систем мониторинга и оперативного экологического контроля, в том числе, сбора достоверной статистической информации об антропогенной нагрузке и состоянии здоровья населения.

Одним из эффективных путей комплексного решения этих проблем является энергосбережение, понимаемое не как простое снижение величины (объема) используемой энергии, но, прежде всего, повышение эффективности всех звеньев производства, транспортировки и потребления энергии от традиционных ископаемых ресурсов и вовлечение в оборот возобновляемых источников энергии.

### **5.3. Нормативная база энергосбережения в России**

Основной законодательной базой в области энергосбережения в России является Закон РФ “Об энергосбережении” (№28-ФЗ), принятый Государственной Думой 13 марта 1996г. и одобренный Советом Федерации 20 марта 1996г. (Собрание Законодательства Российской Федерации, №15, 8 апреля 1996г., ст. 3658-3664).

Этот закон регулирует отношения, возникающие в процессе деятельности в области энергосбережения, в целях создания экономических и организационных условий для эффективного использования энергетических ресурсов.

В соответствии с ним, энергосбережение определяется как реализация правовых, организационных, научных, производственных, технических и экономических мер, направленных на эффективное использование невозобновляемых энергетических ресурсов и вовлечение в хозяйственный оборот возобновляемых источников энергии.

В законе используются следующие понятия:

*Энергосберегающая политика государства* – правовое, организационное и финансово-экономическое регулирование деятельности в области энергосбережения.

*Энергетический ресурс* – носитель энергии, который используется в настоящее время или может быть полезно использован в перспективе.

*Вторичный энергетический ресурс* - энергетический ресурс, полученный в виде побочного продукта основного производства или являющийся таким продуктом.

*Эффективное использование энергетических ресурсов* – достижение экономически оправданной эффективности использования энергетических ресурсов при существующем уровне развития техники и технологии и соблюдении требований к охране окружающей среды.

*Показатель энергоэффективности* – абсолютная или удельная величина потребления или потери энергетических ресурсов для продукта любого назначения, установленная государственными стандартами.

*Непроизводительный расход энергетических ресурсов* - расход энергетических ресурсов, обусловленный несоблюдением требований государственных стандартов, а также нарушение требований иных нормативных актов, технологических регламентов и паспортных данных.

*Возобновляемые источники энергии* – энергия солнца, ветра, тепла Земли, естественного движения водных потоков, а также энергия существующих в природе градиентов температур.

*Альтернативные виды топлива* – виды топлива (газ, биогаз, синтетическое топливо и др.), использование которых сокращает или замещает потребление энергоресурсов более дорогих и дефицитных видов.

Согласно статье 4 этого закона, энергосберегающая политика государства основана на следующих принципах:

- приоритет эффективного использования энергетических ресурсов;
- осуществление государственного надзора за эффективным использованием энергетических ресурсов;
- обязательность учета юридическими лицами производственных или расходуемых ими энергетических ресурсов, а также учета физическими лицами получаемых ими энергоресурсов;
- включение в государственные стандарты на оборудование, материалы конструкции, транспортные средства показатели их энергоэффективности;

- Сертификация топлива, энергопотребляющего, энергосберегающего и диагностического оборудования, материалов, конструкций, транспортных средств, а также энергетических ресурсов;
- сочетание интересов потребителей, поставщиков и производителей энергетических ресурсов;
- заинтересованность юридических лиц, производителей и поставщиков энергетических ресурсов в эффективном использовании энергетических ресурсов.

Другими статьями закона “Об энергосбережении” определены:

- меры по стандартизации, сертификации и метрологии в области энергосбережения;
- меры по государственному управлению энергосбережением, включающие осуществление государственного надзора за эффективным использованием энергетических ресурсов, проведение энергетических обследований организаций (так называемый. энергоаудит);
- меры по учету энергетических ресурсов и государственному статистическому наблюдению за их потреблением;
- Финансовые и экономические механизмы энергосбережения (целевое финансирование программ на федеральном и региональном уровнях, льготы потребителям и производителям энергоресурсов, в т.ч. лицензионные и тарифные);
- основные направления международного сотрудничества в области энерго- и ресурсосбережения;
- основные направления образования и подготовки кадров по пропаганде эффективного использования энергоресурсов;
- ответственность за нарушение положений этого закона, обязательного к исполнению на всей территории Российской Федерации.

К другим документам нормативной базы России в области энергоэффективности относятся *Государственные нормативы и правила*, представленные Строительным кодексом РФ от 8 апреля 1998 г., *федеральные акты в строительстве*, представленные строительными нормами и правилами (СНИП), в том числе СНИП “Строительная теплотехника” и Свод правил СП-23-101 “Проектирование тепловой защиты зданий”, а также *территориальные строительные нормы* (ТСН) по энергетической эффективности зданий, разработанные и утвержденные Госстроем РФ для 13 регионов России.

- В этих документах установлены предписывающие требования к тепловой защите зданий и сооружений; требование снижения удельного энергопотребления на отопление зданий по сравнению с 1995г. в период до 1999 г. на 20%, с 2000 г. – на 40%, введение впервые энергетического паспорта зданий и алгоритма расчета удельного энергопотребления на их

отопление, правил расчета приведенного сопротивления теплопередаче наружных ограждений, в том числе фасадов зданий, перекрытий теплых чердаков и подвалов, остекленных лоджий; правил контроля энергетических параметров и уровня теплозащиты зданий; классификации строительных материалов и методик определения их расчетных коэффициентов теплопроводности с учетом влияния архитектурных и объемно-планировочных решений в зависимости от климатического районирования территории.

#### **5.4. Проблемы оценки и управления технологическими рисками**

Ключевым моментом для становления нового мышления было начало первого мирового энергетического кризиса 1973 г.. Этот кризис является инициатором формирования и утверждения доктрины энерго- и ресурсосбережения в экономике развития западных стран, Европы, США и Японии.

Развитие стратегии энерго и ресурсосбережения имело и еще одно важнейшее следствие – интенсификацию технологических процессов по энерго и ресурсоносителям в технологически замкнутых контурах рециркуляционных и рекуперационных систем. Хотя общая энергоемкость таких процессов значительно сократилась, однако в активных технологических зонах интенсификация процессов обеспечивалась резким увеличением количественных значений технологических параметров (температура, давление, скорости реакций и т. п.). Использование интенсивных технологий, способствовало, с одной стороны, повышению требований к качеству и надежности оборудования, а с другой – переходу на качественно новый уровень автоматизации производства.

Казалось бы, борьба за максимальное использование исходных компонентов (энергии и ресурсов) в целевых продуктах производства (товарах и услугах) должна приводить к сокращению негативного воздействия промышленных предприятий на компоненты природной среды, повышению степени безотходности технологий как единственно правильного пути защиты окружающей среды от вредных воздействий, от тепловых воздействий. Однако, интенсификация энергонасыщенных процессах с использованием старого оборудования и материалов сопряжена с потенциальной опасностью внезапного катастрофического поражения природных объектов и населения.

Это противоречие обусловило постановку новой проблемы, то есть необходимости оценки риска существующих и проектируемых технологий для безопасности окружающей среды от локального до глобального уровней.

Исторически проблема оценки риска возникновения отказов, аварий и катастроф разрабатывалась применительно к транспортным системам, автоматизированным производствам и энергетическим комплексам с большим количеством элементов на основе исследования методами теории надежности преимущественно внутренних процессов. Влияние внешних факторов на технические системы оценивалось преимущественно исходя из концепции возможности или невозможности (при экстремальных внешних воздействиях) их безотказного функционирования с целью производства продукции (энергии). При этом практически не учитывалась потенциальная опасность технических систем для жизненной среды при нарушении технологических регламентов и техники безопасности, а также превышении расчетных уровней воздействий. Немаловажным обстоятельством, как показала практика многих катастроф, являлась недооценка «человеческого» фактора при недостаточной надежности современных технологий и автоматических систем.

Мерой оценки такой потенциальной опасности может быть степень риска той или иной технологии или технологической системы для здоровья человека и для природных экосистем.

Как и многие другие проблемы, проблема оценки риска и прогнозирования потенциальной опасности технологических систем стала очевидной и актуальной, когда последствия отдельных значительных аварий и катастроф взбудоражили общественное мнение и затронули политические структуры.

Таковыми событиями в США явились авария на ядерном реакторе АЭС «Три Майл Айленд» (штат Пенсильвания, 1979 г.), которая послужила поводом для серьезной переоценки опасных технологий и альтернативных изысканий технических решений, а также возможностей индикации потенциально опасных секретных объектов и производств. Тогда при национальном научном фонде США была учреждена специальная комиссия по проблеме риска. Новое научное направление получило название «анализ риска» и строилось на концепции приемлемого (по последствиям) уровня риска.

В то же время, в бывшем СССР при создании и эксплуатации сложных технических систем и комплексов использовалось концепция абсолютной безопасности. Ее реализация предусматривала разработку и применение на практике таких технических средств, организационных мероприятий, учебных программ подготовки обслуживающего персонала; инструкций и правил, регламентирующих порядок проведения всех видов работ, которые гарантировали бы невозможность возникновения аварийных ситуаций катастрофических масштабов по техническим причинам. Наличие развитой системы контролирующих органов дополняло эту систему безопасного функционирования. Понадобилась Чернобыльская

АЭС, трагедии атомных подводных лодок (в том числе АПЛ «Курск» в 2000 г.), чтобы вслед за США возникла необходимость пересмотреть эти взгляды. Характерно, что год Чернобыля (1986 г.) стал трагическим и для США, ознаменовавшись аварией при взлете космического корабля "Челенджер", в результате которой погиб экипаж и резко затормозилась вся американская программа пилотируемых полетов.

Вполне вероятно, что именно эти катастрофы послужили толчком к резкой активизации исследований в двух основных направлениях теории анализа риска.

Первое направление - связано с анализом и оценкой потенциальной опасности производственных технологий и технических решений и разработкой рекомендаций по предупреждению и профилактике чрезвычайных ситуаций (ЧС). В этих исследованиях предлагалось проводить ситуационный анализ, выявлять ключевые факторы и противоречия в процессе функционирования объекта, устанавливать условия неопределенности и разрабатывать сценарии возможного развития ЧС. Итоговым результатом реализации первого направления являлись рекомендации по организации системы решений с банком информационных данных по их практической реализации.

Второе направление связано с изучением риска для населения и компонентов окружающей среды при масштабном воздействии ЧС на территорию и население. Методология оценки риска в этом случае включает результаты оценки риска по объекту возникновения ЧС на основе исходных данных, характеризующие источник опасности. Разработка сценариев распространения ЧС по территории строится с использованием этих данных и методов ОВОС, а также специфических методов, учитывающих ударные дозы поражающих факторов и внезапность возникновения катастрофы. Эти специфические методы были заимствованы из самых перспективных направлений в военной области и перенесены в область экологической безопасности. Результатом исследований по анализу рисков второго направления являются

рекомендации по допустимой концентрации потенциально опасных объектов на данной территории, а также рекомендации по организации системы принятия и реализации управленческих решений в процессе возникновения, развития и ликвидации ЧС и ее последствий.

Главными задачами в проблеме оценки риска являются определение допустимых уровней (приемлемого риска), прогнозирование чрезвычайных ситуаций (ЧС) и разработка системы управления при возникновении и ликвидации ЧС и ее последствий. Над методологией решения этих задач интенсивно работают во многих институтах, университетах и национальных центрах США, России, Европы, однако пока еще процедура оценки и управления риском не получил такой законченной научно-методической базы, как процедура ОВОС. Основная причина заключается в значительно большей системе неопределенности и многофакторности суммы процессов, которые реализуются в одном событии - катастрофе, с последующим распространением последствий ЧС, опять-таки, в условиях неопределенности.

Особую актуальность проблема оценки и управления риска при потенциальной опасности возникновения ЧС приобретает в условиях политической нестабильности. Не следует забывать, что на территории России эксплуатируется более 800 ядерных и 1500 химических и биологических объектов повышенной опасности, а также эксплуатируется десятки тысяч км трубопроводов, по которым перемещаются сотни тысяч тонн взрыво-пожароопасных продуктов и отравляющих продуктов, а крупнейшие аварии и катастрофы по своим последствиям не имеют границ.

Основной целью программы является разработка единых научно-технических, правовых и социально-экономических основ национальной

политики в области обеспечения безопасности, защиты человека, территории и среды обитания от кризисно масштабных аварий и катастроф.



*Энергофизический мониторинг*

*УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ*

**Компьютерный набор и верстка**

**А.Н. Коваленко**

Дизайн

И.А. Васильева

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Санкт-Петербургского государственного  
университета информационных технологий, механики и оптики

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

---

Подписано к печати 25.01.05

Тираж 100 экз.

Объем 5 п.л. Заказ № 806

Отпечатано на ризографе