

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

**А. Ж. Гребеньков, В. П. Трубников**

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
НА ЗАРАЖЕННЫХ РАДИОНУКЛИДАМИ  
ТЕРРИТОРИЯХ**

Тексты лекций для студентов специальности 1-43 01 06  
«Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент»

Минск 2006

УДК 621.039:621.133.1+634.953(075.8)

ББК 22.21я7

Г 55

Рассмотрены и рекомендованы к изданию редакционно-издательским советом университета

Рецензенты:

зам. проректора по НИЧ профессор кафедры  
промышленной теплоэнергетики и теплотехники БНТУ,

доктор технических наук *А. С. Калиниченко*;

зав. лабораторией энергосбережения ОИЭЯИ – Сосны НАН Беларуси

доктор технических наук *А. Г. Трифонов*

**Гребеньков, А. Ж.**

Г 55 Энергоэффективные технологии на зараженных радионуклидами территориях : тексты лекций для студентов специальности 1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент» / А. Ж. Гребеньков, В. П. Трубников. – Минск : БГТУ, 2006. – 130 с.

ISBN 985-434-612-9.

Тексты лекций предназначены для обучения основным технологическим и техническим подходам в области энергосбережения и использования местных топливных ресурсов с учетом необходимости защиты человека и окружающей среды от вредного воздействия радиации. Данный базовый учебный курс будет полезен при проектировании и эксплуатации котельного оборудования, а также технологий и техники в лесной и деревообрабатывающей промышленности на загрязненных радионуклидами территориях Беларуси.

Предназначены для студентов специальности 1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент».

УДК 621.039:621.133.1+634.953(075.8)  
ББК 22.21я7

© УО «Белорусский государственный  
технологический университет», 2006

ISBN 985-434-612-9

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ .....  | 5  |
| 1. ЧЕРНОБЫЛЬСКАЯ КАТАСТРОФА И ЕЕ ПОСЛЕДСТВИЯ .....   | 7  |
| 1.1. Причины катастрофы .....  | 7  |
| 1.2. Масштаб радиоактивных выпадений и основные<br>последствия .....                           | 9  |
| 1.3. Краткое описание применяемых контрмер .....   | 12 |
| 2. ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА .....  | 15 |
| 2.1. Основные экологические понятия и термины .....  | 15 |
| 2.2. Загрязнение окружающей среды .....  | 17 |
| 2.3. Природоохранные стандарты .....   | 19 |
| 3. РАДИОЭКОЛОГИЯ КАК ЧАСТЬ ЭКОЛОГИИ .....  | 25 |
| 3.1. Радиоактивный распад и изотопы .....  | 25 |
| 3.2. Дозы облучения .....  | 28 |
| 3.3. Основные защитные мероприятия .....   | 35 |
| 4. ПОСЛЕДСТВИЯ КАТАСТРОФЫ ДЛЯ ЛЕСНОЙ ОТРАСЛИ .....   | 38 |
| 4.1. Радионуклиды в объектах окружающей среды .....  | 38 |
| 4.2. Поведение радионуклидов в лесных экосистемах .....  | 42 |
| 4.3. Формирование доз облучения населения .....  | 47 |
| 4.4. Лесопользование в условиях радиоактивного<br>загрязнения .....                            | 51 |
| 4.5. Деревообработка загрязненного сырья .....   | 58 |
| 5. БЫСТРОРАСТУЩИЕ «ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ» ПОСАДКИ<br>КАК МЕТОД РЕАБИЛИТАЦИИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ ..... | 62 |
| 5.1. Технология короткоцикловых посадок .....  | 62 |
| 5.2. Концентрация радионуклидов в биомассе .....   | 66 |
| 5.3. Экономические характеристики .....  | 69 |
| 6. ТОПЛИВО НА ОСНОВЕ БИОМАССЫ .....  | 73 |
| 6.1. Возобновляемые источники энергоресурсов .....   | 73 |
| 6.2. Топливо и его виды .....  | 78 |
| 6.3. Особенности топлива на основе биомассы<br>растений .....                                  | 81 |
| 6.4. Процессы сжигания биомассы .....  | 84 |
| 7. ПОВЕДЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ПРОЦЕССАХ<br>СЖИГАНИЯ .....                                       | 88 |
| 7.1. Принципы формирования радиоактивных аэрозолей .....                                       | 88 |
| 7.2. Очистка дымовых газов .....   | 92 |

|  |     |
|--|-----|
| 7.3. Обращение с зольными отходами .....                           | 100 |
| 7.4. Радиационный риск при сжигании загрязненного<br>топлива ..... | 105 |
| 8. БИОЭНЕРГЕТИКА В СТРУКТУРЕ ЭНЕРГЕТИКИ .....                      | 110 |
| 8.1. План развития биоэнергетики .....                             | 110 |
| 8.2. Ретрофит существующих котлоагрегатов .....                    | 114 |
| 8.3. Методы прогнозных экономических оценок .....                  | 117 |
| 8.4. Результаты экономических оценок .....                         | 121 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....   | 127 |
| ЛИТЕРАТУРА .....   | 128 |

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Энергоэффективность – одно из направлений базовых курсов системы универсального образования. Вопросы, рассматриваемые в нем, связаны со многими техническими приложениями, а также с вопросами защиты окружающей среды.

Разработка, организация производства и внедрение новых энерго-сберегающих технологий и техники, а также механизмов их реализации обеспечивают как снижение энергоемкости народного хозяйства республики, так и улучшение экологической обстановки. Непрерывно уменьшающиеся запасы ископаемых энергоносителей, возрастающая опасность глобального потепления и желание многих стран освободить энергетические источники от политической ситуации – все это стимулирует повышение интереса к возобновляемым источникам энергии. В частности, возобновляемые источники биомассы позволяют перейти от использования запаса энергии к ее непрерывному потоку. Такая диверсификация оказывается перспективной и в экологическом отношении (снижение эмиссии углекислоты), а также ликвидирует существенное различие между промышленной и сельскохозяйственной сферами производства.

Во многих странах мира энергетика на растительной и древесной биомассе становится эффективной самокупаемой отраслью, конкурентоспособной по отношению к энергетике на ископаемом топливе. Беларусь идеально подходит для развития биоэнергетики благодаря наличию больших массивов промышленного леса, равнинному ландшафту, хорошо развитой инфраструктуре распределения энергии и тепла, современным предприятиям энергетического и общего машиностроения, а также высокому уровню технического образования населения.

В Беларуси, где собственные ресурсы ископаемых энергоносителей составляют не более 15% от потребности, биоэнергетика начинает интенсивно развиваться в условиях необходимости достичь определенного уровня энергетической безопасности и в полном соответствии положениям международных соглашений об изменении глобального климата, подписанных республикой.

Отдельной проблемой стоит необходимость реабилитации лесов, загрязненных в результате катастрофы на ЧАЭС, в которых сосредоточено около четверти всего запаса древесины. Многие факты последних лет свидетельствуют, что древесина и древесные отходы из загрязненных

областей рано или поздно оказываются в различных котлах и топках даже в районах, далеких от пораженных территорий. Биоэнергетика здесь может быть эффективным элементом реабилитации, который позволит безопасно и под полным контролем вовлечь загрязненные ресурсы в производство энергии и тепла. Без знаний основных вопросов радиоэкологии и поведения радионуклидов в природных и искусственных объектах и процессах, включая процессы горения, невозможно решить проблему создания энергоэффективных производств для значительной части территории республики.

Целью изучения курса «Энергоэффективные технологии на зараженных радионуклидами территориях» является:

- ознакомление с основами экологии и радиоэкологии;
- представление о воздействии радиоактивности на природу и человека;
- получение основных знаний по механизмам миграции радионуклидов в окружающей среде;
- ознакомление с комплексными технологиями утилизации загрязненной биомассы леса и отходов сельского хозяйства;
- получение знаний по поведению радионуклидов в процессах сжигания загрязненной биомассы;
- ознакомление с методами и технологиями контроля над распространением радиоактивности в процессах утилизации биомассы и технологиями обращения с радиоактивными отходами низкого уровня активности;
- получение знаний по методам оценки эффективности рассматриваемых технологий с учетом экологической составляющей.

После изучения предлагаемого курса студент сможет применять полученные знания на практике при проектировании и эксплуатации котельного оборудования, а также технологий и техники в лесной и деревообрабатывающей промышленности с учетом необходимости защиты человека и окружающей среды от вредного воздействия радиации.

## 1. ЧЕРНОБЫЛЬСКАЯ КАТАСТРОФА И ЕЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

### 1.1. Причины катастрофы

Катастрофа на четвертом блоке Чернобыльской атомной электростанции, случившаяся 26 апреля 1986 г., явилась крупнейшей в истории ядерной энергетики, и ее результаты в той или иной степени затронули практически все страны мира. Особенно тяжелые последствия, вызванные значительным выбросом радиоактивности с последующим загрязнением территории, выпали на долю трех республик – Беларуси, Украины и России.

В ходе интенсивного наращивания установленной мощности АЭС в бывшем СССР в качестве серийных получили широкое распространение уран-графитовые реакторы канального типа, в которых замедлителем служит графит, а теплоносителем – вода. В начале 1986 г. в СССР работало 14 РБМК (реактор большой мощности канальный) общей электрической мощностью 14 000 МВт. Их достоинством является отсутствие тяжелого корпуса. Поэтому строительство АЭС с такими реакторами не требовало создания специализированных машиностроительных заводов, что позволяло наладить выпуск уран-графитовых канальных реакторов в достаточно короткие сроки. Существенной особенностью является одноконтурная схема преобразования тепла, обеспечивающая возникновение и перегрев водяного пара непосредственно в реакторе. Четырьмя такими реакторами с электрической мощностью 1000 МВт была укомплектована расположенная в северной части Украины Чернобыльская АЭС, причем предполагалось ее расширение еще на два аналогичных энергоблока, строительство которых к 1986 г. уже началось.

РБМК-1000 представляет собой вертикально расположенный цилиндр диаметром 11,8 м и высотой 7 м, собранный из графитовых колонн с центральными отверстиями для технологических каналов и каналов для поглощающих нейтроны стержней управления и защиты. Графитовая кладка реактора заключена в металлический кожух и размещена в бетонной шахте квадратного сечения размером 21,6×21,6 м и глубиной 25,5 м. Верхняя и нижняя части металлоконструкции засыпаны горной породой, являющейся защитным материалом. В качестве боковой биологической защиты используются баки с водой. Технологические каналы предназначены для установки урансодержащих

тепловыделяющих сборок. Верхняя и нижняя части технологического канала изготовлены из нержавеющей стали, а центральная – из сплава циркония с ниобием. В реакторе располагается 1693 технологических канала, в каждом из которых размещается кассета с двумя тепловыделяющими сборками. Каждая сборка состоит из 18 тепловыделяющих элементов, представляющих собой трубки из циркониевого сплава, внутри которых помещены таблетки из двуоксида урана. Всего в реакторе находится 180 т урана с обогащением по  $^{235}\text{U}$  примерно 1.8% (следует напомнить, что содержание  $^{235}\text{U}$  в природном уране составляет 0.7%). Эксплуатационный средний уровень выгорания топлива составляет 18.5 МВт · сут/кг. Кроме технологических, в реакторе размещается 179 каналов для органов управления и аварийной защиты реактора. Давление водяного пара перед турбиной составляет 6.374 МПа при 280°C.

За время кампании между очередными перегрузками топлива (которые могут осуществляться без остановки реактора) содержание  $^{235}\text{U}$  уменьшается с 18 до 3.7 кг/т, а содержание  $^{239}\text{Pu}$  достигает 2.8 кг/т. Это приводит к возрастанию коэффициента реактивности и к повышению неравномерности энергораспределения по активной зоне реактора. С учетом присущего РБМК положительного температурного коэффициента реактивности следует отметить, что опасность возникновения аварийных режимов по мере выгорания топлива возрастает.

Непосредственно перед катастрофой на Чернобыльской АЭС проводился специальный эксперимент, который должен был упростить действия операторов АЭС при потенциально аварийной ситуации. Однако должные меры обеспечения безопасности эксперимента не были приняты и аварийная автоматическая защита реактора была отключена. Неравномерность нейтронного потока оказалась слишком значительной, а введение оператором стержней аварийной защиты несколько запоздало, что привело к недопустимому увеличению мощности реактора с очень большой скоростью. В момент катастрофы на станции находилось примерно 200 чел., на строительстве 5-го и 6-го блоков – 300 чел.

В 1 ч 24 мин два последовательных взрыва (предполагалось, что взорвался водород, выделяющийся при высокотемпературной реакции водяного пара с цирконием) сорвали крышку с четвертого блока, выбросили бетон, графит и осколки деления топлива и обнажили активную зону. Дым от горящего графита и газы поднялись на высоту свыше 1 км,

унося в своем потоке часть топлива и продуктов его деления. Легкие частицы и пары небольшим ветром были отнесены на северо-запад от станции. На крыше турбинного зала и внутри четвертого блока от тепловыделения при взрыве возник пожар. Через несколько минут прибыли пожарные. К пяти часам утра пожар на крыше блока был ликвидирован, хотя графит в активной зоне реактора продолжал гореть. В отдельных доступных местах мощность дозы ионизирующих излучений превышала 100 Гр/ч, и некоторые участники получили свыше 10 Зв. Третий блок был остановлен через 4 ч, первый и второй – через сутки. Клинические эффекты облучения проявились у 203 чел., из которых 115 чел. были госпитализированы с острой лучевой болезнью, причем 28 чел. спасти не удалось.

Эвакуация г. Припяти началась 27 апреля. Для смягчения последствий катастрофы в первые часы после нее оказалось необходимым проведение некоторых срочных мероприятий:

- тушение горящего графита;
- обеспечение и поддержание подкритичности активной зоны аварийного реактора;
- расхолаживание и укрытие активной зоны для снижения аэрозольного выброса топливных частиц.

В период с 27 апреля по 10 мая с вертолетов на активную зону было сброшено 5 тыс. т карбида бора, доломита, свинца, песка, глины. К 1 мая температура в активной зоне начала повышаться, что потребовало создания скважин для закачки жидкого азота. Для исключения попадания расплава активной зоны в воду бассейна, компенсации давления (что могло привести к потенциальному ядерному взрыву) были открыты клапаны сброса воды в бассейн-охладитель и установлены временные трубопроводы. В 600 м от аварийного блока был создан командно-наблюдательный бетонный бункер. К 24 июня – сооружен тоннель под блоком и установлена железобетонная плита. К середине ноября вокруг аварийного блока была смонтирована железобетонная защитная оболочка.

## 1.2. Масштаб радиоактивных выпадений и основные последствия

По ретроспективным оценкам в процессе катастрофы было выброшено около 300 млн. Ки радиоактивных веществ, из них почти 1.5 млн. Ки цезия и 50 млн. Ки йода. За первые пять дней после катастрофы мощность выброса радиоизотопов снизилась в шесть раз, тогда

как в течение последующих четырех суток выброс опять составил 70% от первоначального, что свидетельствует о постепенном разогреве топлива свыше 2000°С.

Через десять суток произошло снижение выброса до 1% от исходного. В первые сутки на высоту выше 1800 м было выброшено 20% радионуклидов, 60% – в интервале высот от 1200 до 1800 м. После двух суток высота выброса не превышала 600 м. В момент катастрофы поверхностный ветер был незначительным с переменным направлением, тогда как на высоте 1500 м скорость юго-восточного ветра составляла 8–10 м/с. За 36 ч радионуклиды достигли Швеции, 2 мая – Японии, 5 мая – Соединенных Штатов Америки.

Переменные ветры в последующие после катастрофы дни обусловили очень сложную картину радиоактивного загрязнения территории СССР. В результате 70% радионуклидов выпали на территорию Беларуси. 38,4 тыс. км<sup>2</sup>, или 18% территории, оказались загрязненными с уровнем свыше 1 Ки/км<sup>2</sup>.

В загрязненную зону попало 27 городов и 2666 поселков и других населенных пунктов, в которых проживали 2.1 млн чел. Распределение населенных пунктов и населения в зависимости от плотности загрязнения территории представлено в табл. 1.1.

Таблица 1.1

**Число населенных пунктов и жителей, находящихся в зонах с разным уровнем плотности загрязнения почвы**

| Плотность загрязнения, Ки/км <sup>2</sup> | Число городов | Число поселков и других населенных пунктов | Население, тыс. чел. |
|---|---------------|--|----------------------|
| 1–5                                       | 14            | 1352                                       | 1734                 |
| 5–15                                      | 8             | 919  | 267                  |
| >15                                       | 5             | 295  | 105                  |
| >40                                       | 0             | 70   | 9,4                  |

Чернобыльская катастрофа оказала огромное воздействие на все сферы жизнедеятельности населения Беларуси. Из 107 наиболее загрязненных пунктов в течение мая – августа 1986 г. было эвакуировано 24.7 тыс. чел., хотя полная карта загрязнения местности была создана только к концу 1989 г. На территории 194 тыс. га после эвакуации организованы зоны отчуждения.

К настоящему времени ликвидировано 54 колхоза и совхоза, выведено из оборота 264 тыс. га сельхозугодий, существенно уменьшилось поголовье скота. Уменьшились размеры пользования лесными, минерально-сы-

рьевыми и другими ресурсами. Из пользования выведено 22 месторождения, в том числе почти 5 млн. м<sup>3</sup> запасов промышленных песков, тугоплавких и других глин, 7.7 млн. т мела, 16% цементного сырья страны и 13.5 млн. т торфа. Из планов разведки исключены предполагаемые запасы нефтегазовых месторождений мощностью около 52.2 млн. т нефти.

Радиоактивному загрязнению подверглись 17.3 тыс. км<sup>2</sup> леса (табл. 1.2). Ежегодные потери, составляющие около 2 млн. м<sup>3</sup>, к 2010 г. удвоятся. В зонах, где загрязнение почвы превышает 15 Ки/км<sup>2</sup>, заготовка древесины вообще запрещена.

Таблица 1.2

**Масштабы загрязнения лесных ресурсов по областям**

| Отрасль народного хозяйства | Общая площадь, тыс. га | Загрязнение, Ки/км <sup>2</sup> |       |       |       |        | Итого |
|-----------------------------|------------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|--------|-------|
|                             |                        | 1-5                             | 5-15  | 15-30 | 30-40 | >40    |       |
| Здоровье                    | 16.7                   | 0                               | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     |
| Агропромышленный            | 848.8                  | 104.8                           | 37.3  | 16.7  | 8.1   | 1.4    | 168.3 |
| Промышленность              | 685.8                  | 104.0                           | 45.9  | 13.4  | 4.9   | 0.7    | 168.9 |
| Строительство               | 747.2                  | 70.4                            | 38.4  | 15.1  | 7.3   | 0.8    | 132.0 |
| Ресурсы                     | 1341.3                 | 259.6                           | 129.7 | 48.6  | 20.7  | 2.7    | 461.3 |
| Транспорт и связь           | 984.6                  | 42.9                            | 11.6  | 12.4  | 6.9   | 2.9    | 76.7  |
| Могильная                   | 70.4                   | 17.9                            | 7.1   | 1.0   | 0.4   | 0.0    | 26.4  |
| Социальная сфера            | 6739.1                 | 174.0                           | 71.0  | 28.4  | 23.5  | 4.8    | 301.7 |
| Всего                       |                        | 29.00                           | 50.00 | 61.00 | 95.00 | 235.00 |       |

Таблица 1.3

США  
Чернобыльской ка-

Рисунок. Структура ущерба, нанесенного Республике Беларусь катастрофой на ЧАЭС: 1 – дополнительные затраты, связанные с поддержанием народного хозяйства и осуществлением защитных мер (191.7 млрд. долларов США); 2 – прямые и косвенные потери (29.6 млрд. долларов США); 3 – упущенная выгода (13.7 млрд. долларов США)

### 1.3. Краткое описание применяемых контрмер

Для регламентации проживания и поведения на загрязненных территориях в настоящее время на республиканском уровне принят целый ряд нормативно-правовых актов, в том числе:

- Закон о защите населения и территории от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера;
- Закон о санитарно-эпидемическом благополучии населения;
- Закон о правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС;
- Закон о радиационной безопасности населения.

Введен целый ряд запретных мер. Запрещена любая сельскохозяйственная деятельность на территории с плотностью загрязнения свыше 40 Ки/км<sup>2</sup>, а производство молока – свыше 15 Ки/км<sup>2</sup>. Для снижения загрязненности продукции разработаны специальные агротехнические приемы обработки пашни и разведения скота. Разрешено добровольное отселение людей с территории с плотностью 15–40 Ки/км<sup>2</sup> или с территории со значительными загрязнениями сельскохозяйственной продукции. Общее количество потенциальных переселенцев несколько превышает 100 тыс. чел. В 1986 г. было введено радиологическое ограничение на использование мяса, молока, овощей, ягод, рыбы и грибов. Создана сеть контрольных пунктов. Постоянный радиационный контроль организован в шести районах Могилевской области, где под наблюдением находится 127 935 чел., и в одиннадцати районах Гомельской области – 226 663 чел. Среди постоянно наблюдаемых хронические болезни имеют около 30% населения. Основные заболева-

ния: болезни органов дыхания, пищеварения, эндокринной и нервной системы, органов кровообращения, психические расстройства. Основная смертность вызвана болезнями системы кровообращения и злокачественными новообразованиями.

На раннем этапе самой крупномасштабной мерой была эвакуация жителей в первые дни после катастрофы из расположенных около атомной станции населенных пунктов: сначала из 10-километровой зоны вокруг станции, затем – из 30-километровой, в последующие годы – из отдельных населенных пунктов более отдаленных зон. Это так называемое острое вмешательство позволило в значительной степени уменьшить дозовые нагрузки как от внешнего, так и от внутреннего облучения. Раздача йодсодержащих препаратов была сделана в основном несвоевременно, и их применение оказалось малоэффективным.

На промежуточном этапе крупным мероприятием была попытка уменьшить дозы внешнего облучения за счет дезактивации дорог, жилых домов и общественных зданий. Для исключения или уменьшения потребления продуктов местного производства в населенные пункты завозили чистые продукты питания. Продолжалось переселение жителей. Государство при поддержке международных организаций создало сеть лечебно-профилактических учреждений, оказывающих медицинскую помощь при заболеваниях щитовидной железы.

На восстановительном этапе была создана система ведомственного и государственного контроля. На разных уровнях сейчас функционирует много специальных радиологических лабораторий. Разработаны и пересмотрены республиканские радиационно-гигиенические нормативы, устанавливающие допустимые мощности дозы излучения в помещениях и на прилегающих территориях, загрязнения поверхностей в детских и иных учреждениях, а также загрязнения оборудования на предприятиях и продуктов питания. Разработаны эффективные методы и ограничительные меры в сельском хозяйстве с целью получения нормативно-чистой продукции местного производства; регламентируется лесозаготовительная деятельность; проводятся очистки среды обитания и производственной деятельности человека специализированными предприятиями.

В результате применения совокупности защитных мер шло быстрое снижение доз облучения (по крайней мере, до 1993 г.). Затем ситуация стабилизировалась. Загрязненность продуктов питания, производимых в общественном секторе, сейчас в основном не превышает установлен-

ных допустимых уровней. Дозы внешнего облучения могут превысить 1 мЗв/г только, как правило, в тех населенных пунктах, в которых плотность загрязнения превышает 20 Ки/км<sup>2</sup>.

Исключения составляют лесные угодья, где мощность дозы бывает в несколько раз больше, чем в близлежащих населенных пунктах, и где снижение дозовой нагрузки определяется главным образом распадом радионуклидов.

В настоящее время основные усилия должны быть направлены на снижение риска воздействия отдаленных эффектов облучения в силу того, что население подвергается долговременному (хроническому) облучению. Мероприятия должны становиться долговременными, ежедневными, охватывающими большую группу населения.

## 2. ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

### 2.1. Основные экологические понятия и термины

*Экология* – наука о взаимодействии человека и природной среды. Объектом изучения этой науки является в основном биосфера. *Биосфера* – это та часть планеты, в пределах которой существует активная жизнь, т. е. где живут и размножаются растения и животные организмы, начиная от микроорганизмов и до более сложных биологических объектов, включая человека. В состав биосферы входят:

- нижние слои атмосферы;
- гидросфера;
- верхняя часть литосферы.

Условными границами биосферы являются озоновый слой на высоте 20–30 км от Земли (верхняя) и литосфера на глубину 2–4 км (нижняя). Биосфера состоит из четырех компонентов:

- живое вещество (растения, микроорганизмы, животные);
- биогенное вещество (продукты деятельности живого вещества);
- костное вещество (породы неорганического происхождения и вода);
- биокостное вещество (продукт синтеза живого и неживого – почвы, ила, осадочных пород).

Биосфера образовалась около 4 млрд. лет назад. Основу взаимосвязи явлений, объектов и процессов в биосфере представляет непрерывный биогеохимический цикл миграции химических элементов (круговорот веществ) между атмосферой, гидросферой, литосферой и живым веществом. Необходимая энергия для осуществления такого цикла поступает от Солнца. Схема биогеохимического цикла показана на рис. 2.1.

*Атмосфера* – внешняя газообразная оболочка Земли, состоящая из тропосферы, стратосферы, мезосферы и ионосферы. Она обеспечивает процессы круговорота веществ, регулирует поступление солнечной энергии, является накопителем и источником атмосферной влаги, а также средой, в которую удаляются остаточные газообразные продукты жизнедеятельности.

*Гидросфера* – водная оболочка Земли. Она обеспечивает процессы круговорота веществ, преобразует солнечную энергию, регулирует динамическое равновесие в природе, является главным источником воды – необходимого компонента всех биохимических процессов.



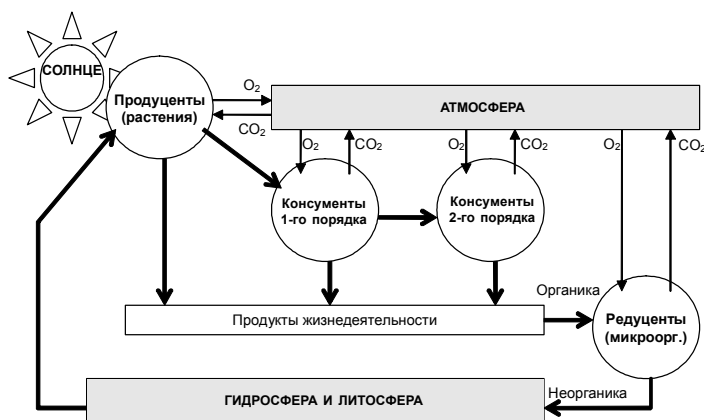


Рис. 2.1. Схематическое изображение биогеохимического цикла в природных комплексах Земли

*Литосфера* – твердая оболочка Земли. Она обеспечивает процессы круговорота веществ, аккумулирует и перераспределяет солнечную энергию, является стоком атмосферной влаги, а также средой, в которую удаляются остаточные минерализованные продукты жизнедеятельности.

Структурным звеном биосферы является *биогеоценоз* – пространственно ограниченная и внутренне однородная природная система функционально связанных между собой природных условий, растений и живых организмов, которая характеризуется определенным энергетическим состоянием, скоростью и типом обмена веществ и информацией.

*Экосистема* – функциональный элемент биосферы, включающий в себя совокупность биогеоценозов.

*Сообщество* – набор различных живых организмов и/или растений, функционально связанных между собой в пределах одной экосистемы.

*Популяция* – набор живых организмов или растений одного вида, живущих в пределах одного биогеоценоза.

Основными свойствами биогеоценоза и экосистемы являются их устойчивость и изменчивость. Основными качествами биогеоценоза и экосистемы являются их биологическая продуктивность, т. е. скорость создания живого вещества, и биомасса.

Биосфера находилась в устойчивом эволюционирующем состоянии сотни миллионов лет. Ресурсы и равновесие биосферы, сложившиеся в течение этого периода, с приходом человека, способного повлиять

на установившиеся равновесные цепочки круговорота веществ, всего за пару сотен лет начинают заметно меняться. Человеческая цивилизация только в начале прошлого века начала уважительно относиться к законам экологии, которые впервые сформулировал В. И. Вернадский. В упрощенной версии они выглядят следующим образом.

- Все связано со всем. Между компонентами природных комплексов существует колоссальная сеть связей, и любое изменение качества состояния природы передается по этим связям всем ее компонентам.
- Ничто никуда не исчезает. Например, извлеченные из недр ископаемые подвергаются трансформации в другие искусственные соединения, которые изменяют равновесие.
- Ничто не дается даром. Любой выигрыш в одном – потери в другом; что извлечено из природы, должно быть возмещено – платежей по векселям природы избежать не удастся, и рано или поздно они о себе напомнят в полной мере.

• Природа знает как лучше. Эволюция привела природу к состоянию, когда ни одно вещество не синтезируется естественным путем, если нет естественных ферментов или средств для его разложения. Человек искусственно синтезировал многие не знакомые природе органические материалы, и природа лихорадочно ищет редуценты (микроорганизмы, бактерии), способные справиться с ними.

Часть биосферы, преобразованная человеком, называется *ноосферой*. Остатки потребляемых ресурсов природы и отходы, образующиеся в ноосфере в результате антропогенной и техногенной деятельности, возвращаются в биосферу, что создает дополнительный цикл, не предусмотренный в природе.

*Окружающая среда* – среда обитания человека, характеризующаяся совокупностью физических, химических и биологических факторов, оказывающих на человека прямое или косвенное, немедленное или отдаленное воздействие.

## 2.2. Загрязнение окружающей среды

С момента возникновения человеческой цивилизации последняя оказывает на природную среду заметное воздействие, которое стало настолько интенсивным в последнее время, что его ближайшие и отдаленные последствия могут существенно изменить облик земного шара. Влияние человека на окружающую среду выражается в следующих формах:



ПДК некоторых вредных веществ в воздухе, мг/м<sup>3</sup>

сферы в условиях, благоприятных для поддержания и воспроизводства на Земле созданных природой растений, животного мира и человека.

Стратегия реализации мероприятий по охране природы основывается на следующих главных положениях:

- снижение потребления невозобновляемых ресурсов (рациональное природопользование);
- соблюдение санитарных стандартов (контроль над выбросами);
- безотходные технологии (превращение отходов в ресурсы);
- повышение энергоэффективности (снижение энергопотребления с повышением объемов производства);
- учет экологического равновесия в экосистемах.

*Рациональное природопользование* – использование ресурсов биосферы для нужд развития потребностей общества в условиях сохранения способности затронутых биосистем и биосферы в целом к самовосстановлению и саморегулированию.

*Санитарные стандарты* качества природной среды устанавливаются ее оптимальные характеристики, обеспечивающие сохранение здоровья населения и минимально приемлемый экологический риск для живой природы. Подразделяются на экологические и производственно-технологические.

*Экологические стандарты* устанавливают предельно допустимые нормы антропогенного воздействия на природную среду, превышение которых угрожает здоровью человека, растениям и животным. Устанавливаются в виде предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязнителей.

При нормировании ПДК используется принцип наиболее чувствительного загрязнителя и его порогового воздействия. В последнее время пороговое воздействие устанавливается с учетом вероятностного риска и границ действия защитных мероприятий. Поэтому устанавливаемые стандарты ПДК имеют несколько вариантов (табл. 2.2).

*ПДК для рабочей зоны* – концентрация вещества в воздухе, которая не вызывает у человека при ежедневном вдыхании (8 ч) в течение всего рабочего стажа детерминистически или стохастически проявленных заболеваний или отклонений в здоровье, обнаруживаемых современными методами.

*ПДК среднесуточная для населенного пункта* – концентрация вещества в воздухе, которая не оказывает на человека вредного прямого или косвенного воздействия в условиях неопределенно долгого круглогодичного дыхания.

*ПДК разовая для населенного пункта* – концентрация вещества в воздухе, которая не вызывает рефлекторных (в том числе субсенсорных) реакций в организме человека.

*Производственно-технологические стандарты* устанавливают экологически безопасный режим работы производственного объекта. Устанавливаются в виде предельно допустимых выбросов (ПДВ) загрязнителей, а также удельных и трансграничных ограничений.

*Предельно допустимый выброс* – норматив (масса загрязнителя в единицу времени), устанавливаемый для конкретного стационарного источника выбросов, отдельного предприятия или совокупности предприятий на данной территории качества атмосферного воздуха с учетом воздействия на него выбросов от указанного и всех других источников, а также соблюдение установленных предельно допустимых (экологических) нагрузок для экосистем и технических нормативов выбросов.

*Трансграничное загрязнение атмосферного воздуха* – загрязнение атмосферного воздуха над территорией Республики Беларусь в результате переноса примесей, источники которых расположены на территории другого региона, государства.

*Удельные выбросы загрязняющих веществ* – масса загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух различными источниками загрязнения, обусловленная современным уровнем развития техники и технологии в расчете на единицу мощностных, энергетических и

| Вещество        | Единица измерения | ПДК для рабочей зоны (источника выбросов) | ПДК среднесуточная (отдельного предприятия) | ПДК разовая (для населенного пункта) |
|-----------------|-------------------|---|---|--------------------------------------|
| Аммиак          | мг/м <sup>3</sup> | 10  | 0,1   | 0,1                                  |
| Бензол          | мг/м <sup>3</sup> | 0,1                                       | 0,01  | 0,01                                 |
| Гидразин        | мг/м <sup>3</sup> | 0,1                                       | 0,01  | 0,01                                 |
| Диоксид азота   | мг/м <sup>3</sup> | 5,0                                       | 0,04  | 0,085                                |
| Диоксид серы    | мг/м <sup>3</sup> | 10,0                                      | 0,05  | 0,5                                  |
| Оксид углерода  | мг/м <sup>3</sup> | —   | —   | —                                    |
| Тетраэтилсвинец | мг/м <sup>3</sup> | —   | —   | —                                    |
| Формальдегид    | мг/м <sup>3</sup> | 0,5                                       | 0,012                                       | 0,035                                |
| Хлорид водорода | мг/м <sup>3</sup> | 5,0                                       | 0,2   | 0,2                                  |

материальных характеристик продукции, полученной при данном технологическом процессе.

Рассеивание вредных веществ в атмосфере зависит главным образом от погоды (давление, температура, скорость ветра, влажность). Эти условия определяются состоянием тропосферы. Устойчивость (стратификация) параметров приземной атмосферы зависит от вертикального градиента температуры в тропосфере. Как правило, температурный градиент в тропосфере отрицательный (рис. 2.2).

Рис. 2.2. Изменение температуры атмосферного воздуха с высотой

*Инверсия тропосферы* – состояние положительного градиента, когда температура нижних слоев ниже температуры верхних. Инверсия препятствует вертикальным потокам и образует особо устойчивое состояние, когда частицы практически не мигрируют по вертикали.

Кроме параметров нижних слоев атмосферы, которые обобщаются коэффициентом температурной стратификации атмосферы  $A$ , на рассеивание выбросов в атмосфере влияют высота источника  $H$ , объемный расход выбрасываемых газов  $V$ , разность температур газовой смеси и атмосферы  $\Delta T$ , способность загрязнителя к оседанию  $F$  и условия выхода газовой смеси из устья трубы. При расчете ПДВ учитывается мощность других источников, выраженная фоновой концентрацией загрязнителя  $C_\phi$ :

$$\text{ПДВ} = K_p (\text{ПДК} - C_\phi) = (\text{ПДК} - C_\phi) H^2 (V \Delta T)^{1/3} (AF_{\min})^{-1}, \quad (2.1)$$

где  $K_p$  – коэффициент разбавления.

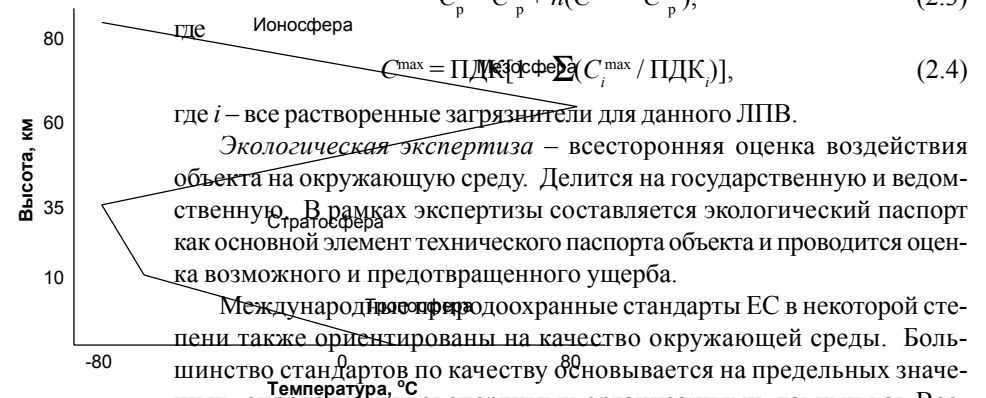
По значению ПДВ устанавливают допустимый суточный выброс и максимально допустимую концентрацию на срезе трубы:  $C_{\max} = \text{ПДВ} / V$ , которая является параметром, контролируемым в процессе работы объекта.

В отличие от атмосферы, которая по своей природе быстро и хорошо гомогенизируется на больших расстояниях, водные системы, как правило, изолированы. Поэтому ПДК, г/л, для них устанавливается в зависимости от назначения водоема и особенностей фауны. Такой подход называется *принципом лимитирующего показателя вредности* (ЛПВ) – наиболее вероятное неблагоприятное воздействие загрязнителя.

Кроме ПДК загрязнителей, для водоема существенным экологическим показателем является коэффициент биологической (БПК), биохимической (БХПК) и химической (ХПК) потребности в кислороде (количество кислорода, мл, необходимое для окисления 1 мг растворенных органических веществ). Расчет допустимого состава загрязнителей в сточных водах определяется по концентрации взвесей  $C_{\text{взв}}$  и по концентрации растворенных веществ  $C_p$ . Для этого при  $n$ -й кратности разбавления получим, соответственно,

$$C_{\text{взв}} = C_{\text{взв}}^0 + n \text{ПДК}_{\text{взв}}; \quad (2.2)$$

$$C_p = C_p^0 + n(C_p^{\max} - C_p^0), \quad (2.3)$$



где  $i$  – все растворенные загрязнители для данного ЛПВ.  
*Экологическая экспертиза* – всесторонняя оценка воздействия объекта на окружающую среду. Делится на государственную и ведомственную. В рамках экспертизы составляется экологический паспорт как основной элемент технического паспорта объекта и проводится оценка возможного и предотвращенного ущерба.  
 Международные природоохранные стандарты ЕС в некоторой степени также ориентированы на качество окружающей среды. Большинство стандартов по качеству основывается на предельных значениях, определяемых экспертными организациями, такими как Всемирная Организация Здравоохранения. Главной задачей стандартов по качеству воздуха является защита здоровья населения и установление границ безопасности. Экономические вопросы и технические условия не рассматриваются. Обычно оценка риска составляет часть этого процесса.

### 3. РАДИОЭКОЛОГИЯ КАК ЧАСТЬ ЭКОЛОГИИ

#### 3.1. Радиоактивный распад и изотопы

В последнее время ориентиром природоохранного законодательства в ЕС называется подход, позволяющий использовать наилучшие доступные технологии (BAT – *the best available technology*). Этот подход предполагает, что все источники в странах, к которым применимо одно законодательство, например страны ЕС, имеют одинаковые проблемы с выбросами. В рамках директив ЕС принцип BAT определяется следующим образом:

- наилучший – как наиболее экономный в достижении высокого, крупномасштабного уровня защиты окружающей среды в целом;
- доступный – как возможный к применению при экономически и технически эффективных условиях с учетом издержек и преимуществ (затраты/выгода);
- технология – включающая как используемую технологию, так и конструкцию установки, технику строительства, обслуживания, условия эксплуатации и снятия с эксплуатации.

Определение BAT может изменяться от случая к случаю в рамках директивы. BAT для каждого источника может отличаться из-за технических характеристик установки, ее географического месторасположения и местных условий окружающей среды.

Следующий принцип – комплексное предотвращение и контроль загрязнений (IPPC – *Integrated Pollution Prevention and Control*) – уходит от узкого подхода, ориентированного на конец производственного цикла, такого как BAT, и даже от нормативов выбросов к более комплексному и превентивному подходу. Подход IPPC включает в себя более широкий круг проблем, например энергетическая эффективность и минимизация количества отходов, а также вопросы управления и организации, рассматривает трансграничные вопросы воздействия на окружающую среду – от локальных до глобальных. Введение большого количества средств контроля с целью сокращения выбросов нескольких загрязняющих воздух веществ может, например, увеличить затраты на производство энергии или сдвинуть проблему от одного типа среды к другому (от воздуха к воде или отходам).

История атомной энергетики началась в конце XIX в. и, вероятно, не закончится до тех пор, пока человечество не найдет более надежный, постоянный и безопасный источник энергии. Эта история состоит из удивительных открытий, блестящих инженерных решений и драматических событий, вместившихся в 110 последних лет.

- Открытие в 1895 г. Вильгельмом Рентгеном X-лучей.
- Гипотеза об электромагнитной природе рентгеновского излучения подтверждена экспериментально в 1913 г. Максом Лауэ.
- В 1896 г. Анри Беккерель случайно обнаружил специфическое излучение образцов урановой руды, названное впоследствии радиоактивным.
- В 1897 г. Дж. Томсоном предложена модель атома, согласно которой он является очень легкой положительно заряженной субстанцией, в которую вкраплены электроны.
- В 1898–1903 гг. цикл исследований радиоактивности Пьером и Марией Кюри завершился открытием и выделением радия и полония.
- В 1911 г. Эрнест Резерфорд предложил планетарную модель атома: вокруг положительного ядра по орбитам вращаются электроны.
- 1914 г. – открытие Э. Резерфордом протона.
- В 1920-х гг. английский ученый Льюис Грей начинает развивать радиационную дозиметрию; в 1928 г. образована неправительственная организация МКРЗ – Международная комиссия по радиационной защите. Председателем был шведский ученый Георг Зиверт.
- 1932 г. – открытие Джеймсом Чедвиком нейтрона и предположение Дмитрия Иваненко о модели ядра, содержащего протоны и нейтроны.
- В 1938 г. при облучении нейтронами соединений урана открыт эффект деления ядер (О. Ган и Ф. Штрассман), а в 1940 г. была доказана возможность самопроизвольного деления ядер урана (К. А. Петржак и Г. Н. Флеров).
- 1943 г. – в Чикаго запущен первый ядерный реактор.
- 1943–1945 гг. – реализация Манхэттенского проекта создания атомной бомбы (Л. Гровс и Р. Оппенгеймер).
- 1954 г. – в г. Обнинске введена в действие первая в мире атомная электростанция.
- 1986 г. – катастрофа на четвертом блоке Чернобыльской АЭС.

*Радиоактивность* – самопроизвольный распад нестабильных ядер атомов с их возможным превращением в ядра других элементов, сопровождающийся испусканием ядерных излучений. Превращения происходят в ядре атома, которое состоит из протонов – положительно заряженных частиц, а также нейтронов – частиц приблизительно с той же массой, но не имеющих никакого заряда.

Количество протонов в ядре атома соответствует порядковому номеру элемента в таблице Д. И. Менделеева. *Массовое число* – это сумма протонов и нейтронов в ядре. В стабильных ядрах между ними соблюдается равновесие. В противном случае ядро атома будет нестабильным, т. е. способным к самопроизвольному распаду с излучением энергии.

Разновидности ядер атомов одного и того же элемента, обладающие разными массовыми числами (разным числом нейтронов), но занимающие одно и то же место в периодической таблице (одинаковое число протонов), называются *изотопами*. Различают устойчивые (стабильные) и неустойчивые (радиоактивные) изотопы. Некоторые элементы вообще не имеют стабильных изотопов, например, прометий и технеций. Это также характерно для элементов, стоящих в конце периодической системы, начиная с франция.

Нестабильные ядра находятся в возбужденном состоянии, появляется лишняя энергия, которая рано или поздно покидает ядро. Процесс испускания избыточной энергии называется *радиоактивным распадом*. При этом разные изотопы высвобождают свою энергию различными способами. Было открыто три вида излучений: альфа, бета и гамма ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ).

При  $\alpha$ -распаде ядро атома (как правило, с массовым числом не менее 200) теряет положительно заряженную частицу, состоящую из двух протонов и двух нейтронов (ядро атома гелия). Если это происходит, то, согласно правилу сдвига, порядковый номер в менделеевской таблице уменьшается на две единицы, а массовое число – на четыре. Это значит, что взамен прежнего появляется новый элемент.

При  $\beta$ -распаде один из нейтронов превращается в протон, а из ядра вылетает отрицательно заряженная частица – электрон. В ядре происходит сдвиг вправо, и порядковый номер вновь образующегося элемента становится на одну единицу больше, а массовое число не меняется. Некоторые радиоактивные изотопы стабилизируются путем превращения одного из протонов в нейтрон с одновременным испусканием позитрона ( $\beta^+$ -распад), и, соответственно, заряд ядра уменьшается на еди-

ницу. Формальным аналогом  $\beta^+$ -распада является так называемый К-захват, когда ядро захватывает один из электронов К-оболочки, а атом испускает характеристическое рентгеновское излучение.

Образующиеся после распада новые изотопы называются *дочерними* по отношению к своим предшественникам. В целом ряде случаев для стабилизации ядра радиоактивного изотопа недостаточно испускания  $\alpha$ - или  $\beta$ -частицы, которое поэтому сопровождается излучением одного или нескольких квантов высокоэнергетического электромагнитного излучения, называемого  $\gamma$ -излучением. Например, дочерним изотопом при  $\beta$ -распаде  $^{137}\text{Cs}$  является изотоп  $^{137\text{m}}\text{Ba}$ , ядро которого при этом находится в метастабильном возбужденном состоянии. Переход к стабильному ядру сопровождается  $\gamma$ -излучением, которое имеет электромагнитную природу и не содержит ни протонов, ни нейтронов, ни  $\beta$ -частиц. В данном случае сдвига не происходит, т. е. элемент остается тем же. Барий из  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  переходит в стабильный изотоп  $^{137}\text{Ba}$ .

При распаде ядер количество исходного (материнского) изотопа уменьшается, причем у разных изотопов с разной скоростью. Время, в течение которого происходит уменьшение этого количества в два раза, называется *периодом полураспада*. Диапазон его для разных ядер очень широк – от долей секунды до миллиардов лет.

Скорость распада  $A$  пропорциональна числу ядер  $N$  радионуклида:

$$dN/dt = A = \lambda N. \quad (3.1)$$

Постоянная распада  $\lambda$  различна для разных изотопов; она имеет размерность, обратную времени, и характеризует долю общего числа атомов изотопа, распавшихся за единицу времени, и связана с периодом полураспада  $T$ :

$$\lambda T = \ln 2 = 0.693. \quad (3.2)$$

Для того чтобы сравнивать между собой скорости распада ядер разных элементов, за единицу принята скорость распада 1 г радия или 1 Ки. Эта внесистемная единица, называемая *активностью*, отражает меру радиоактивности изотопа. В Международной системе единиц измерений (СИ) за единицу активности принят беккерель (Бк), представляющий собой 1 распад в 1 секунду. В 1 г радия происходит примерно  $3.7 \cdot 10^{10}$  распадов в секунду, следовательно, его активность равна 37 млрд. Бк, т. е. 1 Ки =  $3.7 \cdot 10^{10}$  Бк. Часто используется величина, называемая *удельной активностью* (активность в единице массы или объема), а также поверхностная активность (активность на единицу поверхности).

### 3.2. Дозы облучения

Проникающая способность у трех указанных видов радиоактивного излучения различна, поскольку различна их природа. Такая способность определяется величиной (длиной) пробега той или иной ионизирующей частицы в данной среде, при прохождении которой энергия частицы становится равной энергии теплового движения.

$\alpha$ -Частицы обладают очень малым пробегом (в воздухе 2–3 см). Они задерживаются простым листом бумаги, верхним слоем кожи человека. Поэтому при внешнем облучении  $\alpha$ -частицы для человека неопасны, однако чрезвычайно опасны при поступлении внутрь организма – с пищей, через открытые ранки, слизистые и особенно с вдыхаемым воздухом.

$\beta$ -Частицы имеют длину пробега в воздухе до 14 см, а в живом организме – не более 2 см (в зависимости от энергии испускаемых  $\beta$ -частиц).  $\beta$ -Частицы, таким образом, опасны при попадании на кожу, слизистые, в легкие и желудочно-кишечный тракт.

Зависимость длины пробега  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц от энергии иллюстрируется нижеследующей табл. 3.1.

Проникающая способность  $\gamma$ -излучения в воздухе составляет сотни метров.  $\gamma$ -Лучи пронизывают все органы и ткани независимо от того, где находится источник радиоактивности – вне организма или внутри него. Для уменьшения  $\gamma$ -излучения с энергией 1 МэВ в два раза необходимо 1.3 см свинца или 13 см бетона. Ослабление  $\gamma$ -излучения слоями воды или водозквивалентной ткани характеризуется табл. 3.2.

Таблица 3.1

| Проникающая способность $\alpha$ - и $\beta$ -излучений |            |                          |
|---|------------|--------------------------|
| Энергия излучения, МэВ                                  | Воздух, см | Биологическая ткань, мкм |
| $\alpha$ -Частицы                                       |            |                          |
| 4   | 2.5        | 31                       |
| 6   | 4.6        | 56                       |
| 8   | 7.4        | 91                       |
| 10  | 10.6       | 130                      |
| $\beta$ -Частицы  |            |                          |
| 0.01  | 0.13       | 2                        |
| 0.1   | 10.1       | 158                      |
| 1   | 306        | 4 800                    |
| 10  | 3 900      | 60 800                   |

### Проникающая способность $\gamma$ -лучей

Таблица 3.2

При прохождении  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -квантов через вещество происходит их взаимодействие с атомами и молекулами. Как правило, такое взаимодействие приводит к возбуждению и ионизации атомов облученной среды (отрыв электронов от атомных оболочек), что, в свою очередь, приводит к вторичной ионизации, к разрыву связей в молекулах, образованию свободных радикалов и может привести к образованию химического соединения, не характерного для данной среды, что особенно опасно для живых организмов.

Принимая во внимание месторасположение и природу источника ионизирующего излучения, облучение объекта можно подразделить на внешнее и внутреннее, естественное и искусственное.

| Коэффициент ослабления | Естественное ионизирующее излучение – космические лучи и излучение земных недр |          |
|------------------------|--|----------|
|                        | Энергия излучения, МэВ   | Доза, Зв |
| 2                      | 0.1  | 1.75     |
| 5                      | 0.3  | 30       |
| 10                     | 0.5  | 30       |

*Доза* – доля энергии радиоактивного излучения, которая тратится на ионизацию единицы массы среды или биологического объекта. При оценке действия излучения на объект различают экспозиционную, поглощенную, эквивалентную, эффективную и коллективную дозы.

Количественной характеристикой степени опасности источника ионизирующего излучения является *экспозиционная доза*, которая выражает долю энергии излучения, преобразованную в энергию ионов, определяемую как суммарный заряд всех ионов одного знака в единице массы или объема сухого атмосферного воздуха. Единица экспозиционной дозы в системе СИ – Кл/кг. Например, на расстоянии 1 см от источника  $^{226}\text{Ra}$ , имеющего активность 1 Ки, в 1 см<sup>3</sup> воздуха образуются  $2 \cdot 10^9$  пар ионов, при этом электростатический заряд в 1 кг воздуха составит  $2.58 \cdot 10^{-4}$  кулона (Кл). Внесистемная единица – рентген (Р). 1 Р соответствует образованию в 1 см<sup>3</sup> сухого воздуха 2 млрд. пар ионов (что эквивалентно 1 электростатической единице

CGSE для ионов каждого знака). Энергетический эквивалент рентгена = 0.114 эрг/см<sup>3</sup> = 87.7 эрг/г.

Для источников  $\gamma$ -излучения часто используется специфическая единица, характеризующая как активность источника, так и дозообразование от него – мг-экв радия. Источник в 1 мг-экв радия создает в воздухе такую же дозу, как источник, содержащий 1 мг <sup>226</sup>Ra на расстоянии 1 см после фильтра из платины толщиной 1 мм. 1 мг-экв радия создает экспозиционную дозу 8.3 Р/ч.

Часть энергии ионизирующего излучения любого вида, поглощенная в единице массы облучаемого тела (например, тканями организма), называется *поглощенной дозой*. Единица поглощенной дозы в системе СИ – грэй (1 Гр = 1 Дж/кг). Используется также внесистемная единица – рад, которая соответствует поглощению 0.01 Дж энергии излучения в 1 кг облученного вещества (или 100 эрг/г). Одинаковые значения поглощенной дозы от различного вида излучений вызывают различную плотность ионизации в облучаемом объекте, что в случае облучения живых тканей приводит к разному биологическому эффекту. Чтобы учитывать такое неодинаковое воздействие, вводят коэффициент качества ионизирующего излучения  $Q$ , средние значения которого приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Коэффициент качества для разных видов излучений

| Излучение                                    | $Q$ |
|--|-----|
| $\gamma$ -Излучение, рентгеновское излучение | 1   |
| $\beta$ -Излучение, электроны, позитроны     | 1   |
| Протоны и нейтроны с энергией менее 10 мЭв   | 10  |
| $\alpha$ -Излучение с энергией менее 10 мЭв  | 20  |

Зная поглощенную дозу и вид излучения, можно определить эквивалентную дозу  $H$ , которая вводится для оценки возможного ущерба здоровью человека от данного вида излучения. Она равна произведению поглощенной дозы  $D$  в данном элементе объема биологической ткани на средний коэффициент качества данного излучения:

$$H = QD. \quad (3.3)$$

Также необходимо учитывать, что отдельные органы и ткани человека более чувствительны к радиации, чем другие, например при одинаковой эквивалентной дозе возникновение рака в легких более вероятно, чем в щитовидной железе. Для ранжирования радиационного риска для раз-

личных органов и приведения неравномерного облучения тела к единой оценке последствий такого облучения используют величину эффективной дозы  $H_E$ . Она отражает суммарный эффект облучения различных тканей и органов тела и определяется как сумма произведений доз, полученных каждым органом, на соответствующий коэффициент риска  $w_i$  (табл. 3.4), учитывающий чувствительность этого органа к излучению:

$$H_E = \sum(Hw_i). \quad (3.4)$$

*Коллективная доза*  $H_k$  – величина, отражающая радиационный риск для группы людей (когорты) или населения в целом. Она учитывает возрастное, половое и профессиональное различие и определяется как сумма произведений средней эффективной дозы, получаемой различными группами населения, на число человек в такой группе  $m_i$ :

$$H_k = \sum(H_{Ei} m_i). \quad (3.5)$$

Таблица 3.4

Коэффициент риска для разных органов и тканей тела

| Органы и ткани       |  | $w_i$ |
|----------------------|--|-------|
| Костный мозг, легкие |  | 0.12  |
| Костная ткань        |  | 0.03  |
| Щитовидная железа    |  | 0.05  |
| Другие ткани         |  | 0.15  |
| в системе СИ         |  | 0.25  |
| внесистемная         |  | 0.30  |
| в системе СИ         |  | 1.00  |

| Доза           | Размерность  |                           | Соотношение единиц                 |
|----------------|--------------|---------------------------|------------------------------------|
|                | в системе СИ | внесистемная              |                                    |
| Экспозиционная | Другие ткани | Р                         | 1 Кл/кг = 3.88 · 10 <sup>3</sup> Р |
|                | в системе СИ | Р (рентген)               | 1 Р = 2.58 · 10 <sup>4</sup> Кл/кг |
| Поглощенная    | Другие ткани | Рад                       | 1 Гр = 1 Дж/кг                     |
|                | в системе СИ | Гр (грэй)                 | 1 Гр = 100 рад                     |
| Эквивалентная  | Другие ткани | Зв                        | 1 Зв = 100 бэр                     |
|                | в системе СИ | Зв (зиверт)               | 1 бэр = 0.01 Зв                    |
| Эффективная    | Другие ткани | Бэр                       | 1 Зв = 100 бэр                     |
|                | в системе СИ | Бэр                       | 1 бэр = 0.01 Зв                    |
| Коллективная   | Чел.-Зв      | Чел.-Зв                   | 1 чел.-Зв = 100 чел.-бэр           |
|                | в системе СИ | Чел.-Зв (человеко-зиверт) | 1 чел.-бэр = 0.01 чел.-Зв          |

Таблица 3.5

В табл. 3.5 приводятся размерности и соотношения единиц для дозиметрических величин, рассмотренных выше.

Соотношение между дозиметрическими единицами



Для практических целей и приблизительных оценок доз излучения от  $^{137}\text{Cs}$  (или иного источника  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения, или рентгеновского) можно применять соотношение

$$1 \text{ P} = 1 \text{ рад} = 1 \text{ бэр}; 1 \text{ мкР/ч} = 0.01 \text{ мкГр/ч} = 0.01 \text{ мкЗв/ч}.$$

Радиационный фон от внешних источников излучения измеряется обычно в единицах *мощности экспозиционной дозы*, которая представляет собой приращение экспозиционной дозы в единицу времени. Аналогично этой величине вводится *мощность эквивалентной дозы* – приращение эквивалентной дозы в единицу времени. На территории Беларуси в дочернобыльский период радиационный фон был равен в среднем 12–13 мкР/ч и находился в диапазоне от 3 до 20 мкР/ч. В настоящее же время в отселенной зоне наблюдаются значения до 500–600 мкР/ч.

Естественный радиоактивный фон от природных источников складывается из космической и земной составляющих. Содержание естественных радиоизотопов в почве, Бк/кг, составляет:  $^{14}\text{C}$  – 1.5–6;  $^{40}\text{K}$  – 0.2–1200;  $^{87}\text{Rb}$  – 20–560;  $^{210}\text{Po}$  – 8–220;  $^{226}\text{Ra}$  – 7–180;  $\Sigma\text{Th}$  – до 16 000;  $\Sigma\text{U}$  – 8–110. Концентрация активности в тропосфере, Бк/м<sup>3</sup>, составляет:  $^3\text{H}$  – 0.0015;  $^{14}\text{C}$  – 0.044;  $^{222}\text{Rn}$  – 0.2–10;  $^{85}\text{Kr}$  – 0.62. Содержание некоторых изотопов в объектах окружающей среды приведено в табл. 3.6.

Таблица 3.6  
Удельная активность некоторых изотопов в объектах окружающей среды, Бк/кг

За счет глобальных выпадений при испытаниях ядерного оружия средний запас  $^{137}\text{Cs}$  на территории СССР в 1974 г. составлял 92–33 мкКи/км<sup>2</sup>, а  $^{90}\text{Sr}$  – 50–12 мкКи/км<sup>2</sup>. Диапазон изменения мощности экспозиционной дозы на высоте 1 м находился в пределах от 0.10 до 1.25 мкР/ч. По средним оценкам содержание радиоизотопов в человеческом теле массой 75 кг составляет:  $^3\text{H}$  – 52 Бк;  $^{87}\text{Rb}$  – 24;  $^{40}\text{K}$  – 7200;  $^{14}\text{C}$  – 202;  $^{226}\text{Ra}$  – 4;  $^{238}\text{U}$  – 9. Следовательно, средняя удельная активность тела человека составляет порядка 100 Бк/кг.

Эффективная доза от естественных источников в нормальных условиях составляет: от внешнего облучения 0.3–0.6 мЗв/год (в зависимости

от широты и высоты над уровнем моря); от внутреннего облучения порядка 1.4 мЗв/год. Основную долю составляет облучение от радона и радиоизотопа  $^{40}\text{K}$  – до 85% (рис. 3.1).

Ra  
 $^{40}\text{K}$

Рис. 3.1. Состав годовой эффективной дозы от природных источников



Рис. 3.2. Состав годовой эффективной дозы от искусственных источников (без медицинских источников облучения)

Организм человека обладает адаптивными и защитными механизмами, в результате чего в нем частично нейтрализуются последствия предыдущего облучения. Так, период полувыведения  $^{137}\text{Cs}$  из организма составляет 110 суток,  $^{131}\text{I}$  – 7.5 суток. Эффекты, которые проявляются сразу после или во время облучения, называют *ближними*, или *детерминированными*, т. е. *причинно обусловленными*: есть воздействие – есть реакция организма. При поглощенной дозе 0.5–1.0 Гр наблюдаются изменения в составе крови; при дозе 1–2 Гр – легкая лучевая болезнь; при дозе 2–4 Гр – острая форма лучевой болезни, чаще всего приводящая к нетрудоспособности, а при дозе 4–6 Гр смертность составляет 50–100%. Ежедневное облучение дозой 1–5 мГр по достижению поглощенной дозы 0.5–1.0 Гр приводит к хронической форме лучевой болезни.

Позже могут проявиться серьезные отдаленные последствия (стохастические эффекты) облучения: у некоторых людей через 5–30 лет появились раковые опухоли. Этот процесс носит вероятностный характер, как и повреждение отдельных фрагментов ДНК на клеточном уровне, что может привести к отрицательным наследственным проявлениям.

У отдельных жителей южных районов Беларуси в настоящее время могут проявиться стохастические эффекты облучения. Здесь население получает дополнительные к естественному фону дозы облучения. Примерно 85% жителей этих регионов получают дополнительные дозы, не превышающие 1 мЗв/год, что укладывается в установленный законом норматив, но у отдельных лиц они превышают норму иногда более чем на порядок.

Однако в каждом конкретном случае пока еще невозможно однозначно связать появление опухоли с фактом облучения в результате проживания на загрязненных территориях, так как слишком велика частота спонтанного появления опухоли даже у людей, не связанных с дополнительным воздействием излучений. Статистически значимую разницу в настоящее время обнаружить нельзя. Она наблюдается только у людей, щитовидная железа которых была облучена радиоактивным  $^{131}\text{I}$  в течение первых недель после аварии на Чернобыльской АЭС. Другие виды раковых новообразований, видимо, проявятся в будущем, так как принято считать, хотя это не доказано, что изменения в клетке приводят к отдаленным последствиям независимо от дозы облучения, причем вероятность возникновения рака пропорциональна этой дозе (так называемая беспороговая концепция).

Клинические проявления при облучении человека достоверно обнаруживаются, начиная с поглощенных доз 0.1–0.5 Гр. Выше 0.5 Гр дей-

ствительно имеется пропорциональная зависимость между дозой облучения и риском заболеть или умереть от рака. Область меньше 0.5 Гр принято считать областью малых доз, где зависимость между дозой и риском пока неизвестна. Сюда относятся дозы от естественного излучения, от рентгеновской диагностики, от профессионального облучения в пределах радиационно-гигиенических нормативов. По этим нормативам («Закон о радиационной безопасности населения», «Нормы радиационной безопасности») допустимая техногенная доза для профессиональных работников составляет 20 мЗв/год в среднем за 5 лет, но не более 50 мЗв/год; для населения соответственно 1 и 5 мЗв/год.

Для консервативных оценок влияния малых доз принята та же пропорциональная зависимость «доза – эффект». Если человек получит дозу 1 Зв при облучении всего тела, то в дальнейшем существует вероятность умереть от лейкоза, равная 1 / 500 в год. Поглощенная доза от чернобыльского компонента в Беларуси в 1000 раз меньше, а значит вероятность умереть равна 1 / 500 000, т. е. из одного миллиона случаев облучения можно ожидать 2 смерти в год (для сравнения – в Беларуси от самых разных форм рака из 1 млн чел. ежегодно умирает 2–3 тыс.). Напомним также, что средние чернобыльские дозы, как правило, в несколько раз меньше природного облучения.

В то же время необходимо считать (поскольку не доказано обратное), что вероятные отдаленные последствия для здоровья в результате длительного проживания в загрязненных районах в условиях пусть слабого, но постоянно действующего дополнительного ионизирующего излучения могут иметь место.

### 3.3. Основные защитные мероприятия

Применительно к ядерной аварии меры радиационной защиты населения обоснованы необходимостью уменьшить до безопасного уровня воздействие факторов аварии, оказывающих негативное влияние на здоровье людей. Стратегия этих мер строится на основе определенных критериев и принципов, изложенных в нормах радиационной безопасности. Общая цель – не допустить развитие детерминированных эффектов облучения и свести к минимуму риск развития стохастических.

Основными принципами обеспечения радиационной безопасности при практической деятельности являются (ст. 3 Закона «О радиационной безопасности населения Республики Беларусь»):

- принцип нормирования – непревышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников ионизирующего излучения;

- принцип обоснования – запрещение всех видов деятельности по использованию источников ионизирующего излучения, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риск возможного вреда;

- принцип оптимизации – поддержание на достижимо низком уровне с учетом экономических и социальных факторов индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника ионизирующего излучения.

Планируемое повышенное облучение персонала выше установленных пределов доз при ликвидации или предотвращении аварии может быть разрешено только в случае необходимости спасения людей и/или предотвращения их облучения. Планируемое повышенное облучение в эффективной дозе до 100 мЗв/год допускается для мужчин старше 30 лет лишь при их добровольном письменном согласии после информирования о возможных дозах облучения и риске для здоровья.

Повышенное облучение не допускается:

- для работников, ранее уже облученных в течение года в результате аварии или запланированного повышенного облучения с эффективной дозой 200 мЗв;

- лиц, имеющих медицинские противопоказания для работы с источниками излучения.

Лица, подвергшиеся облучению в эффективной дозе, превышающей 100 мЗв в течение года, при дальнейшей работе не должны облучаться в дозе свыше 20 мЗв/год. Облучение эффективной дозой свыше 200 мЗв в течение года должно рассматриваться как потенциально опасное. Лица, подвергшиеся такому облучению, должны немедленно выводиться из зоны облучения и направляться на медицинское обследование. Последующая работа с источниками ионизирующего излучения этим лицам может быть разрешена только в индивидуальном порядке с учетом их согласия по решению компетентной медицинской комиссии. Лица, не относящиеся к персоналу, привлекаемые для проведения аварийных и спасательных работ, должны быть оформлены и допущены к работам как персонал.

Одним из основных положений радиационной защиты населения является определение уровня вмешательства на разных этапах развития последствий аварии. Принято выделять три этапа:

- ранний, наступающий непосредственно после аварийного выброса активности;

- промежуточный, относящийся к промежутку времени после выпадения значительной части радиоактивного выброса на поверхность земли, растительности, сооружений;

- восстановительный, который является наиболее длительным и знаменуется принятием решений, направленных на постепенное возвращение людей к нормальным условиям жизни.

*Уровень вмешательства*, т. е. система мер, применяемых для создания условий возвращения населения к прежнему качеству жизни, определяется предотвращенной дозой – величиной, на которую должна быть уменьшена доза в результате защитных мер. При этом в рекомендациях Международного комитета радиационной защиты сформулированы следующие основные принципы:

- предполагаемое вмешательство должно принести больше пользы, чем вреда, т. е. уменьшение ущерба в результате снижения дозы должно быть достаточным, чтобы оправдать возможный вред вмешательства и затраты на него, включая и социальные;

- форма, масштаб и длительность вмешательства должны быть оптимизированы таким образом, чтобы чистая польза от уменьшения дозы была максимальной.

## 4. ПОСЛЕДСТВИЯ КАТАСТРОФЫ ДЛЯ ЛЕСНОЙ ОТРАСЛИ

### 4.1. Радионуклиды в объектах окружающей среды

При разгерметизации активной зоны реактора радиоизотопы могут проникнуть в атмосферу в следующих основных формах:

- инертные газы – изотопы криптона, ксенона, йода, не способные образовывать химические соединения с другими элементами;
- пары оксидов летучих элементов – цезия, стронция, трития, селена, брома, рубидия, теллура, свинца и др.;
- «горячие» топливные частицы – аэрозоли трансурановых радиоизотопов (плутоний, америций и т. п.).

В атмосфере пары оксидов реагируют с компонентами воздуха уже по обычному кинетическому механизму. В частности, пары оксида цезия, имеющие значительную летучесть при характерных в аварийных режимах температурах, образуют гидроксид, который может постепенно превращаться в карбонат или бикарбонат.

Конденсация паров радиоизотопов в атмосфере, осаждение аэрозолей и вымывание радиоизотопов атмосферными осадками приводит к постепенному осаждению их на объектах окружающей среды, причем за счет ветрового переноса осаждение может происходить достаточно далеко от аварийного объекта, вплоть до глобального распространения.

После осаждения возможно протекание определенного химического и физического взаимодействия форм радиоизотопов с окружающей средой. Природа образующихся продуктов определяет условия проникновения радиоизотопов в почвенные горизонты и растения, закрепления их на поверхностях и т. п.

Так, радиоцезий прочно адсорбируется на глинистых частицах почвы, что затрудняет его миграцию вглубь. Радиостронций на кислых почвах быстро переходит в водорастворимую форму, обеспечивающую значительно более высокую скорость миграции. Трансурановые радиоизотопы за счет взаимодействия с азотсодержащими веществами постепенно переходят в водорастворимые азотнокислые соли, что обеспечивает их почвенную миграцию.

Миграция радионуклидов в почвах определяется тремя основными факторами:

- типом ландшафта;
- типом выпадений;

- относительным количеством подвижных форм радионуклида в данных почвенных условиях.

Количеством «подвижных» форм радионуклидов определяется степень их фиксации грунтами и скорость миграции вглубь почвенных горизонтов – подвижные формы мигрируют быстрее. Во всех случаях фиксация  $^{90}\text{Sr}$  в почвах слабее, чем фиксация  $^{137}\text{Cs}$ , так как количество подвижных форм у первого в почвах больше, чем у последнего. Эффективная скорость миграции цезия в почве (на пахотных землях) составляет примерно 0.12–0.35 см/год.

Степень поглощения и фиксации радионуклидов и в конечном счете их миграция в почвах зависят от агрохимических характеристик почвы (табл. 4.1):

- тип почвы (соотношение минеральных и органических компонентов);
- водный режим;
- pH почвенных растворов;
- катионообменная емкость.

Таблица 4.1

Качественные показатели степени миграции радионуклидов

| Характеристика               | Миграция                             |                                      |
|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
|                              | медленная                            | быстрая                              |
| Тип ландшафта                | Холмистый на склонах                 | Равнинный                            |
|                              | Гидроморфный                         | Автоморфный                          |
| Тип первоначальных выпадений | Сухие (горячие частицы ближней зоны) | Влажные (с осадками в дальних зонах) |
| Тип почвы                    | Суглинистые                          | Дерново-подзолистые                  |
|                              | Торфяные                             | Песчаные                             |
| Водный режим                 | Недренированные                      | Дренированные                        |
| pH почвенных растворов       | Нейтральные почвы                    | Кислые почвы                         |
| Катионообменная емкость      | Высокая                              | Низкая                               |

На рис. 4.1 приводятся кривые изменения активности по вертикальному профилю лесной почвы для трех типичных ландшафтов.

Заметное влияние на скорость миграции радионуклидов в почвах оказывает соотношение между обменными формами  $^{137}\text{Cs}$  и калия,  $^{90}\text{Sr}$  и кальция в почве. При малой концентрации обменных форм калия, кальция и магния происходит их замещение обменными формами цезия и стронция (типичное распределение между обменными формами – на рис. 4.2 и 4.3), которые легко растворяются в почвенных растворах и становятся подвижными.

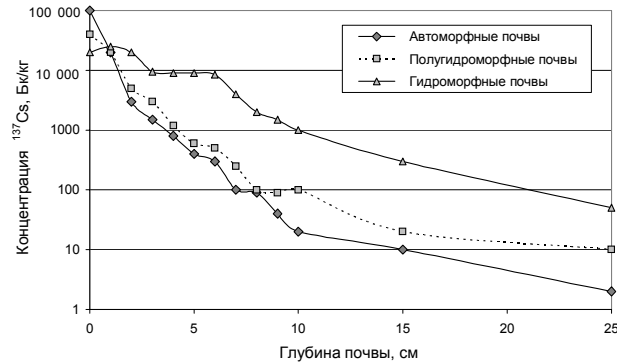


Рис 4.1. Распределение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  по вертикальному профилю лесной почвы для разных ландшафтов

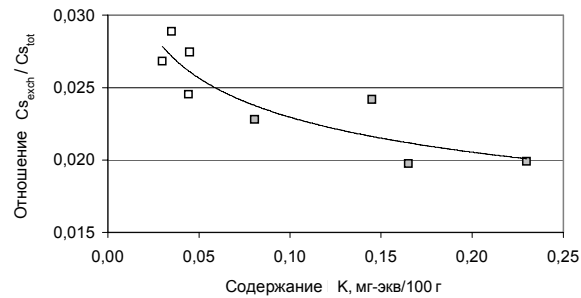


Рис. 4.2. Соотношение между долями обменных форм  $^{137}\text{Cs}$  и содержанием в почве катионов калия (светлые точки относятся к песчаной почве)

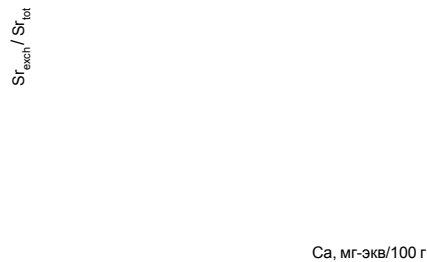


Рис. 4.3. Соотношение между долями обменных форм  $^{90}\text{Sr}$  и содержанием в почве катионов кальция

Для инженерных расчетов можно рекомендовать следующее распределение концентрации  $C_h$ , Бк/г, радионуклидов по глубине  $h$  почвы:

$$C_h = C_0 \exp(-0.693h/h_0), \quad (4.1)$$

где  $C_0$  – содержание радионуклида на поверхности, Бк/г;  $h_0$  – глубина полумиграции (глубина, где  $C_h = 0.5C_0$ ), см.

Прогноз дозы внешнего облучения от почвы обычно производится с учетом изменения во времени  $t$  дозы внешнего облучения  $H(t)$  под влиянием только двух факторов: распада изотопов цезия  $D(t)$  и их миграции  $M(t)$  в почве:

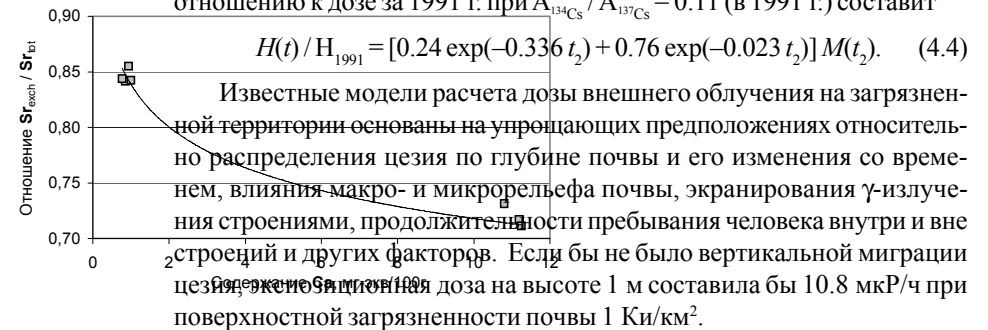
$$H(t) = D(t)M(t). \quad (4.2)$$

С середины 1987 г. более 95% мощности дозы было обусловлено  $\gamma$ -излучением  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Период полураспада  $^{134}\text{Cs}$  составляет около 2 лет. В указанных условиях уменьшение годовой дозы внешнего облучения  $H(t)$  через  $t_1$  лет после 1987 г. по отношению к ее значению в 1987 г. составит

$$H(t)/H_{1987} = [0.52 \exp(-0.336t_1) + 0.48 \exp(-0.023 t_1)] M(t_1). \quad (4.3)$$

Аналогично снижение годовой дозы через  $t_2$  лет после 1991 г. по отношению к дозе за 1991 г. при  $A_{^{134}\text{Cs}}/A_{^{137}\text{Cs}} = 0.11$  (в 1991 г.) составит

$$H(t)/H_{1991} = [0.24 \exp(-0.336 t_2) + 0.76 \exp(-0.023 t_2)] M(t_2). \quad (4.4)$$



Известные модели расчета дозы внешнего облучения на загрязненной территории основаны на упрощающих предположениях относительно распределения цезия по глубине почвы и его изменения со временем, влияния макро- и микрорельефа почвы, экранирования строениями, продолжительности пребывания человека внутри и вне помещений и других факторов. Если бы не было вертикальной миграции цезия, то в 1991 г. доза на высоте 1 м составила бы 10.8 мкР/ч при поверхностной загрязненности почвы 1 Ки/км<sup>2</sup>.

При этом экспозиционная доза определяется интегрированием уравнения (4.1) по концентрационному профилю с учетом ослабления  $\gamma$ -излучения  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  при прохождении через соответствующий слой грунта. Низкоэнергетическое  $\beta$ -излучение  $^{137}\text{Cs}$  поглощается грунтом и существенного вклада в мощность экспозиционной дозы не вносит. Как правило, скорость миграции изотопов стронция более значительна, поэтому при оценке дозы внешнего облучения вкладом  $\beta$ -активных изотопов стронция и иттрия можно пренебречь.

#### 4.2. Поведение радионуклидов в лесных экосистемах

Для определения биологической доступности радионуклидов, находящихся в почве, и их аккумуляции корнями и наземной фитомассой растений часто используют параметр, который называется *фактором перехода TF* и связывает концентрацию радионуклида в сухой массе растения с его содержанием (поверхностной активностью) в почве:

$$TF = (\text{Концентрация в растении, Бк/кг}) \cdot (\text{Содержание в почве, Бк/м}^2)^{-1}. \quad (4.5)$$

Фактор перехода представляет собой величину порядка от 0.1 до 1.0 (Бк/кг)/(кБк/м<sup>2</sup>) для <sup>137</sup>Cs и от 1 до 100 (Бк/кг)/(кБк/м<sup>2</sup>) для <sup>90</sup>Sr. Вместо фактора перехода часто также употребляют безразмерную величину – коэффициент накопления *TA*, который имеет величину порядка 0.1–100 и определяется как

$$TA = (\text{Концентрация в растении, Бк/кг}) \cdot (\text{Концентрация в почве, Бк/кг})^{-1}. \quad (4.6)$$

Обе величины являются функцией распределения радионуклидов по глубине почвы и свойств почвы, которые определяют биологическую доступность радионуклида в корнеобитаемом слое растения. Последние включают в себя тип почвы, pH, влажность, катионообменную емкость, т. е. концентрацию катионов K, Ca, Mg. На переход радиоактивных изотопов в фитомассу растения влияют также физиологические особенности роста растения, такие как тип растения, глубина корнеобитаемого слоя, интенсивность корневого питания, период вегетации, скорость роста биомассы.

Основные параметры, влияющие на переход радионуклидов из корнеобитаемого слоя в фитомассу растений, приводятся в табл. 4.2. Сравнивая эту таблицу с табл. 4.1, можно отметить, что те же характеристики, которые ускоряют миграцию изотопов <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr в почве, способствуют их биоэкстракции из почвы.

В результате Чернобыльской катастрофы 23% территории Беларуси оказалось загрязнено изотопами радиоцезия с плотностью загрязнения свыше 1 Ки/км<sup>2</sup>. В зону загрязнения входит 1.7 млн. га лесных угодий (каждый четвертый гектар леса республики). Особенно пострадали леса Гомельской (62.3%) и Могилевской (42.8% лесного фонда) областей. При радиологической и хозяйственной оценке обычно выделяют четыре главные подсистемы в экосистеме леса:

- верхний ярус;
- нижний ярус;
- органические горизонты грунта (подстилка и гумус);
- минеральный грунт.

Таблица 4.2  
Качественные показатели перехода радионуклидов в растения

| Характеристика               | Переход                 |                      |
|------------------------------|-------------------------|----------------------|
|                              | слабый                  | заметный             |
| Тип ландшафта                | Холмистый на склонах    | Равнинный            |
| Тип первоначальных выпадений | Сухие (горячие) частицы | Влажные (с осадками) |
| Тип почвы                    | Торфяные                | Песчаные             |
| Водный режим                 | Не дренированные        | Дренированные        |
| pH почвенных растворов       | Щелочные                | Кислые               |
| Катионообменная емкость      | Низкая                  | Высокая              |
| Скорость роста растений      | Медленная               | Быстрая              |
| Фаза роста, сезон            | Зима                    | Весна                |
| Концентрация корней          | Низкая                  | Высокая              |

Радиоактивные осадки постепенно распределяются по этим ярусам, как показано на рис. 4.4. Поток питательных веществ, радионуклидов и микроэлементов различается в пределах каждого яруса и между ярусами и определяется многими факторами. Среди этих факторов основными являются:

- способности почвы к миграции;
- доступность элементов;
- валовая сорбция частицами почвы (т. е. физико-химические свойства грунта);
- скорость деления корнями растений (т. е. физиологические параметры растений (судящего во время) (напр., весна)

Экосистема в загрязненной зоне в основном развивалась в автоморфных и гидроморфных условиях ландшафта, где преобладают тонкодисперсные аллювиальные и среднегранулированные речные пески. Главными геоморфными характеристиками этих регионов являются равнины и низменности.

- содержание органического углерода 0.11–4.74%;
- емкость катионного обмена 1.1–11.0 мг-экв/100 г грунта.

Различают семь главных процессов, вовлекающих радионуклиды в миграционные процессы и определяющих скорость их вертикального перемещения:

- A) передислокация при разложении подстилки;
- B) растворение в почвенных растворах;
- C) адсорбция/десорбция коллоидами грунта;
- D) комплексообразование и/или ассоциация с органическим веществом;
- E) биотранспортировка в наземные растения;
- F) прочная фиксация катионов глинистыми минералами;
- G) инфильтрация через слои почвы.

Сейчас в типичных ландшафтах приблизительно 8% общего количества <sup>137</sup>Cs находится в подстилке, 47% накоплено в разлагающейся подстилке, 40% сконцентрировано в слое гумуса и только 5% радиоцезия мигрировало глубоко в минеральные слои грунта. Процесс A характерен для верхних органических горизонтов и приводит к последующему процессу B, а следовательно, и к перемещению подвижных форм радионуклидов к более низким горизонтам. Скорость этих процессов определяется величиной pH грунта. Интенсивность процесса C характеризуется емкостью катионного обмена рассматриваемого грунта. Процесс D контролирует биологическую доступность радионуклидов посредством формирования питательных органических веществ, связанных с катионами радионуклидами, и таким образом он, в свою очередь, определяет

процесс E. Последний, т. е. биогенное поглощение/миграция радионуклидов, является единственным естественным процессом, который транспортирует радионуклиды вверх к верхним органическим слоям и к наземным растениям. Следовательно, именно этот процесс ответствен за возможную аккумуляцию радионуклидов в фитомассе верхних ярусов.

Основной частью минерального слоя является песчаный грунт с подслоем аллювиальных и глациальных песков (57.3%). Временем нахождения радионуклидов в минеральных горизонтах управляет процесс F. Степень фиксации очень сильно зависит от удельной поверхности глинистых частиц грунта. Чем больше мелкие частицы, тем сильнее фиксация. Радионуклиды, которые покидают доступные для корней растений горизонты грунта, инфильтруются в глубинные минеральные слои грунта. Этот процесс G является очень медленным и представляет собой сток радионуклидов из экосистемы леса.

$O_L$   
 $O_F$   
 $O_H$   
 $A_{H...}$   
 $AB, B_{H,W...}$

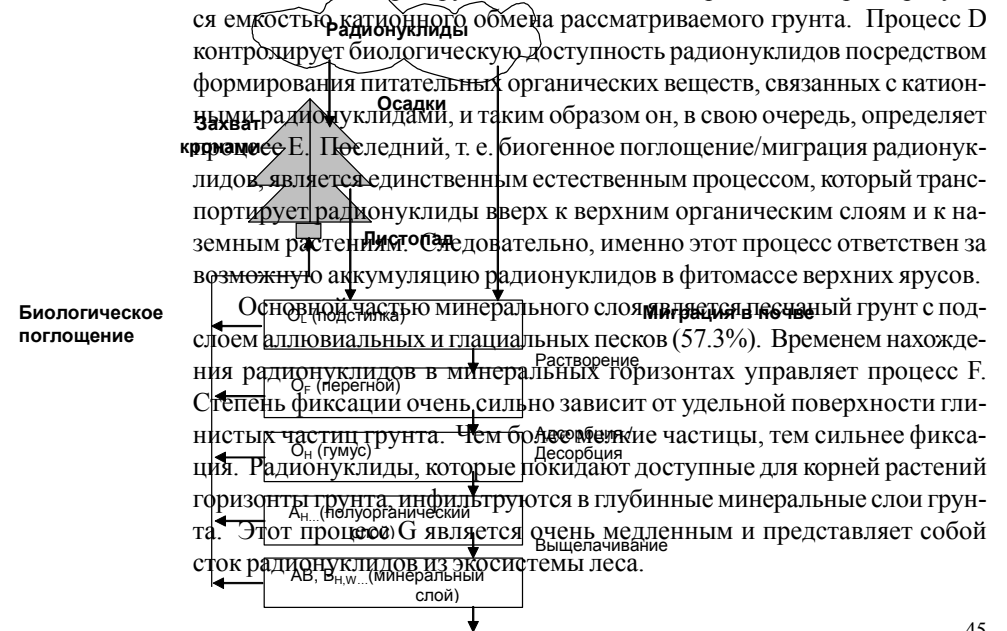
Рис. 4.4. Основные механизмы миграции радионуклидов в почвенных горизонтах

Основными типами лесных почв в Беларуси являются:

- дерново-подзолистые (47.3%);
- дерновые (20.8%);
- дерново-слабоподзолистые и дерново-полугидроморфные (12.4%);
- торфяно-болотные.

Как отмечалось выше, свойства грунтов (как биотические, так и абиотические) сильно влияют на подвижность радионуклидов в грунте. Почвы Беларуси характеризуются следующими показателями:

- для органических слоев:
  - pH = 4.87–5.2;
  - содержание органического углерода 17.5–29.5%;
  - емкость катионного обмена 36–78 мг-экв/100 г грунта;
- для минеральных слоев:
  - pH = 3.65–5.50;



Удельная активность древесины  $A(t)$  в любой момент времени  $t$  описывается выражением

$$A(t) = Z \text{FTF}(t) \text{FD}(t), \quad (4.7)$$

где  $Z$  – запас радионуклида в почве на момент аварии;  $\text{FTF}(t)$  – функция фактора перехода;  $\text{FD}(t)$  – функция естественного распада.

Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в древесном стволе сосны достигнет максимального значения к  $(2005 \pm 2)$  г. (рис. 4.5). Величина максимальной концентрации  $^{137}\text{Cs}$  изменяется от IV до I возрастного класса в отношении 1 : 3.3 : 6.5 : 8.1. Для молодой растущей сосны время полууменьшения концентрации  $^{137}\text{Cs}$  после достижения максимальной величины в стволе –  $(37 \pm 2)$  лет.

Радиальное распределение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в древесном стволе постепенно выравнивается, но, тем не менее, пока самая высокая концентрация радионуклидов все еще наблюдается в периферийных слоях, уменьшаясь к центру ствола. Соотношение между усредненной величиной удельной активности в коре/флоэме и в древесном стволе для различных пород различна (рис. 4.6). Наибольшее значение этого параметра обнаружено у осины (около 6), наименьшее – у березы (около 4). Для наиболее распространенного вида в Беларуси – сосны – отношение активности в коре к активности в древесине находится в диапазоне от 4.5 до 5.0.

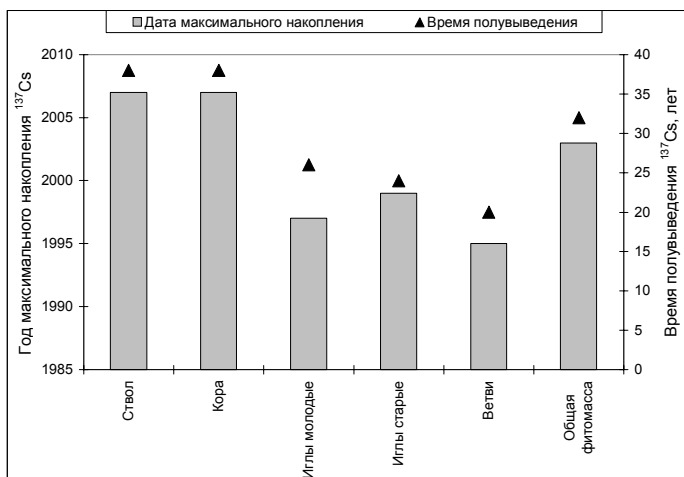


Рис. 4.5. Время полувыведения и максимального накопления  $^{137}\text{Cs}$  в различных компонентах сосны

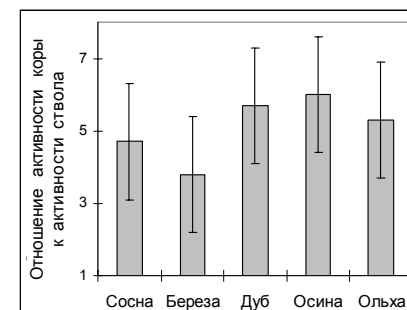


Рис. 4.6. Отношение удельной активности древесины в периферийных слоях (кора/флоэма) к активности древесного ствола

### 4.3. Формирование доз облучения населения

Лес всегда играл заметную роль в жизни населения южных регионов Беларуси. Этот источник ценного сырья для многих отраслей народного хозяйства также выполнял функцию рекреационных зон, куда население, особенно сельское, могло направляться на отдых и где могло пользоваться дарами природы. Находясь в загрязненном лесу, профессиональные работники и обычные жители ближайших населенных пунктов получали определенные дозы облучения, внешнего и внутреннего. Из наиболее вероятных путей облучения можно выделить пять потенциальных сценариев.

Сценарий 1а: облучение при обычном лесопользовании:

- внешнее облучение от деревьев и грунта;
- ингаляция мелких опилок и аэрозолей грунта.

Сценарий 1b: облучение в зонах рекреации:

- внешнее облучение от деревьев и грунта;
- пероральное употребление лесной продовольственной продукции.

Сценарий 2а: облучение при использовании дров в бытовых печах:

- прямое внешнее облучение от печей и очагов;
- внешнее облучение при обращении с зольными остатками;
- ингаляция при операциях в дымоходе и с зольными остатками.

Сценарий 2b: облучение при использовании золы в качестве удобрения:

- внешнее облучение от сада;
- употребление плодов и ягод, выращенных в саду;
- употребление грунтовой и поверхностной воды.



Сценарий 3: облучение при лесных пожарах:

- внешнее облучение от осадения аэрозолей;
- ингаляция аэрозольных частиц;
- облучение по пищевым цепочкам.

Сценарии 1–3 представляют собой пути облучения населения в процессе их обычной каждодневной деятельности. Необходимо отметить, что в сценариях 2а, 2б и 3 почти невозможно обеспечивать контроль облучения и применять какие-либо меры защиты, кроме запретительных.

Для оценок влияния воздействия радиоактивного загрязнения на здоровье населения и рабочих лесхозов часто предлагаются консервативные оценки, т. е. вначале оцениваются максимальные ожидаемые дозы. На основе этого вместе с более реалистичной оценкой лимитирующих параметров уточняется вероятный уровень дозовых нагрузок на население и работников в условиях повышенного облучения. Определенные таким образом индивидуальные дозы создают основание для оценки коллективных доз при проведении реабилитационных действий.

При консервативной оценке предполагается, что во время работы в лесу лесоруб занят только лесоповалом и обрезкой, т. е. получает облучение от лесной подстилки и деревьев, а также при ингаляции пыли. Нормальная деятельность наиболее облучаемой категории рабочих обычно включает таксацию и охрану леса, пожарную охрану, санитарные рубки, лесоповал и обрезку до бревен различного размера, сортировку бревен для различных целей и т. п. В «Инструкции по лесохозяйственной деятельности на территориях, загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС» устанавливается ограничение рабочего времени, причем предполагается, что это ограничение должно применяться в соответствии с мощностью радиационной дозы в данном лесу (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Годовые пределы времени работы в лесу, ч

Время облучения населения не регулируется, и поскольку люди могут находиться в любой части леса, время пребывания там должно быть определено на основании специальных социологических исследований. Для разных групп населения это время различно и зависит от профессии, образования и возраста. Некоторые результаты исследований, выполненных в 1995 г., представлены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Время нахождения в лесу различных групп населения, % от полного времени

\* Средние значения приводятся по результатам обследования поселков в Гомельской области.

Активность лесной продукции (грибы и ягоды, табл. 4.5) зависит от многих факторов, поэтому с учетом обширности загрязненной территории и надежности источников оценки следует принимать во внимание

| Мощность дозы на население, мкР/ч | Максимальное содержание в продукте, % | Среднее значение, % | Среднее значение, мкР/ч | Среднее значение, мкР/ч |
|-----------------------------------|---------------------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| Фермеры                           | 70-150                                | 1,3                 | 1,3                     | 1,3                     |
| Грибы                             | 50-200                                | 420                 | 420                     | 420                     |
| Ягоды                             | 200-250                               | 420                 | 420                     | 420                     |
| Средняя величина *                | 250-300                               | 420                 | 420                     | 420                     |
| Свыше 300                         | 420                                   | 420                 | 420                     | 420                     |

Таблица 4.5

Концентрация <sup>137</sup>Cs в лесной продукции, мкКи/кг, и факторы перехода для грибов и ягод

- \* Значение получено для *Paxillus involutus Fr.*
- \*\* Результаты однократной выборки *Vaccinium vitis-idaea L.* (1987–1990 гг.).

Согласно фактическим измерениям в белорусских лесах, самая значительная доза получена лесниками и лесорубами. Эти категории рабочих относятся к максимально облучаемому персоналу. Жители поселков, расположенных около леса, составляют наименее контролируемую группу вследствие использования ими лесной территории для отдыха и сбора лесной пищевой продукции. Из фактических данных

следует, что дозовые нагрузки на проживающих вблизи леса и на лесников/лесорубов сравнимы. В наиболее облучаемую группу входят старики, в первую очередь пенсионеры, и дети.

При расчете внутреннего облучения считается, что величина потребления лесных продуктов составляет 10 кг грибов в год. Тогда ежегодная доза от их потребления с максимально зарегистрированной удельной активностью (400 мкКи/кг) составляет около 270 мЗв/год. Хотя такая дозовая нагрузка является очень высокой, следует подчеркнуть, что и средняя активность радиоцезия в грибах на 1–2 порядка ниже.

Для популярных разновидностей грибов, например, отмечалась величина 0.088 мкКи/кг, которая соответствует ежегодным дозам порядка 0.050 мЗв/год. Некоторые разновидности грибов в загрязненных регионах вообще не содержат радиоактивных загрязнений. Кроме того, структура потребления пищевой продукции различна в разных группах населения.

Только проживающие в сельских районах вблизи лесных массивов могут потреблять 10 кг грибов в год. Те, кто живет в более отдаленной от лесов сельской местности, потребляет 1–5 кг грибов в год, а городское население, по некоторым сведениям, – менее 100 г/год. Это означает, что минимальные полученные дозы имеют порядок 0.5 мЗв/год.

Анализ проведенных исследований позволяет сделать заключение об относительной значимости различных путей дозообразования.

1. Составляющая внешней дозы облучения от почвы существенна. Внешнее облучение от деревьев меньше, чем от поверхности земли. Ингаляционная доза незначительна.

2. Внутренняя доза от потребления пищевых продуктов леса, вообще говоря, значительна и зависит от фактического уровня загрязнения и рациона питания.

3. Внешняя доза от бытовых печей невелика, даже если печь отапливается загрязненной древесиной с максимальным сообщенным содержанием радионуклидов. Доза от вдыхания пыли, выбрасываемой через трубу бытовых печей, незначительна.

4. Ингаляционная доза вследствие использования радиоактивной золы в качестве удобрения незначительна. После использования ее для удобрения дополнительное загрязнение невелико по сравнению с уже существующим. С другой стороны, внесение удобрений значительно влияет на поглощение растениями радионуклидов, приводящее к заметному изменению пероральной дозы.

5. Доза, получаемая при лесных пожарах, распространяется на население, проживающее на небольшой локальной территории. Кроме того, установлено, что вероятность пожара на конкретной территории чрезвычайно мала и не создает существенной коллективной дозы. В то же время в некоторых случаях отмечались значительные дозовые нагрузки на пожарные команды.

Результаты фактических измерений средней внешней дозы хорошо согласуются с оценками риска. Диапазон оцененных доз и результаты непосредственных измерений внешних доз приводятся в табл. 4.6. Следует еще раз отметить, что проведенные оценки представляют максимальные индивидуальные дозы.

Таблица 4.6  
Ежегодные эффективные индивидуальные дозы, мЗв/год

| Путь облучения и категория облучаемых              | Ежегодные индивидуальные дозы |            |          | Измеренная внешняя доза |
|--|-------------------------------|------------|----------|-------------------------|
|  | внешняя                       | внутренняя | полная   |                         |
| Традиционное лесопользование. Работники леса       | 0.2–3.5                       | 0.001–0.16 | 0.2–3.7  | 0.2–3.9 *               |
| Рекреация. Население                               | 0.03–1.25                     | 0.28–5.15  | 0.3–52.7 | 0.05–1.6                |
| Использование дров. Население                      | 0.1–2.3                       | 0.001      | 0.1–2.3  |                         |
| Использование золы в качестве удобрения. Население | 0.001–0.06                    | 0.086–1.72 | 0.1–1.8  |                         |
| Лесные пожары. Работники леса за один пожар        |                               |            | 8.0      |                         |
| Лесные пожары. Население за один пожар             |                               |            | 0.001    |                         |

**4.4. Лесопользование в условиях радиоактивного загрязнения**

Площадь лесов республики – около 18.7 млн. га, из них покрыто древесными породами 7.4 млн. га, что составляет примерно 35.5% всей территории. Запасы древесины в лесах Беларуси оцениваются в пределах 900–1000 млн. м<sup>3</sup> и характеризуются следующими показателями, млн. м<sup>3</sup>:

- хвойные леса – 610, в том числе сосновые – 495;
- широколиственные леса – 40, в том числе дубовые – 36;
- мелколиственные леса – 230, в том числе березовые – 122, ольховые – 82, осиновые – 27.

Ежегодные заготовки древесины составляют примерно 11 млн. м<sup>3</sup>, в том числе:

- деловая древесина – 4.5–5;
- дрова – около 2;
- около 4 млн. м<sup>3</sup> остаются невостребованными.

В лесах республики преобладает подлесок (51.4%), при этом в насаждениях среднего возраста его доля составляет 36.2%.

Основная часть лесов (81.4%) находится под контролем Министерства лесного хозяйства республики, 12.2% принадлежит сельскохозяйственным объединениям, 1.9% – Министерству обороны, около 4.5% является территорией заповедников и национальных парков.

По назначению леса республики разделяются на две группы. В первую (34.1% площади лесов) включены охраняемые леса и парковые зоны, зеленые зоны вокруг больших городов и промышленных центров, железнодорожных узлов, вдоль больших рек, вокруг озер и водохранилищ, а также вдоль железных и шоссейных дорог. Ко второй группе относятся разрабатываемые леса (65.9%), в которых общий запас древесины оценивается в 605 млн. м<sup>3</sup>. В настоящее время искусственно выращенные леса занимают примерно 2.3 млн. га (30.7% от общей площади лесных массивов).

Структура лесозаготовок в республике характеризуется следующими показателями:

- промышленная вырубка – 40.3%;
- расчистка леса и противопожарные рубки – 15.4%;
- санитарные рубки – 11.4%;
- другие рубки – 2.7%;
- выпадение деревьев – 30.2%.

Загрязнением лесного фонда в значительной мере определяется характер лесохозяйственной деятельности в республике. Если получение чистой сельскохозяйственной продукции на умеренно загрязненных угодьях достаточно хорошо обосновано, то лесохозяйственные проблемы в настоящее время не находят адекватного решения по ряду причин, из которых главными являются:

- высокий уровень загрязнения лесной продукции;
- ежегодные потери древесных ресурсов;
- большие дозовые нагрузки на лесохозяйственных работников;
- значительные дозовые нагрузки на население при потреблении лесных пищевых продуктов и использовании загрязненной древесины.

Лесные биоценозы относятся к критическим экологическим системам, которые, с одной стороны, аккумулируют радиоизотопы и противостоят их распространению в процессах смыва и эрозии почвы, а с

другой – создают длительные дозовые нагрузки на человека через внешнее облучение и миграцию радиоизотопов по различным цепочкам с последующим внутренним облучением. Эффективная доза от лесной компоненты колеблется в широких пределах в зависимости от социальной структуры населения, возраста и т. п.

В Гомельской и Могилевской областях имеется 1 434 000 га загрязненных лесов, находящихся в ведении Министерства лесного хозяйства. Около 160 000 га из них не используется, так как они относятся к защитной и заповедной зонам. Таким образом, используемые в этих областях леса занимают примерно 1 270 000 га, из которых 680 га приходится на долю естественного леса.

Распределение лесных территорий по уровню загрязнения:

- 1–5 Ки/км<sup>2</sup> – 18.3%;
- 5–15 Ки/км<sup>2</sup> – 4.5%;
- 15–40 Ки/км<sup>2</sup> – 1.9%;
- более 40 Ки/км<sup>2</sup> – 0.5%.

Ежегодное количество леса, которое обычно заготавливается в загрязненной зоне (свыше 1 Ки/км<sup>2</sup>) при всех видах рубок, включая выпадение сухостоя, составляет приблизительно 3.7 млн. м<sup>3</sup>/год.

Под реабилитацией загрязненных лесных территорий обычно понимают реализацию *мероприятий, направленных на возврат к безопасному лесопользованию*. Комплекс реабилитационных мероприятий включает:

- определение радиационной обстановки на основе мониторинга загрязненных лесных территорий;
- изучение основных закономерностей изменения радиационной обстановки и прогнозирование ее развития;
- разработку системы реабилитационных контрмер и определение ее эффективности на демонстрационном уровне;
- широкомасштабное внедрение реабилитационных контрмер.

В соответствии с законодательной базой республики при проведении лесохозяйственных работ загрязненная лесная территория подразделяется на три зоны.

В зоне I с плотностью поверхностного загрязнения <sup>137</sup>Cs до 15 Ки/км<sup>2</sup> древесина и продукты ее переработки используются без ограничений. Одновременно устанавливается контроль над некоторыми видами деятельности.

- Охота разрешается в соответствии с действующими правилами, но с обязательной проверкой мяса на содержание радиоизотопов.

- В подсобных хозяйствах ограничения на кормление и содержание сельскохозяйственных животных и птицы не вводятся, но рекомендуется выборочный контроль продукции.

- Разрешается заготовка древесины на дрова местным населением, но использование зольных остатков в качестве удобрения допускается, только если топливная древесина собрана на территории с загрязнением не выше 5 Ки/км<sup>2</sup>.

- Зола, образующаяся при сжигании отходов переработки древесины на предприятиях, предварительно увлажняется и вывозится на захоронение в специально отведенное место.

- Выпас скота на лесных пастбищах допускается при высоте травостоя не менее 10 см.

- Заготовка пищевых продуктов леса, лекарственного сырья, производство хвойно-витаминной муки разрешается при плотности загрязнения менее 5 Ки/км<sup>2</sup> с обязательной проверкой на содержание радиоизотопов.

В зоне II с плотностью загрязнения от 15 до 40 Ки/км<sup>2</sup> лесное хозяйство ведется со следующими ограничениями:

- заготовка деловой древесины допускается в зимнее время при наличии снежного покрова, причем обрубка сучьев и сжигание порубочных остатков проводится на лесосеке;

- окаривание древесины проводится на месте рубки или на специальной площадке с вывозом коры на лесосеку для сжигания;

- использование древесины в качестве топлива запрещено;

- заготовка древесной биомассы для производства дегтя и лесохимической продукции не допускается;

- запрещается выпас молочного и мясного скота;

- заготовка сена разрешается только в качестве корма для лошадей, причем использование навоза в качестве удобрения не допускается.

В зоне III с плотностью загрязнения свыше 40 Ки/км<sup>2</sup> проводятся только мероприятия по усилению охраны лесов от пожаров, болезней и вредителей леса при обязательном дозиметрическом контроле.

В настоящее время 39,6 тыс. га, принадлежащих Министерству лесного хозяйства республики (2,3% загрязненной территории или 0,6% лесных угодий), с загрязнением свыше 40 Ки/км<sup>2</sup> выведены из оборота. Примерно 145 тыс. га (2,2% лесных угодий) отнесено к зоне ограниченного использования.

Потенциал возобновляемых источников энергии на основе древесины в загрязненной зоне составляет около 6 млн. Гкал/год. Ко-

личество древесных отходов, образующееся при рубках в зоне загрязнения 15–40 Ки/км<sup>2</sup>, несколько превышает 110 тыс. м<sup>3</sup>/год. Их рациональное энергетическое использование позволило бы получить около 0,4 млн. Гкал/год.

Таким образом, реальной проблемой настоящего времени является комплексное использование растительной биомассы лесов на территории с плотностью загрязнения 15–40 Ки/км<sup>2</sup>, включая энергетическое использование древесных отходов. На более загрязненных лесных участках получение обрезных пиломатериалов представляется возможным начиная с 2018 г. с ограничениями, реализуемыми в настоящее время для зоны загрязнения 15–40 Ки/км<sup>2</sup>. Получение другой продукции, согласно современным прогнозным оценкам, откладывается до 2025–2040 гг., а использование молодых сосновых насаждений без ограничений представляется возможным только начиная с 2050 г.

В сосновых лесах 45–60-летнего возраста вклад в дозу лесной подстилки и почвы составляет 52 и 42% соответственно. Экспозиционная доза над поверхностью почвы зависит от плотности загрязнения, глубины проникновения радиоцезия в почву, рельефа поверхности и плотности экранирующих деревьев. В настоящее время мощность экспозиционной дозы в лесах находится в пределах 2–4 мкР/ч при плотности загрязнения 1 Ки/км<sup>2</sup> и пропорциональна плотности загрязнения.

В зоне с загрязнением 15–40 Ки/км<sup>2</sup> лесохозяйственные работники первой категории (лесники и рубщики леса) получают более высокие дозы, чем водители, инженеры, техники. Годовая измеренная дозовая нагрузка на работников лесхозов составляет от 2 до 4 мЗв/год, причем 10–20% от полной дозы формируется в результате употребления лесных пищевых продуктов.

Дозовая нагрузка на местное население редко превышает 1 мЗв/год и определяется временем нахождения в лесу и потреблением лесной продукции.

Оценка последствий лесных пожаров показывает, что в атмосферу в виде аэрозолей может быть поднято около 4% горящего материала. Концентрация радиоцезия в следе на расстоянии 10 км от очага пожара увеличивается в 80–100 раз, и ингаляционные дозы могут превышать допустимые.

Проведение частичной дезактивации загрязненных радиоизотопами лесных массивов и использование современных технологий организованный утилизации древесных отходов может ускорить реабили-

тацию лесных ресурсов. В то же время такие работы связаны с дополнительным облучением персонала и возможными последствиями для лесной экосистемы. Это требует применения видоизмененных лесохозяйственных технологий, основные требования к которым включают следующее:

- соблюдение специальных мер для максимального снижения дозовой нагрузки на персонал (минимизация времени пребывания и максимальная защищенность);
- экономический эффект с учетом предотвращенной дозы должен быть положительным;
- учет негативных вторичных экологических эффектов (эрозия почвы, снижение биоразнообразия, снижение питательных веществ в почве и др.).

Предназначенный для заготовительных работ лес может быть разделен на три категории:

- территория, где лес может сильно прореживаться, слой подстилки удаляться; затем лес оставляется на последующие 30 лет для снижения уровня радиоактивности в древесине естественным путем. К таким территориям относятся молодые леса, не поврежденные бурями, болезнями или насекомыми;
- ограниченная территория (как правило, вблизи населенных пунктов), где лес может полностью вырубаться с удалением слоя подстилки (или с глубокой перепахкой), выкорчевыванием пней и последующей посадкой;
- территория, где лес перезрел и может полностью вырубаться с выкорчевыванием пней, глубокой перепахкой и последующей посадкой.

Во всех случаях работы должны проводиться на относительно небольших квадратах поэтапно для восстановления биоразнообразия за счет нетронутых лесов, расположенных вокруг.

Рубки ухода и промежуточные рубки следует применять в тех лесных массивах, которые способны выдержать очень сильное прореживание (остаточная плотность – до 2000–3000 деревьев/га для хвойных пород и до 1000–2000 деревьев/га для лиственных пород). При этом удаляется также подстилка. Такое прореживание должно быть настолько объемным, чтобы массив оставался нетронутым на протяжении последующих 30 лет.

Рубки главного пользования следует проводить в шахматном порядке, чтобы уменьшить негативное влияние на биоразнообразие. Во всех случаях эти работы должны осуществляться на площадях, представля-

ющих собой относительно небольшие блоки (2–3 га) с ограничивающими лесополосами, чтобы обеспечить восстановление биологического разнообразия за счет расположенных вокруг дезактивируемой территории нетронутых лесов. Работы при проведении сплошных рубок должны ограничиваться спиливанием зрелых или перезрелых, а также поврежденных по каким-то причинам деревьев.

Подстилку можно удалять только при рубках вблизи населенных пунктов, причем только тогда, когда активность еще не локализована в более глубоком минеральном слое. В других случаях поверхность должна быть перепахана на глубину 50–60 см. Чтобы обеспечить эту процедуру, пни должны быть выкорчеваны и извлечены для последующего сжигания.

Удаление лесной подстилки также может проводиться двумя способами:

- перед рубками (рубки производят в летнее время, при этом после них стволы остаются в лесу до зимы, что будет способствовать восстановлению лесной подстилки за счет осыпавшейся кроны);
- после рубок и удаления стволов (рубки производятся в зимнее время, а удаление подстилки осуществляется через год осенью).

Поскольку малочисленные естественные леса находятся под защитой и будут сохранены как заповедники и после радиоактивного загрязнения, то основным объектом рассматриваемых технологий должны быть полуискусственные или искусственные насаждения. Однако даже в лесах промышленного назначения находится много мест, имеющих высокую природную ценность, и это необходимо учитывать при вырубках и удалении лесной подстилки. Проблемы биоразнообразия в плане предполагаемого вмешательства должны фокусироваться:

- на защите ключевых мест обитания животного и растительного мира;
- выживании видов в выбранных для вмешательства районах;
- последующем расселении видов;
- долговременном развитии экосистемы леса.

Подлежащие рассмотрению леса можно распределить в порядке их значимости следующим образом:

- полуискусственного происхождения с защищенным статусом;
- полуискусственного происхождения промышленного назначения;
- искусственного происхождения, возникшие в результате лесопосадок на месте старых лесов;
- искусственного происхождения, возникшие в результате лесопосадочных работ на сельскохозяйственных землях или болотистых местах.

По возможности все виды лесохозяйственных работ в загрязненных лесах должны быть механизированы. Производительность техники должна быть максимально высокой для снижения времени пребывания персонала в лесу.

Машины и оборудование лесного хозяйства:

- машины для заготовки и переработки лесных семян;
- почвообрабатывающие машины и орудия;
- машины для внесения удобрений;
- посевные машины;
- лесопосадочные машины;
- машины для борьбы с вредителями и болезнями;
- дождевальные машины;
- машины для лесорасчистки;
- пожарные машины;
- машины для проведения рубок и погрузочно-транспортных работ;
- машины для планировочных и землеройных работ;
- мелиоративные машины.

Рабочие машины (машинно-тракторные агрегаты) классифицируются:

- по виду работ;
- источнику энергии;
- типу передаточного механизма (тяговые, приводные);
- составу (одномашинные, многомашинные, симметричные, асимметричные);
- способу соединения с трактором (навесные, прицепные);
- способу производства работ (стационарные, мобильные).

Различают однородные (одна операция одной машиной), комплексные (несколько операций несколькими рабочими машинами), комбинированные (несколько операций одной машиной) и универсальные (разные операции в разное время) агрегаты.

#### 4.5. Деревообработка загрязненного сырья

Лес поставляет народному хозяйству различные продукты (ягоды, грибы, дичь, корма), а также древесное сырье, которое можно разделить на следующие основные виды:

- древесина, потребляемая в круглом виде;
- пиломатериалы;
- модифицированная древесина;

- фанера и клееная древесина;
- плиты и древесные пластики;
- древесина для химической переработки;
- древесина для топлива.

Важным элементом стратегии потребления древесины является ее полное безотходное и комплексное использование. При этом в распоряжении перерабатывающей промышленности имеются следующие основные процессы:

- механическая обработка:
  - окаривание;
  - распиловка на сортаменты;
  - точение, фасование и шлифование;
  - дробление на щепу;
  - лущение;
  - прессование;
- немеханическая обработка:
  - пропитка;
  - сушка;
  - склеивание;

| Район           | Рубки главного пользования |                       | Рубки ухода (прореживание, санитарная и противопожарная вырубка) |                       |       |
|-----------------|----------------------------|-----------------------|--|-----------------------|-------|
|                 | Дерево-обработка           | Переработка древесины | Дерево-обработка   | Переработка древесины | Дрова |
| Беларусь, всего | 1973.0                     | 379.1                 | 52.3   | 15.1                  | 23.1  |
| Гомель          | 293.0                      | 60.0                  | 3.2  | 1.0                   | 1.0   |
| Могилев         | 225.0                      | 50.0                  | 2.0  | 0.5                   | 0.5   |

В республике действуют свыше 4,5 тыс. предприятий деревооб-  
рабатывающей и лесоперерабатывающей промышленности, на ко-  
торых работает свыше 120 тыс. чел. Данные о годовых поставках  
древесины и объемах производства для различных целей представле-  
ны в табл. 4.7 и 4.8.

Поставки древесины (2000 г.), тыс. м<sup>3</sup>/год

Таблица 4.7

Таблица 4.8

## Данные об объеме производства продукции из дерева

| Продукция   | Объем производства (2000 г.) |
|---|------------------------------|
| Пиломатериалы, 10 <sup>3</sup> м <sup>3</sup>             | 1 634                        |
| Древесностружечные плиты, 10 <sup>3</sup> м <sup>3</sup>  | 261.7                        |
| Древесноволокнистые плиты, 10 <sup>3</sup> м <sup>3</sup> | 31 113                       |
| Фанера, 10 <sup>3</sup> м <sup>3</sup>                    | 102.8                        |
| Спички, 10 <sup>3</sup> коробок                           | 2 029                        |
| Бумага, 10 <sup>3</sup> т                                 | 29.5                         |
| Картон, 10 <sup>3</sup> т                                 | 112.1                        |
| Дрова, м <sup>3</sup> (твердой древесины)                 | 2 245                        |
| Древесные отходы, тыс. м <sup>3</sup> (твердой древесины) | 228                          |

Радиоактивность конечной продукции из загрязненной древесины и в побочных продуктах ее переработки может отличаться от радиоактивности исходного сырья. Изменение концентрации активности в основной и побочной продукции во время процесса переработки древесины  $A_i$  по сравнению с исходной активностью древесины  $A_0$  называется *фактором обогащения*  $f_c$ :

$$f_c = A_i / A_0.$$

Коэффициент  $f_c$  (табл. 4.9) может быть как больше (идет обогащение продукта радионуклидами), так и меньше единицы (разбавление активности).

Таблица 4.9

## Значения коэффициента обогащения для некоторых процессов переработки древесного сырья

| Процесс                        | Продукция                    | Среднее значение $f_c$ |
|--------------------------------|------------------------------|------------------------|
| Химическая обработка, пропитка | Модифицированная древесина   | 0.05–0.5               |
|                                | Отходы пропиточного раствора | 10–50                  |
| Гидролиз                       | Спирт                        | 0.001                  |
|                                | Лигнин                       | 3–5                    |
|                                | Гудрон                       | 23                     |
|                                | Дрожжи и сахара              | 0.5–5                  |
| Варка целлюлозы                | Бумага                       | 0.01                   |
|                                | Щелока                       | 5–27                   |
|                                | Клей                         | 1–2                    |
| Сжигание                       | Тепло, энергия               | 0                      |
|                                | Зола подовая                 | 15–30                  |
|                                | Зола уноса                   | 50–350                 |

Величина загрязненности продукции регламентируются нормативными документами. Для получения нормативно-чистой продукции деревообработки и побочных продуктов переработки древесного сырья следует прежде всего обратить внимание на загрязненность сырья.

В зоне с уровнем загрязнения 5–15 Ки/км<sup>2</sup> сырьевая древесина после рубки требует окаривания, что приводит к удалению около 7% биомассы и 60–70% радиоактивности.

В зоне с 15–40 Ки/км<sup>2</sup> должен быть обеспечен контроль за качеством древесины, и даже при окаривании ствол рекомендуется в этом случае использовать не непосредственно, а только если он распилен на брус. Луб и внешние слои толщиной 2–3 см должны быть сняты таким образом, чтобы средний размер квадратного бруса не превышал 70% диаметра ствола.

Далее для оценки пригодности использования сырья в той или иной промышленности следует руководствоваться вышеприведенными значениями фактора обогащения и утвержденными контрольными уровнями загрязнения продукции из древесного сырья (табл. 4.10).

| Продукция   | <sup>137</sup> Cs, Бк/кг (Бк/л) |
|---|---------------------------------|
| Древесина   | 186 740                         |
| Кашемир, шерсть, шкура, кожа, изделия из них (РДУ 2000)   | 74 800                          |
| Продукты, используемая в кулинарии, культурно-бытовой сфере, фармацевтической и химической промышленности и для производства целлюлозы/бумаги | 3700                            |
|   | 370                             |
|   | 3.700                           |

Таблица 4.10

Аналогичные нормы установлены для лесных продуктов питания. Их величины приводятся в табл. 4.11.

Таблица 4.11

## Допустимые уровни загрязнения продуктов леса

## 5. БЫСТРОРАСТУЩИЕ «ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ» ПОСАДКИ КАК МЕТОД РЕАБИЛИТАЦИИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ

### 5.1. Технология короткоцикловых посадок

Короткоцикловые посадки (КЦП) представляют собой способ выращивания быстрорастущих древесных пород с относительно короткой продолжительностью цикла ротации и высокой продуктивностью. Частота ротации (или продолжительность роста) биомассы бывает различной в зависимости от конечного использования древесины (для топливных целей, производства бумаги, прутьев и т. п.). Возможно выращивание различных быстрорастущих пород деревьев. Чаще всего используются ива и тополь, затем ольха, береза, акация, ясень, вишня и дикая черешня. Технология КЦП для ивы является в настоящее время наиболее коммерчески освоенной. Полный срок использования плантации ивы обычно составляет 25 лет, после чего выход биомассы заметно уменьшается. Период между двумя сборами урожая (цикл ротации) составляет от 2 до 5 лет. Средняя продуктивность во втором и последующих циклах выше (во втором цикле урожайность вырастает на 50–70% по сравнению с первым), поскольку вегетация в них начинается с уже укоренившихся в предшествующих циклах саженцев. Таким образом, за время наиболее продуктивного существования плантации происходит 5–8 циклов ротации.

Опыт промышленного освоения производства биомассы из быстрорастущих пород ивы (табл. 5.1) указывает на среднюю величину продуктивности 1 га плантации около 12–15 т древесины (с влажностью 10%) в год. Это соответствует ежегодному производству примерно 6.5–9.5 т у. т. с 1 га. Исследования, выполненные в Бельгии, показали, что 1 га посадки ивы может дать около 210 ГДж нетто энергии (т. е. за вычетом затрат ТЭР на закладку КЦП ивы, уход за плантацией, сборы урожая и завершающую раскорчевку плантации после 25 лет эксплуатации), что соответствует 4.7 т у. т./год.

Наилучшие результаты в практическом применении технологии КЦП ивы для производства топлива были достигнуты в Швеции, США, Бельгии и Англии. Ниже кратко изложены основные положения по выращиванию КЦП ивы.

Результаты многих исследований показывают, что закладка КЦП ивы может осуществляться в период с конца февраля до середины июня без заметного снижения продуктивности КЦП к моменту сбора урожая (на 4–5-й год после закладки). Лучшим временем закладки плантации является

ранняя весна, наиболее ранний момент посадки черенков определяют на основе минимальной температуры в корнеобитаемых слоях почвы +5°C. В период весенних заморозков для первого года температура почвы не должна опускаться ниже –8°C. Средняя температура почвы в период роста не должна быть ниже –2°C. Зимой в период отсутствия сокодвижения температура не должна опускаться ниже –60°C. Оптимальный рост в условиях количества осадков от 416 до 584 мм за период с мая по октябрь.

Таблица 5.1

Урожайность ивы трехлетнего цикла ротации, приведенная к одному году

| Страна  | Урожайность, т сухой массы/га |              |
|---------|-------------------------------|--------------|
|         | минимальная                   | максимальная |
| Австрия | 5                             | 24           |
| Дания   | 6                             | 9,6          |
| США     | 5                             | 24           |
| Швеция  | 36                            | 11,47        |
| Англия  | 6,2                           | 18,7         |
|         | 8                             | 13,8         |

питания стволовой частью растения зависит от ряда факторов и изменяется в пределах: азот – 18–73 кг/га, фосфор – 3–9 кг/га и калий – 6–27 кг/га.

Посадочный материал заготавливается из однолетних побегов и может быть двух видов: прутья длиной 1.5–2.5 м или черенки длиной 18–20 см. Может запасаться поздней осенью после завершения сокодвижения и на протяжении всего зимнего периода. Заготовка посадочного материала весной с целью одновременной посадки в подготовленную почву допускается при отсутствии признаков начала вегетации (раскрытие почек). Температура хранения посадочного материала от –4°C до +4°C в неветилируемом помещении без доступа света. Путья могут



храниться в этих условиях в течение трех-пяти месяцев без существенной потери качества, черенки – не более двух месяцев.

При наличии сорных многолетних растений почва должна быть обработана гербицидами как минимум дважды: в середине лета и в начале осени в предшествующий год. После окончания действия распыленных гербицидов почва должна быть вспахана и прокультивирована. При необходимости дополнительная обработка может понадобиться весной перед посадкой. Вспашка обычно производится осенью (ноябрь) или ранней весной на глубину 25–30 см. Боронование осуществляется за неделю перед посадкой на глубину 5–8 см. Как правило, во время первой ротации удобрения не вносятся. В дальнейшем в зависимости от количества питательных веществ в почве после каждого сбора урожая может вноситься дополнительное питание.

Посадка осуществляется одним из двух способов: черенками или прутьями в период, определяемый вышеприведенными погодными характеристиками, чаще в конце апреля или начале мая. Рекомендуемые схемы посадки: спаренными рядами по 75 см в междурядье, 150 см между каждой парой рядов либо одиночными рядами по 75 см между рядами.

Плотность посадки: 10–20 тыс. черенков на гектар, регулируется расстоянием между черенками в ряду (в случае посадки черенками). Глубина посадки: на всю длину черенка (15–20 см), обычно оставляют около 1 см над поверхностью почвы. В случае посадки прутьями последние прикапываются горизонтально в неглубокие (5–8 см) траншеи, сделанные культиватором или дисками вдоль размеченных рядов. Как правило, оставляют поворотные полосы и обсаживают плантацию защитной полосой ивы в два ряда.

В первый год после посадки из каждого черенка вырастает от 1 до 3 (реже до 5) однолетних побегов, которые за год увеличиваются до 1.5–2.5 м (иногда до 4 м) в зависимости от срока посадки, состояния почвы и погодных условий. В случае посадки прутьями однолетние побеги выходят из почвы с разной плотностью, но их высота в конце первого года составляет примерно то же значение.

Подрезка плантации является важной частью технологии, в результате которой растение в следующий вегетационный период выпускает до 20 однолетних побегов и наблюдается значительный рост биомассы. Первая подрезка плантации – поздней осенью после окончания сокодвижения до наступления морозов. Подрезаются годовалые побеги на высоте около 10 см от уровня почвы. Подрезка может быть осуществлена и в конце зимы, но до вскрытия почек.

Примерно в середине сезона второго года после подрезки крона посадок смыкается, осуществляя тем самым естественный контроль за ростом сорняков. С этого времени химическая прополка не производится.

Обычно урожай собирают на третий год после подрезки (четвертый год после закладки плантации) поздней осенью или в зимний период при спячке растений после листопада. На момент сбора побеги достигают высоты 4–6 м (реже 8 м) при диаметре стволов 5–7 см и побегов до 5 см. Стволы и побеги срезаются близко к почве (на 5–10 см выше ее уровня). Если возможно, сбор урожая производится по замерзшей почве. Темпы прироста биомассы в период между урожаями для трех циклов показаны на рис. 5.1.

Известны два основных способа сбора урожая: отдельный – прутья срезаются, собираются и складываются по сторонам плантации для просушивания в течение зимы и весны, а затем измельчаются на щепу и перевозятся в котельную; и прямой – прутья срезаются, одновременно измельчаются, а полученная щепка загружается в сборник или тележку и перевозится на склад хранения топлива.

После снятия последнего урожая (как правило, после 8-го цикла ротации) в период начала следующей вегетации, когда длина новых побегов достигает 15–20 см, вся плантация обрабатывается контактным гербицидом вместе с корневой системой и обрабатывается под заезд пастбище.

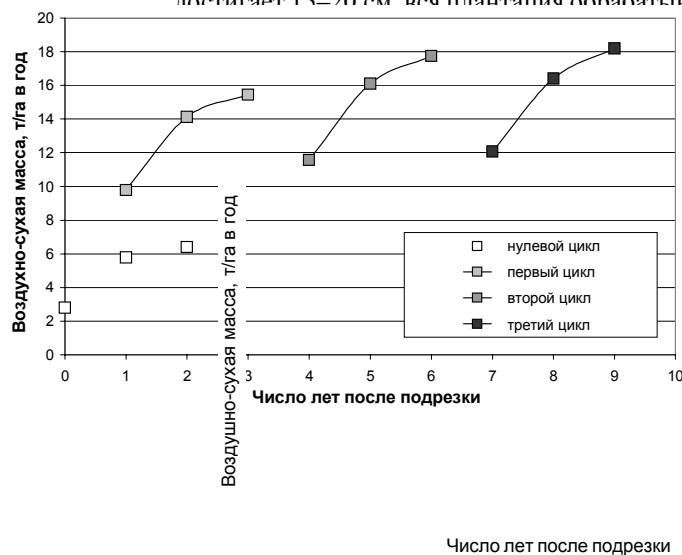


Рис. 5.1. Динамика прироста биомассы в терминах урожайности с 1 га

## 5.2. Концентрация радионуклидов в биомассе

В табл. 5.2 приводятся усредненные данные по фактору перехода  $T_f$  из почвы в древесную массу ивы по результатам измерений на экспериментальных плантациях в Гомельской области. Из приведенных данных можно сделать заключение о заметной биодоступности радиостронция в условиях подзолистой почвы.

Таблица 5.2

Усредненные значения  $T_f$  по экспериментальным посадкам ивы

| Параметр                                  | Для торфяной почвы             | Для подзолистой почвы          |
|---|--------------------------------|--------------------------------|
| Урожайность, кг/м <sup>2</sup>            | 1.5 ± 0.5                      | 1 ± 0.5                        |
| $T_f^{137}\text{Cs}$ , м <sup>2</sup> /кг | (1.1 ± 0.7) · 10 <sup>-3</sup> | (0.5 ± 0.4) · 10 <sup>-3</sup> |
| $T_f^{90}\text{Sr}$ , м <sup>2</sup> /кг  | (2.0 ± 0.8) · 10 <sup>-3</sup> | (116 ± 58) · 10 <sup>-3</sup>  |
| Плотность почвы, кг/м <sup>3</sup>        | 500                            | 1300                           |

На рис. 5.2 представлены результаты измерений коэффициента накопления на плантациях ивы. Заметно различие в физиологической активности разных клонов на разных почвах. Для клонов Bjorn и Rapp, например, она выше, чем для двух других гибридов, выращиваемых на дерново-подзолистой почве. Для торфяных почв гибрид Jorgn имеет меньшую степень фитоэкстракции радиоцезия. Коэффициент накопления стронция в фитомассе ивы, произрастающей на дерново-подзолистой почве, на два порядка превышает таковой для торфяной, что говорит об условиях создания высокой биодоступности стронция в автоморфных почвах.

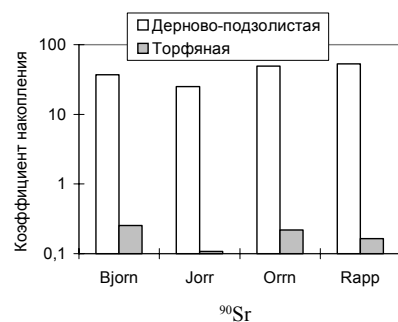


Рис. 5.2. Коэффициент накопления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в древесной массе КЦП ивы для разных клонов плантаций № 1 и № 2

Как следует из рис. 5.3, коэффициент накопления радионуклидов в листьях превышает коэффициент накопления в древесной массе. Такой вывод является закономерным ввиду более высоких скоростей фотохимических и биологических реакций в лиственной фитомассе.

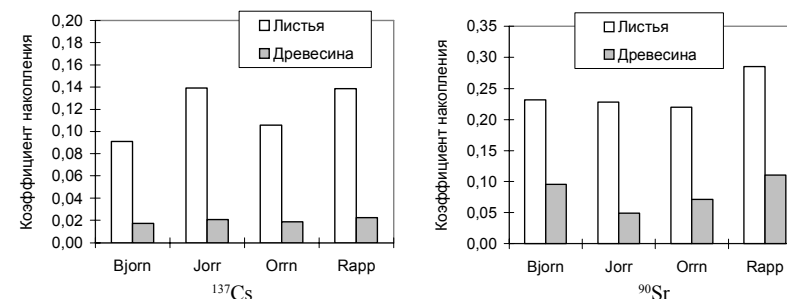


Рис. 5.3. Коэффициент накопления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в листьях и древесной массе КЦП ивы для разных клонов

Наибольшее влияние на коэффициент накопления активности в фитомассе оказывает катионообменная емкость почвы. Как это видно из рис. 5.4, 5.7. На которых по результатам, полученным на экспериментальных плантациях, построены диаграммы зависимости коэффициента накопления от наличия катионов в корнеобитаемом слое, на процесс фитоэкстракции существенно влияет соотношение между обменными и необменными формами К и Са в почвах.

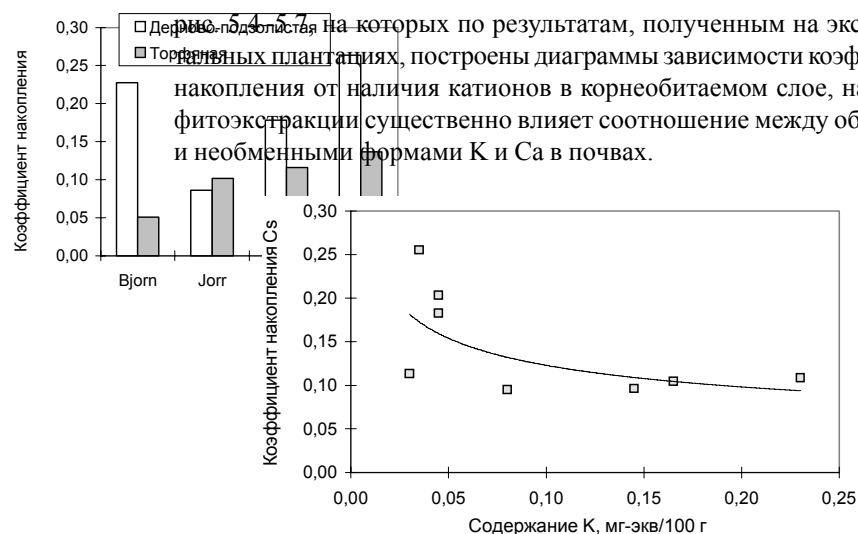


Рис. 5.4. Соотношение между коэффициентом накопления  $^{137}\text{Cs}$  и содержанием в почве катионов калия

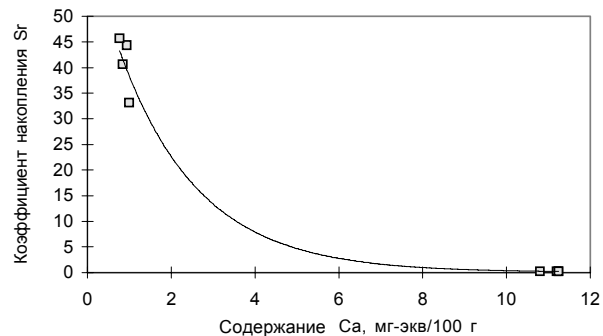


Рис. 5.5. Соотношение между коэффициентом накопления  $^{90}\text{Sr}$  и содержанием в почве катионов кальция

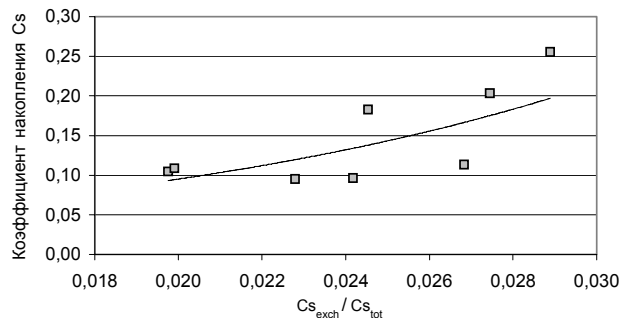


Рис. 5.6. Корреляция между коэффициентом накопления  $^{137}\text{Cs}$  в древесине ивы и содержанием его обменных форм в почве

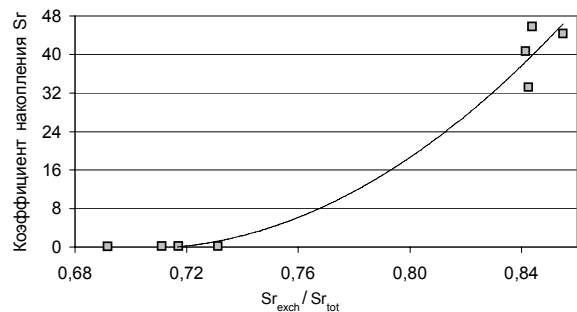


Рис. 5.7. Корреляция между коэффициентом накопления  $^{90}\text{Sr}$  в древесине ивы и содержанием его обменных форм в почве

Из приведенного выше анализа следует, что применение технологии КЦП ивы в качестве источника местного вида топлива в условиях Беларуси может быть ограничено наличием радиоактивного загрязнения почвы. Принимая во внимание нормативные уровни по удельной активности топливной древесины (см. табл. 4.10) и факторы перехода (см. табл. 5.2), выращивание «энергетических» плантаций ивы должно быть запрещено на почве с плотностью загрязнения выше  $20 \text{ Ки/км}^2$ .

### 5.3. Экономические характеристики

По данным Минлесхоза, стоимость закладки питомника лесных культур при плотности 18 тыс. саженцев на гектар и стоимости саженца 0.06 доллара составляет на текущий момент 1250 долларов/га. Ежегодный уход за посадками – рыхление междурядий, внесение удобрений – составит 92 доллара/га. Для посадок быстрорастущих сортов ивы в зимний период с такой маточной плантации срезаются однолетние побеги для нарезки черенков – посадочного материала для коммерческого плантационного выращивания биомассы. Срок службы маточной плантации составляет 5 лет, после чего качество посадочного материала начинает снижаться. Ежегодный сбор посадочного материала (однолетних побегов) с плантации-питомника площадью 20 га для последующего распространения на коммерческие плантации по производству биомассы составляет, по данным авторов, в среднем около 7.5 млн. черенков, что достаточно для закладки 400 га каждый год. Стоимость черенка на рынке принята 0.01 доллара.

Стоимостные показатели производства биомассы на плантации со сроком эксплуатации 25 лет и урожайностью в среднем 8 т у. т./га в год даны в табл. 5.3–5.7. В экономические оценки входят следующие затраты:

- единовременные:
  - осенняя или ранневесенняя вспашка, предшествующая закладке плантации, для стерни при удельном сопротивлении 48–53 кПа на глубину 18–22 см при длине гона  $>1000 \text{ м}$ ;
  - культивация с одновременным боронованием на глубину 5–8 см непосредственно перед посадкой;
  - обработка гербицидами – 2 раза (перед посадкой и после первой подрезки) в период первой ротации (в последующие годы прополка не требуется);
  - посадка черенков с плотностью посадки 18 тыс. черенков/га;

Таблица 5.5

## Единовременные затраты на закладку в расчете на 1 га

- подрезка посадок в конце первого года после закладки плантации;
- ежегодные:
  - внесение удобрений с заделкой в почву при дозе внесения 80–400 кг/га (в первые два года не требуется, в последующие – после сбора урожая в зависимости от состояния почвы);
  - сбор урожая зимой (каждый третий год после подрезки, всего 8 циклов ротации) и оставление его до начала весны для просушки;
  - измельчение древесной массы и погрузка щепы в транспортное средство;
  - транспортировка на расстояние до 10 км;
  - раскорчевка плантации после завершения ее эксплуатации, расчистка полос от валежника, порубочных остатков и пней диаметром до 10 см.

Таблица 5.3

## Расходные характеристики машин и механизмов, применяемых для различных операций

| Операция            | Техника                            | Производительность, га/ч | Расход топлива, кг/га |
|---------------------|------------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Вспашка поля        | МТЗ-80 с ПЛН-3-35                  | 4.9                      | 19.4                  |
| То же               | ДТ-75 с ПП 6-35                    | 9.8                      | 11.3                  |
| Боронование         | ККС-8                              | 4.5–5.4                  | 4.0–4.4               |
| Посадка черенков    | ДТ-75 с СКН-6А                     | 1.47                     | 11.8                  |
| Химическая прополка | МТЗ-80 с ОПШ-15М                   | 8–16                     | 4.4                   |
| Внесение удобрений  | МТЗ-80 с РШУ-12                    | 5.0                      | 4.4                   |
| Сбор урожая         | Полесье-700 МТЗ-80 – 2шт.          | 0.7                      | 45.0                  |
| Раскорчевка         | ОПП-2.3 с ТДТ-55А с навеской СНФ-3 | 0.2                      | 157.5                 |

Таблица 5.4

## Потребление дизельного топлива и трудозатраты на закладку, эксплуатацию и закрытие плантации

Таблица 5.6

## Единовременные затраты на раскорчевку в расчете на 1 га

| Затраты   | Затраты    | Норма расхода на 1 га | Сбор урожая, ц/га | Цена всего, долл. | Ежегодные затраты на эксплуатацию | Затраты, долл./га |
|---|------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|
| Аренда сельхозтехники   | 18 000 шт. | –                     | –                 | –                 | –                                 | 18 000            |
| Дизельное топливо (без учета дизельного топлива в составе древесной щепы) | 102.6 кг   | 157.5                 | 395.2             | 655.3             | –                                 | 32.3              |
| Трудозатраты (при механизации работ)                                      | 20 чел.-ч  | 10.0                  | 49.6              | 80.7              | –                                 | 2.5               |
| Удобрения   | –          | –                     | –                 | 80.5              | –                                 | 18.3              |
| Всеаммиачная селитра  | 0.15 кг    | –                     | –                 | –                 | –                                 | 154.0             |
| суперфосфат   | 0.05 кг    | –                     | –                 | –                 | –                                 | –                 |
| хлористый калий   | 0.06 кг    | –                     | –                 | –                 | –                                 | –                 |
| Прочие неучтенные затраты   | –          | 8.0 кг                | –                 | 8.0               | –                                 | 64.0              |
| Всего неучтенные затраты  | –          | –                     | –                 | –                 | –                                 | 18.9              |
| Всего   | –          | –                     | –                 | –                 | –                                 | 331.0             |

Таблица 5.7

## Ежегодные затраты на эксплуатацию в расчете на 1 га

## 6. ТОПЛИВО НА ОСНОВЕ БИОМАССЫ

### 6.1. Возобновляемые источники энергоресурсов

В затраты по подготовке топлива закладывается переработка на щепу свежей биомассы, однако может оказаться целесообразнее оставлять собранные ветви ивы в кучах на плантации для естественной подсушки, при этом исключаются потери массы за счет ферментации и спонтанного возгорания. Предварительная оценка стоимости переработки на щепу в этом случае дает  $C_{щ} = 35$  долларов/га в год. Транспортные расходы зависят от дальности транспортировки. При массе собранного и подсушенного на плантации урожая 15 т/га, дальности перевозки 10 км и транспортном тарифе 0.2 доллара/км ежегодные транспортные расходы составят  $C_{тр} = 30$  долларов/га в год.

Таким образом, с учетом ожидаемой урожайности (не менее 15 т воздушно-сухой биомассы с гектара в год), ежегодных эксплуатационных затрат ( $C_{эксп}$ ) и дисконтирования затрат на закладку ( $C_{з.пл}$ ) и раскорчевку ( $C_{р.пл}$ ) плантации на весь срок ее эксплуатации, себестоимость топлива ( $C_{т}$ ), доллар/т у. т., не превысит:

$$C_{т} = 15[C_{эксп} + C_{щ} + C_{тр} + (C_{з.пл} + C_{р.пл}) / 24] 7000 / 2400 = 25.$$

При цене на рынке энергоносителей  $C_{т.у.т.} = 60$  долларов чистый доход от плантации в конце ее эксплуатации составит почти 350 тыс. долларов при сроке окупаемости примерно 8 лет после первого сбора биомассы. За время действия проекта произойдет замещение почти 70.8 тыс. т у. т., что составит сокращение эмиссии парниковых газов на величину не менее 180 тыс. т  $CO_2$ .

Энергетика является центральной отраслью экономики, от состояния которой зависит устойчивое развитие как отдельных стран, так и целых регионов. В подавляющем большинстве стран мира энергетика и транспорт в значительной мере ориентированы на использование ископаемого топлива. При этом мир делится на производителей топлива и его потребителей, что является постоянным источником конфликтов, политической и социальной нестабильности. Например, около 60% опубликованных запасов нефти приходится на пять ближневосточных стран: Саудовскую Аравию, Иран, Ирак, Кувейт и Абу Даби.

Ситуация осложняется тем, что, согласно результатам многочисленных исследований, ископаемое топливо уже к середине текущего века не сможет удовлетворить запросы мировой экономики. К тому времени основная часть энергопотребления должна быть обеспечена за счет других источников энергии – нетрадиционных и возобновляемых.

*Возобновляемые источники энергии* – это энергетические ресурсы на основе постоянно существующих или периодически возникающих в окружающей среде потоков энергии. Возобновляемая энергия не является следствием целенаправленной деятельности человека, что отличает ее от энергии невозобновляемых источников, которые находятся в природе в связанном состоянии и высвобождаются в результате целенаправленных действий человека. В Беларуси, где запасы минеральных и органических ресурсов и без того ограничены, а общество уже утилизировало их более чем наполовину, экономика не может оставаться в стороне от тенденций мировых технологических программ, все более опирающихся на возобновляемые и нетрадиционные источники энергии.

В соответствии с резолюцией № 33/148 Генеральной Ассамблеи ООН (1978 г.) к нетрадиционным и возобновляемым источникам энергии (НВИЭ) относятся: солнечная, ветровая, геотермальная, энергия морских волн, приливов и океана, энергия биомассы, древесины, древесного угля, торфа, тяглового скота, сланцев, битуминозных песчаников и гидроэнергия больших и малых водотоков. Классификация НВИЭ представлена в табл. 6.1.

Таблица 6.1  
Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии

После нефтяного кризиса 1970-х гг. человечество стало обращать больше внимание на качество, а не на количество энергетических ресурсов, что положило начало современному витку развития возобновляемых экологически приемлемых энергоисточников, эффективных технологий использования энергии и принципов рационального потребления ресурсов природы.

Пока еще большинство технологий НВИЭ не имеет убедительных экономических аргументов, чтобы конкурировать с технологиями на ископаемом топливе, по крайней мере, в среднесрочной перспективе. Только при наличии значительной поддержки со стороны правительств и благодаря правильной политике, как например в случае с Киотским Протоколом по эмиссии парниковых газов, развитие и внедрение возобновляемых энергоисточников будет расширяться. За последние 10 лет такая поддержка привела эту отрасль к темпам развития более 20% ежегодно, которые опережают темпы развития традиционных видов энергоресурсов (2–5%).

Эксперты предсказывают продолжающийся рост потребления всех НВИЭ для производства электроэнергии до  $51.7 \cdot 10^3$  ПДж в 2025 г. (на 57% больше по сравнению с началом века). Несмотря на скромные 4% в глобальном производстве электроэнергии, промышленность, производящая оборудование для НВИЭ, переживает бум, создавая условия для устойчивого развития целых регионов. Этот рынок имеет емкость около 20–23 млрд. долларов (2003 г.) и привлекает примерно одну шестую всех инвестиций в сферу энергетики, организуя миллионы новых

рабочих мест. Суммарные капвложения в НВИЭ за период 1995–2003 гг. составили, по крайней мере, 110 млрд. долларов (рис. 6.1). Ожидается, что в период с 2004 по 2014 гг. ежегодные инвестиции в эту сферу достигнут 85 млрд. долларов. Распределение инвестиций между типами НВИЭ в наиболее успешном 2003 г. было почти равномерным.

Рис. 6.1. Доля инвестиций в разные технологии НВИЭ в 2003 г.

Установленная мощность всех НВИЭ составляет примерно 140 ГВт (табл. 6.2 без крупных гидроэлектростанций), что представляет немногим менее 4% всех мировых электрических мощностей. Около 40% установленных мощностей располагается в развивающихся странах.

Таблица 6.2

| Установленные мощности в сети (2003 г.), ГВт |  | Мощность        |                           |
|--|--|-----------------|---------------------------|
|  |  | По миру в целом | В развивающихся странах * |
| Ветроэнергетика                              | 38%  | 56              | 33                        |
| Малые гидроэлектростанции **                 | 24%  | 40              | 3                         |
| Энергия биомассы ***                         | 21%  | 35              | 18                        |
| Геотермальная энергия                        | 9%   | 9               | 4                         |
| Гелиоэнергетические установки (в сети)       | 1.1%                                       | 1.1             | <0.1                      |
| Гелионагревательные устройства               | 0.4%                                       | 0.4             | 0                         |
| Всего  |  | 142             | 58                        |
| Для сравнения                                | Крупные гидроэлектростанции                | 730             | 340                       |
|  | Всего установленных генерирующих мощностей | 3700            | 1300                      |

\* Развивающиеся страны не включают страны с переходной экономикой, которые включены в колонку «По миру в целом».

\*\* Определенные малые гидроэлектростанции в разных странах разные. Обычно это станция мощностью до 10 МВт.

\*\*\* Биоэнергетические установки не включают установки по сжиганию твердых бытовых отходов и газа от разложения органических отходов (биогаз).

Политика и национальные стратегии в области изменения климата становятся важнейшими инструментами, позволяющими сбалансировать энергетические потребности и затраты, которые проявляются с обострением проблем с окружающей средой, в социальной сфере, в области охраны здоровья и безопасности нации. Если учитывать эти затраты, то экономические индексы НВИЭ и традиционной энергетики практически сравниваются. Энергетическая политика большинства стран предусматривает ускоренное внедрение НВИЭ. Каждая страна по-своему определяет стратегию в этой области, устанавливая целевые показатели по тем технологиям, где ожидается быстрый эффект.

Использование твердой биомассы: древесина и остаточные сельскохозяйственные материалы, такие как солома, являются, вероятно, наиболее рентабельным типом возобновляемых энергоносителей. Мировые лидеры в этой области – США, Бразилия, Филиппины, Китай и Евросоюз. В Западной Европе Швеция и Австрия являются ведущими в увеличении использования биомассы, в особенности древесины, но Дания и многие другие страны также увеличили использование биомассы за прошлые десятилетия, что становится наиболее важным элементом в стратегии ЕС, нацеленной на удваивание использования возобновляемых энергоносителей в период 1995–2010 гг., однако развитие в 15 странах ЕС идет не так быстро, как ожидалось.

В Дании использование древесины и соломы увеличилось в 2,4 раза за период 1980–2001 гг. и в настоящее время покрывает более 5% основного потребления энергии. Наиболее важным способом применения биомассы продолжает быть непосредственное отопление площадей. Ожидается, что и в будущем для многих жилых домов, особенно находящихся вне досягаемости систем центрального отопления, этот способ применения сохранит значимость. Для того чтобы поддержать применение биомассы для отопления площадей, существует необходимость в эффективных и чистых бойлерах и печах, которые смогут превращать древесину в тепло с минимальными потерями и с минимальным местным загрязнением окружающей среды. В Западной Европе все шире используются автоматические и полуавтоматические бойлеры, которые требуют внимания со стороны человека только один раз в день или реже. Кроме того, растет популярность финских каминов (не только в Финляндии), которые нуждаются в разжигании только один раз в день.

Использование древесины и соломы в системах центрального отопления и ТЭЦ – это еще одно важное направление развития. Некоторое

количество подобных электростанций было построено в Швеции в основном в диапазоне электрической мощности 40–100 МВт. Эти электростанции требуют достаточно больших капиталовложений, а также нуждаются в том, чтобы производимая тепловая энергия потреблялась большими системами центрального отопления.

Производство биогаза из навоза – это прибыльная технология, заключающаяся в использовании свиного и коровьего навоза и куриного помета для производства энергии при сохранении их питательной ценности, приводящая к уменьшению загрязнения окружающей среды и большему использованию этих натуральных удобрений в сельском хозяйстве. Прибыльная отрасль электростанций, работающих на биогазе, получила развитие в Германии, Дании, Соединенном Королевстве и других странах Западной Европы. Большинство таких электростанций строится на крупных фермах, но в Дании также сооружается определенное количество работающих на биогазе электростанций совместного пользования, когда около 10 фермерских хозяйств снабжают навозом одну большую электростанцию. Обычно на электростанциях, работающих на биогазе, устанавливаются автоклавы-метантенки объемом 100 м<sup>3</sup> и более и газовые двигатели с генераторами, причем сбросное тепло используется для подогрева автоклавов, а также строений, расположенных поблизости. В Дании общепринятой практикой является получение электростанциями отходов пищевой промышленности и сортированных бытовых отходов в дополнение к навозу. Это увеличивает производство газа, но требует, чтобы отходы были свободны от загрязнений, таких как тяжелые металлы и стойкие органические загрязнители. В Дании один только биогаз покрывает 1–3% основных нужд в энергии и его доля увеличивается. Потенциал составляет около 3% основного производства энергии.

Технологии выработки жидкого топлива из биомассы (биоэтанол и биодизельное топливо) являются достаточно распространенными, особенно в Европе, Бразилии, США, Китае, Канаде и Японии. Сейчас это производство занимает скромную нишу в 1% от общего объема жидкого моторного топлива, однако оно неуклонно растет с темпами около 20% в год. Лидером по выпуску биоэтанола является Бразилия, на долю которой приходится более половины всего объема. Остальную половину производят в США, где эта технология начала интенсивно развиваться с 1999 г. Большинство производств (почти 80%) биодизельного топлива сосредоточено в Германии, Франции и Италии. Гораздо меньшая доля вырабатывается в США и остальных странах Европы.

## 6.2. Топливо и его виды

Топливом является горючий материал, характеризующийся значительным тепловыделением на единицу массы или объема при соединении с доступным окислителем с возможностью организации массового использования.

В качестве топлива используются различные природные органические вещества в разных агрегатных состояниях (табл. 6.3). Существует также принципиально иной вид топлива – так называемое ядерное, которое в специальных устройствах выделяет энергию деления ядер и генерирует ее без протекания реакции окисления.

Горючими компонентами любого органического топлива являются следующие элементы с низкой степенью окисления:

- углерод;
- водород;
- сера.

Кроме них в состав почти всех видов топлива входят кислород и азот, находящиеся с горючими элементами в связанном состоянии и образующие внутренний топливный баланс, а также некоторые другие неорганические вещества.

Классификация топлива

Таблица 6.3

| Топливо     | Твердое  | Жидкое  | Газообразное  |
|-------------|--|---|---|
| Природное   | Дрова, торф, бурый уголь, каменный уголь, сланцы, горючие сланцы | Нефть, серы (сернистый газ с энергивыделением 2160 ккал на 1 кг серы, тогда как сульфаты являются балластным элементом) | Природный газ, нефтяной газ, коксовый газ, генераторный газ |
| Производное | Древесный уголь, кокс, кокс                                      | Мазут, керосин, бензин  | Нефтегаз (попутный газ), коксовый газ, генераторный газ     |

смагивать как последовательные стадии углефикации растительной биомассы. В такой же последовательности изменяется теплотворная способность этих видов топлива – от 2300 ккал/кг для торфа до 8800 ккал/кг для антрацита.

Водород является второй важнейшей частью любого органического топлива. При сгорании чистого водорода выделяется от 28 600 до 33 900 ккал/кг в зависимости от фазового состояния образующейся при сгорании воды. С увеличением возраста топлива содержание водорода в нем уменьшается. В реальном топливе водород частично связан с кислородом, что несколько уменьшает его энергетическую ценность. Свободный, или используемый, водород определяется как разность между полным содержанием водорода в органическом веществе и восьмой частью связанного кислорода. При термохимической переработке твердого и жидкого топлива водород входит в состав образующихся летучих органических соединений.

Кислород и азот в высоких степенях окисления являются балластной составляющей топлива, так как снижают массовую долю горючих элементов. В то же время аммонийные формы азота являются горючим материалом, при сгорании которого выделяется азот в элементарной форме.

Сера в топливах содержится в виде соединений серы (сернистый газ с энергивыделением 2160 ккал на 1 кг серы, тогда как сульфаты являются балластным элементом). Сернистый газ разрушает металлоконструкции и опавляет окружающую среду. Поэтому сера в топливе является чаще всего элементом нежелательным (чем меньше ее содержание, тем выше качество топлива).

Зола (или зольный остаток) представляет собой смесь различных минеральных веществ, остающихся после полного сгорания всей горючей части топлива. Зольность топлива, определяющаяся как отношение массы зольного остатка к массе топлива, изменяется от долей процента для газа и мазута до 40–60% для сланцев. Зола содержит нерастворимые соли органических кислот, продукты разложения минеральных пород и сами минеральные породы, которые захватываются топливом при его разработке. Она является балластной примесью топлива, снижающей его энергетическую ценность. Кроме того, серьезные затруднения вызывает плавкость золы и шлакообразование при достаточно высокой тем-



пературе горения. Расплавленный шлак осложняет работу топочных устройств и разрушает их огнеупорную футеровку.

Влага является наиболее нежелательной составляющей топлива вследствие балластного действия и затраты части энергии на испарение воды, а также снижения температуры продуктов сгорания. С повышением влажности увеличиваются расходы на транспортировку топлива. Топливо с высоким уровнем влажности обычно называется местным, так как дальняя его перевозка неэкономична. Влага, содержащаяся в топливе (в основном в твердых его видах), имеет две составляющие:

- абсорбированная топливом вода;
- более прочно связанная гигроскопическая влага.

К жидким видам топлива относят производные перегонки нефти, такие как мазут, соляровое масло, бензин, керосин. Из жидких в качестве энергетических используется практически только мазут. Иногда для малых и передвижных электрогенераторов применяют бензин и соляровое масло.

Мазут представляет собой наиболее тяжелый остаток нефтепереработки после отгонки более легких фракций: бензина, керосина и солярового масла. Мазут на 84–86% состоит из углерода и на 11–12% – из водорода; характеризуется высокой энергетической ценностью – порядка 9700–9800 ккал/кг. Различают мазут малосернистый ( $SP < 0.5\%$ ) и высокосернистый ( $SP > 0.5\%$ ), а также (в зависимости от содержания смолистых веществ и парафина) маловязкий и высоковязкий.

Среди газообразного топлива особое значение имеет природный газ, основной составляющей частью которого является метан (80–98%). В качестве примесей может присутствовать небольшое количество более тяжелых углеводородов, сероводород, вода и пыль.

Теплота сгорания сложного газообразного топлива определяется как сумма произведений объемных долей отдельных горючих газов на теплоту их сгорания и выражается в ккал/м<sup>3</sup>.

Тепловыделение при сжигании природного газа составляет 8000–8500 ккал/м<sup>3</sup>, поэтому экономически оправданным является его трубопроводная транспортировка на расстояние порядка тысяч километров. Еще более высокой калорийностью характеризуется попутный газ, получаемый при нефтепереработке (до 11 000 ккал/м<sup>3</sup>).

Генераторный газ представляет собой смесь продуктов неполного сгорания твердого топлива (окись углерода), его пиролиза (водород, метан), а также углекислоты, азота и паров воды. Генераторный газ получается при газификации различных видов твердого топлива (камен-

ный и бурый уголь, торф, древесная биомасса и т. п.) при недостатке воздуха. Калорийность генераторного газа обычно невысокая и находится в пределах 1200–1500 ккал/м<sup>3</sup>.

Твердое топливо обычно является сложной смесью соединений H, C, S, O, N (как правило, это углеводороды и частично окисленные вещества, которые могут содержать азот и серу) и внешнего балласта, состоящего из влаги и золы. Разнообразие твердых видов топлива дает возможность разрабатывать гибкие технологии, применимые в разных сферах тепло- и энергоснабжения.

### 6.3. Особенности топлива на основе биомассы растений

Содержание связанного углерода в древесине и торфе 50–58%, в каменном угле и антраците 80–90%. Недостатком биомассы является ее низкая калорийность (порядка 3000–3500 ккал/кг сухого веса) и небольшая насыпная плотность, что заставляет относить ее к местным видам топлива. Важная современная задача – разработка технологии трансформации биомассы в более калорийное топливо (водород, этиловый и метиловый спирт, ацетон и т. п.), которое может использоваться даже в

| Масса         | Индексация по составу |                |                |                |                             |                |                |
|---------------|-----------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------------|----------------|----------------|
|               | Углерод               | Водород        | Кислород       | Азот           | Сера                        | Зола           | Влага          |
| Органическая  | до 90%                | до 10%         | до 10%         | до 1%          | до 1%                       | до 1%          | до 1%          |
| Аналитическая | до 90%                | до 10%         | до 10%         | до 1%          | до 1%                       | до 1%          | до 1%          |
| Горючая       | до 90%                | до 10%         | до 10%         | до 1%          | до 1%                       | до 1%          | до 1%          |
| Сухая         | до 90%                | до 10%         | до 10%         | до 1%          | до 1%                       | до 1%          | до 1%          |
| Рабочая       | С <sup>Р</sup>        | Н <sup>Р</sup> | О <sup>Р</sup> | Н <sup>Р</sup> | С <sup>Р</sup> <sub>л</sub> | А <sup>Р</sup> | W <sup>Р</sup> |

Индексация древесного топлива по массе

Таблица 6.4

Содержание различных составляющих топлива обычно приводится в массовых процентах или массовых долях. Пересчет характеристик топлива из одной массы в другую (в массовых долях) приведен в табл. 6.5.



## 6.4. Процессы сжигания биомассы

Горением органического топлива называется процесс окисления его горючих компонентов чаще всего кислородом воздуха, сопровождающийся интенсивным тепловыделением и эмиссией высокотемпературных газообразных продуктов.

Определяющими факторами управляемого процесса горения являются:

- концентрация и скорость подачи топлива и окислителя;
- температурный режим;
- гидродинамический режим;
- скорость отвода продуктов горения.

Процесс горения проходит через несколько стадий. Основой его материального баланса является количественная оценка расхода окислителя и конечных продуктов горения на единицу топлива. При полном сгорании образуются  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . При неполном есть продукты промежуточных стадий горения:  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ . Упрощенная запись общего уравнения горения:

где так называемая топливная характеристика:

Топливная характеристика не зависит от содержания балласта, она определяется только горючей массой. Число  $\beta$  колеблется от 0.05 для антрацита до 0.35 для мазута.

Коэффициент избытка воздуха определяется отношением действительного его количества в топке к стехиометрическому:

$$\alpha = \left\{ 1 - \frac{79}{21N_2} [O_2 - 0.5(CO + H_2) - 2CH_4] \right\}^{-1},$$

где  $O_2$  определяется как свободный кислород в объеме сухих дымовых газов.

Тепловым балансом устанавливается равенство между приходом тепла от сгорания топлива и расходом тепла как за счет выработки полезного продукта (горячей воды, пара и т. п.), так и за счет тепловых потерь. Общая запись уравнения теплового баланса:

где  $\eta_B$  – к. п. д. котлоагрегата;  $B$  – расход топлива, кг/ч;  $Q_H^P$  – теплота сгорания, ккал/кг;  $D$  – расход питательной воды на производство конечного продукта, кг/ч;  $Q_{H, \text{приток}}^P - Q_{H, \text{отток}}^P$  – разница энтальпий конечного продукта и питательной воды, ккал/кг.

В этом выражении к. п. д. котлоагрегата учитывает как тепловые потери, так и дополнительный приток тепла, который складывается:

- из тепла дутьевого воздуха, поступающего в топку;
- тепла внешнего воздуха за счет присоса;
- физического тепла топлива;
- тепла паровых продувок.

Тепловые потери складываются из потерь тепла:

- с уходящими продуктами сгорания (до 80% всех потерь);
- от химического недожога, т. е. в результате неполноты сгорания топлива;
- от механического недожога, т. е. в результате потери частиц топлива (через колосниковую решетку, с золой уноса);
- в окружающую среду;
- с зольными отходами;
- на разложение карбонатной золы.

Процесс горения и газификации твердого топлива состоит из ряда последовательных этапов:

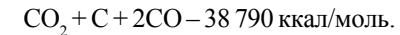
- прогрев;
- испарение влаги;
- выделение летучих;
- воспламенение и горение летучих;
- горение коксового остатка.

Первые три процесса – эндотермические; последние два – экзотермические.

При сгорании коксового остатка формируются окислительная (кислородная) и восстановительная зоны горения. В первой происходят следующие характерные реакции сгорания углерода:

- первичные  $C + O_2 = CO_2 + 97\,650$  ккал/моль;  
 $2C + O_2 = 2CO + 58\,860$  ккал/моль;
- вторичная  $2CO + O_2 = 2CO_2 + 136\,440$  ккал/моль.

Во второй зоне происходит вторичная реакция



Поскольку горение твердого топлива является гетерогенным процессом, то на интенсивность реакции горения влияют не только температурный фактор (реакция горения), но и гидродинамический (скорость подвода и отвода окислителя от поверхности, где происходит реакция). Результирующая скорость реакции горения определяется скоростью наиболее медленного процесса. Различают кинетическую, диффузионную и промежуточную области горения (рис. 6.2).

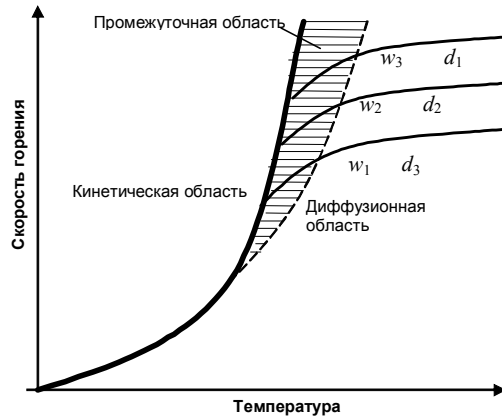


Рис. 6.2. Кинетика реакции горения в зависимости от температуры горения, скорости подачи топлива  $w$  и размера топливных частиц  $d$

При снижении скорости подачи воздуха  $w$  в зону реакции или при увеличении размера частиц топлива  $d$  область реагирования смещается в диффузионную область.

В зависимости от качества, химического и гранулометрического состава топлива для интенсификации процесса горения и достижения минимально возможного химического и механического недожога организуют различные схемы реализации топочного процесса. Основные схемы:

- в плотном, или кучевом, слое (700–1000 кг топлива на  $1 \text{ м}^3$  слоя);
- в кипящем слое (400–600 кг топлива на  $1 \text{ м}^3$  слоя);
- в вихревом, или циклонном, процессе (1–10 кг топлива на  $1 \text{ м}^3$  топочного пространства);
- в факеле (0.02–0.05 кг топлива на  $1 \text{ м}^3$  топочного пространства).

Поскольку при кучевом сжигании образуются две зоны реакции горения – окислительная и восстановительная, то дутьевой воздух пода-

ется обычно из-под слоя с организацией вторичного, а иногда и третичного дутья. На рис. 6.3 показано типичное распределение концентрации кислорода дутьевого воздуха,  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$ , а также температуры по высоте горящего слоя топлива над колосниковой решеткой.

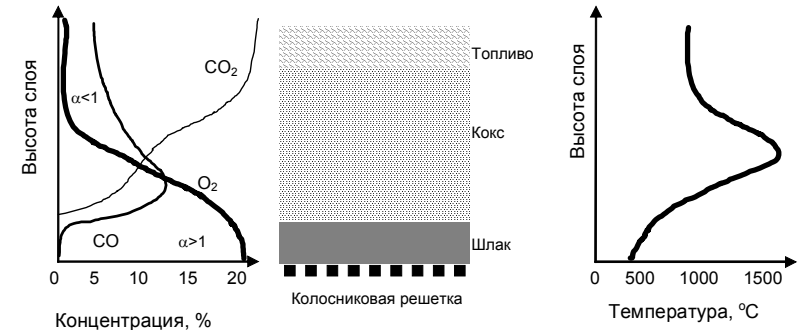


Рис. 6.3. Распределение основных параметров по высоте слоя топлива в топочном устройстве при кучевом сжигании

Конструкция топки определяется выбранной схемой организации топочного процесса. Различают следующие конструкции слоевых топков:

- немеханизированные;
- полумеханические;
- механизированные (все три операции – топливоподача, перемещение слоя и удаление золы – механизированы).

## 7. ПОВЕДЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ПРОЦЕССАХ СЖИГАНИЯ

### 7.1. Принципы формирования радиоактивных аэрозолей

Радионуклиды в древесном топливе находятся в основном в растворимой форме. Летучесть цезия и стронция при сжигании древесного топлива зависит от свойств этих металлов и от вида их соединений в растворах.

Для Cs/Sr:

- тройная точка = 28.5/770°C;
- нормальная температура испарения = 705/1380°C;
- температура в критической точке = 1784/2057°C.

Цезий является более летучим элементом, и, кроме того, он находится в различных соединениях, которые при сжигании становятся еще более летучими. Основные формы соединений цезия в древесине: CsOH, CsCl, CsNO<sub>2</sub>, Cs<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, Cs<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

При сжигании наименее летучими являются формы Cs<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, Cs<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, а наиболее – CsOH и CsNO<sub>2</sub>.

При температурах около 1200°C в топочном пространстве цезий может содержаться как в элементном состоянии в любой фазе, так и в любой фазе в виде соединений CsCl, CsF, CsOH, Cs<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, а в газовой фазе – в виде CsO, Cs<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>, Cs<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, Cs<sub>2</sub>O, Cs<sub>2</sub>O<sub>2</sub>H<sub>2</sub>.

В зависимости от состава топлива и температурного режима в различных зонах горения могут образовываться либо легколетучие, либо слаболетучие формы. На рис. 7.1 представлен баланс цезия в виде основных его соединений в механизированной топке с кучевым сжиганием с изменением температуры.

Во время сжигания топлива в зоне высоких температур образуется большое количество первичных субмикронных частиц. Их образование следует известному механизму:

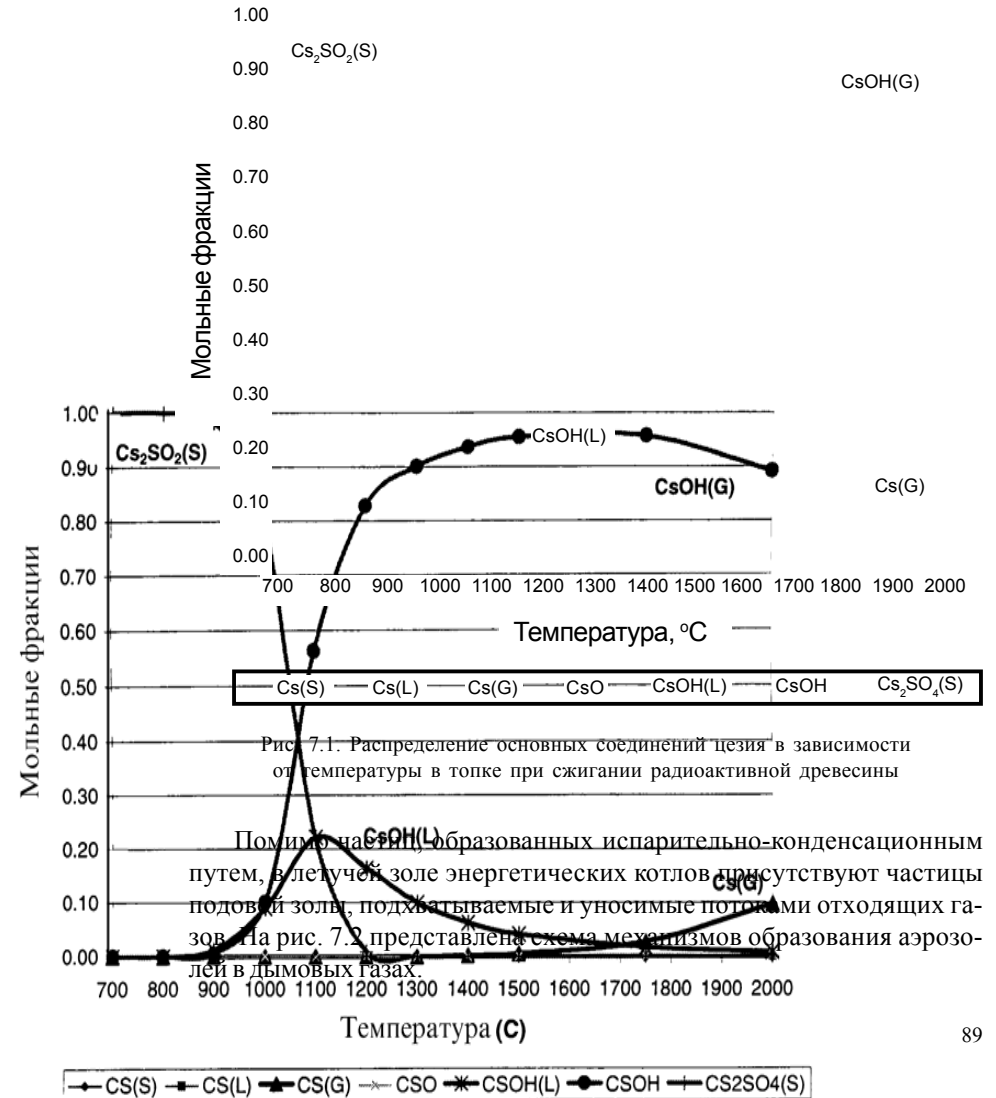
- испарение летучих и некоторой части минеральных веществ топлива в субоксидной или элементарной формах;
- пересыщение пара с образованием путем гомогенной конденсации первичных частиц летучей золы.

Этот процесс дает частицы аэрозолей субмикронных размеров (<0.2 мкм).

Далее частицы еще при достаточно высоких температурах растут за счет следующих механизмов:

- броуновское соударение и сращивание;
- коагуляция в цепочки или кластеры;
- гетерогенная конденсация более летучих соединений на центрах первичных частиц при понижении температуры.

Этот процесс приводит к образованию частиц с размерами более 0.2 мкм.



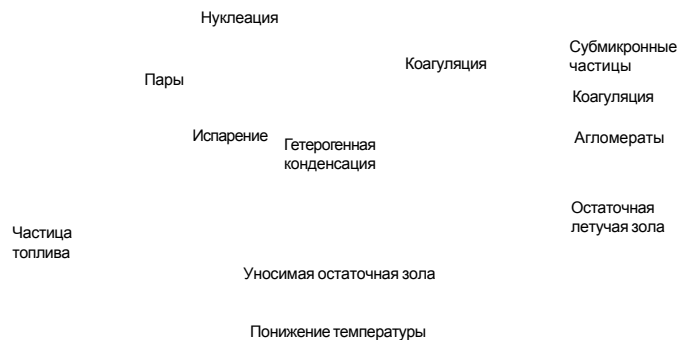


Рис. 7.2. Схема образования пылевых и аэрозольных частиц при сжигании древесного топлива

На рис. 7.3 показано типичное распределение активности по размерам частиц аэрозольного и пылевого потока, усредненное для разных температурных режимов.

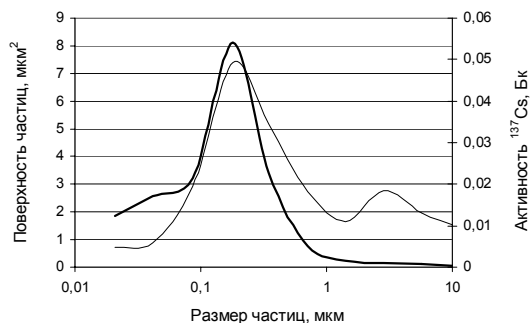


Рис.7.3. Распределение поверхности и активности дымовых газов по размерам частиц

Возможно несколько сценариев формирования частиц, содержащих цезий.

Сценарий 1. Цезийсодержащие соединения испаряются и нуклеируют без взаимодействия с парами других соединений или частицами. В этом случае  $^{137}\text{Cs}$  будет концентрироваться в частицах размером  $<0,1$  мкм, распределение активности очень узкое и не похожее на распределение массы. Удельная активность в этой области размеров частиц будет иметь высокий максимум.

Сценарий 2. Цезийсодержащие соединения испаряются и нуклеируют вместе с другими летучими (в первую очередь с калием) и не взаимодействуют с частицами. В этом случае конденсированная фаза также будет представлять собой очень мелкие частицы, диаметром около  $0,1$  мкм, являющиеся активной сердцевиной, окруженной конденсированной фазой калия. Распределение активности будет несколько шире, чем в сценарии 1. Удельная активность будет также иметь максимум в этой области размеров частиц.

Сценарий 3. Цезийсодержащие соединения испаряются и конденсируются на всех существующих частицах без корреляции с их составом. При этом распределение активности более широкое с максимумом в районе размера частиц в  $0,1$  мкм и практически совпадает с распределением площади поверхности частиц. Удельная активность будет иметь слабую зависимость от размера частиц.

Сценарий 4. Значительная часть цезийсодержащих соединений практически не испаряется, а субмикронные частицы с наличием в них  $^{137}\text{Cs}$  образуются и переносятся за счет механизма захвата. В этом случае вместе с цезием можно ожидать присутствия других нелетучих. Распределение активности равно или шире распределения площади поверхности частиц при максимуме более  $0,1$  мкм. Кроме того, активность будет изменяться в большей степени от измерения к измерению, следуя условиям в топке. Удельная активность будет иметь слабую зависимость от размера частиц с несколькими небольшими экстремумами.

В табл. 7.1 приведены средние значения удельной активности материальных потоков, генерируемых в установке сжигания радиоактивной древесины при заданных значениях загрязнения исходного топлива по результатам опытов. Котлоагрегат со слоевой топкой в большинстве случаев генерирует опасные аэрозоли, удельная активность которых в 350–630 раз выше исходной активности топлива (см. колонку «Фактор обогащения»).

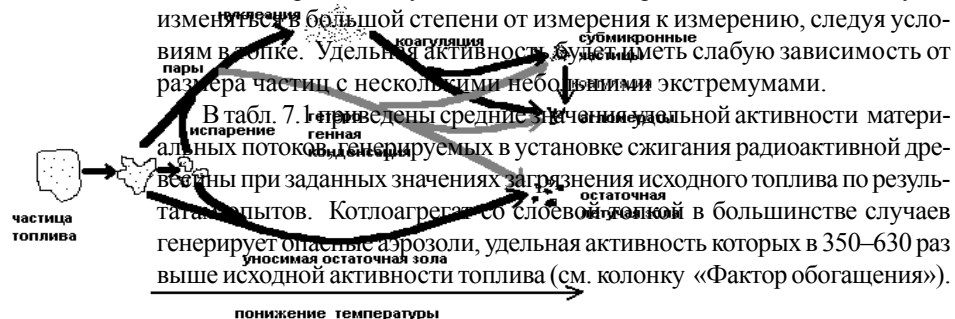


Таблица 7.1.

Удельная активность топлива и зольных потоков

| Материал                     | Удельная активность, Бк/кг | Фактор обогащения |
|------------------------------|----------------------------|-------------------|
| Древесная щепа               | 80–150                     | 1                 |
| Подовая зола и шлаки         | $2\,424 \pm 251$           | 21                |
| Зола уноса (крупные фракции) | $3\,423 \pm 638$           | 23–42             |
| Зола уноса (мелкие фракции)  | $10\,213 \pm 1\,728$       | 68–117            |
| Субмикронные аэрозоли        | $52\,688 \pm 2\,731$       | 352–637           |

На рис. 7.4 показаны потоки активности, сопровождающие потоки соответствующих веществ (топлива, золы, аэрозолей). Из рисунка становится очевидным, что без системы газоочистки котлоагрегат выбрасывает в атмосферу каждую секунду более 4 Бк, или около 3 мКи/год.

местном уровне по причине, например, текущей ситуации с высоким фоновым загрязнением среды, возможных выбросов других опасных загрязнителей, выбросов радионуклидов, возникших после Чернобыля, и др.

Таблица 7.2

**Предельные значения выбросов загрязняющих веществ по нормативам Республики Беларусь**

| Загрязнитель    | Выбросы загрязняющих веществ, мг/м <sup>3</sup> , при $\alpha = 1.0$ |  |  |   |                |
|-----------------|--|--|--|---|----------------|
|                 | ТУ РБ 300145045-004-2002 и 200049899-018-2000                        | ГОСТ 28193 (0.1–3.15 МВт) $\alpha = 1.0$ | ГОСТ 10617 (0.1–3.15 МВт) $\alpha = 1.0$ | ГОСТ 21563-93 (0.63–209 МВт) $\alpha = 1.4$ | СНИП №11-35-76 |
| Пылевые частицы | Не нормир.   | 140                                      | Не нормир.                               | 100   | 100            |
| СО              | 1100–4600  | 1300                                     | 1100–2000                                | 1000  | Не нормир.     |
| NO <sub>x</sub> | 750  | 1050                                     | 750                                      | 750   | Не нормир.     |
| SO <sub>2</sub> | Не нормир.   | 280                                      | Не нормир.                               | 200   | Не нормир.     |

Таблица 7.3

**Предельные значения выбросов загрязняющих веществ по нормативам некоторых стран ЕС**

| Загрязнитель    | Выбросы загрязняющих веществ, мг/м <sup>3</sup> , при $\alpha = 1.0$ |               |               |               |
|-----------------|--|---------------|---------------|---------------|
|                 | Финляндия  | Дания         | Польша        | Чехия         |
| <6 МВт          | Менее жесткое  | Более жесткое | Более жесткое | Более жесткое |
| Пылевые частицы | Менее жесткое  | Более жесткое | Менее жесткое | Менее жесткое |
| СО              | Не нормир.   | 625           | 6250          | 650           |
| NO <sub>x</sub> | Не нормир.   | 300           | Не нормир.    | 650           |
| SO <sub>2</sub> | 200  | Не нормир.    | Не нормир.    | 2500          |

Таблица 7.4

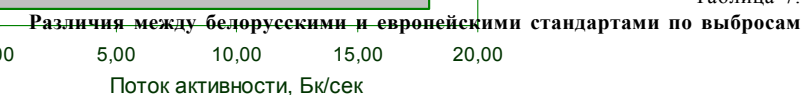


Рис. 7.4. Поток радиоактивности с разными материальными потоками

## 7.2. Очистка дымовых газов

В Беларуси действует несколько стандартов (табл. 7.2), регламентирующих выбросы загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании древесного топлива. В последнее время они были подвергнуты анализу и сравнению с действующими стандартами Европейского Союза (табл. 7.3). Было показано, что в некоторых случаях нормативы Беларуси неоправданно более жесткие (табл. 7.4).

Хотя имеющиеся различия между интервалами допустимых пределов выбросов, принятых в европейских и белорусских стандартах, незначительные, тем не менее, наибольшее несоответствие связано с фактом различия в концепциях их применения (см. подраздел 2.3).

Эффективное применение технологий сжигания биомассы требует определенного соответствия приведенным регламентным документам и нормам. В отношении эмиссии парниковых газов биоэнергетика многих стран не является предметом опасений, так как биомасса вовлекается в процесс сгорания как возобновляемое топливо. С другой стороны, некоторые ограничения могут быть введены на

Между тем в Беларуси реальные выбросы атмосферных загрязнителей из действующих котельных на древесине превышают нормативные значения. Особенно это относится к высокому пылесодержанию в дымовых газах (превышение концентрации до 30 раз), а также к выбросам окиси углерода (превышение составляет от 1.5 до 5.0 раз). Это обу-

словлено двумя причинами: подавляющее большинство промышленных котельных не оборудовано какими-либо системами улавливания твердых частиц; большинство котлов устарели как по конструкции, так и по эксплуатационным характеристикам. Относительно выбросов  $\text{NO}_x$  при сжигании биомассы фактические выбросы редко превышают установленные нормативы. Не было замечено ни одного превышения нормативного уровня по выбросам двуокиси серы из котлов на древесном топливе.

Установленные нормативы по выбросам пыли в Беларуси остаются невыполнимыми. Очевиден тот факт, что без систем очистки дымовых газов белорусские котлостроители не смогут выполнить требования стандартов.

Следующие мероприятия, интегрированные в процесс и ведущие к снижению выбросов  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  и твердых частиц, должны быть введены в технические условия для новых котлоагрегатов:

- снижение коэффициента избытка воздуха до стехиометрического значения (герметизация топки, оптимально разработанная зона горения, позонное дутье, рециркуляция отходящих газов и т. п.);
- дожигание (или возврат недогоревших частиц топлива для котлов на биомассе);
- водоохлаждаемая подвижная решетка (для котлов на биомассе);
- экранированные водоохлаждаемые стенки топки и радиационных секций.

Остальные возможные интегрированные в процесс технологии связаны с организацией правильной практики эксплуатации котла и могут не вести к значительным увеличениям затрат. Возможно, это является обычным для западного технического сообщества, но в белорусских условиях выполнение нижеследующих правил является решающим:

- техническое обслуживание должно быть обеспечено согласно ТУ в соответствии с графиком профилактических работ;
- котел должен работать на полной и постоянной нагрузке, по крайней мере в течение продолжительного времени эксплуатации;
- должно сжигаться только номинальное (расчетное) топливо для данной конструкции котла.

Качество расчетного топлива является очень важным элементом для управления выбросами  $\text{NO}_x$ , пыли и  $\text{CO}$ . Выбросы  $\text{SO}_2$  снизятся, если использовать топливо с низким содержанием серы.

Не все технологии «на конце трубы» доступны в Беларуси. Некоторые из них, например использование электронных пучков для восста-

новления  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_2$ , хотя и разработаны в стране, но являются очень дорогостоящими и поэтому скорее экспортируются, чем применяются на отечественных объектах.

Из доступных технологий по снижению выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_2$ , которые иногда используются в некоторых промышленных процессах, можно перечислить следующие:

- методы селективного каталитического или некаталитического восстановления, которые базируются на реакциях  $\text{NO}_x$  с аммиаком или мочевиной;
- мокрый скруббер для удаления  $\text{SO}_2$  с применением известняка или аммиака в качестве реагентов.

Наиболее распространенными аппаратами, которые производят десятки отечественных заводов для снижения выбросов твердых частиц, являются циклон и мультициклон. Большинство новых котлов, которые спроектированы и построены в Беларуси, оборудованы по этой технологии. Диапазон производительности составляет от 100 до 8000 м<sup>3</sup>/ч.

Никакие другие типы пылеуловителей не производятся в Беларуси в коммерческом масштабе, но ряд производителей России предлагает два наиболее распространенных типа – рукавный и электростатический фильтры производительностью от 600 до 600 000 м<sup>3</sup>/ч.

Во многих случаях, особенно для крупных котлоагрегатов на древесине, для того чтобы обеспечить должную очистку отходящих газов (пыль, зола уноса, аэрозоли, радиоактивные частицы), образующихся в результате процесса горения, может потребоваться двустадийная система очистки.

Первая стадия включает инерционный предварительный фильтр – мультициклон, в котором крупная зола уноса, песок и несгоревшие частицы топлива отделяются от мелкодисперсных аэрозолей за счет центробежных сил. Крупные топливные частицы и зола затем возвращаются в топку. Мелкие фракции золы уноса из последней стадии мультициклона собираются в пылесборнике и транспортируются в систему золоудаления. Обычно мультициклон обладает эффективностью до 60–70%, обеспечивая тем самым заметное снижение пылевой нагрузки на последней стадии фильтрации и устраняя возможный доступ искр из топки к фильтроматериалу пылеуловителя, расположенного ниже по потоку.

Общеизвестно, что мелкодисперсные аэрозоли, особенно субмикронные частицы, отвечают за захват и перенос летучих соединений тя-



**Унос частиц из топочного пространства для разных технологий сжигания биомассы**

железных металлов и радионуклидов. Это достаточно часто происходит, когда используется термический процесс с относительно высокой температурой. Рукавный фильтр является известным и проверенным элементом многих установок с термическими процессами, включая электростанции, работающие на твердом топливе. Модуль фильтра имеет ряд размещенных в картридже рукавов, которые крепятся на ячеистой плите на верху модуля. В каждом модуле дымовые газы проходят через материал рукавов снаружи внутрь и аэрозоли осаждаются на внешней поверхности рукавов.

Распространенная конструкция рукавного фильтра включает создание противотока подачей сжатого воздуха из верхних ячеек через инжекционные сопла для регенерации рукавов. Быстропульсирующий противоток, поданный внутрь каждого рукава, покидает его через наружную поверхность и стряхивает таким образом спрессованную пыль, выдувая частицы, задержанные в порах материала фильтра. Регенерирующий цикл происходит автоматически без остановки процесса фильтрации. Удаленная пыль накапливается в пылеуловителе, извлекается из него с помощью червячного транспортера, затем собирается с каждого модуля и транспортируется к системе удаления золы уноса посредством герметичного скребкового или винтового транспортера.

Современные материалы, используемые в рукавных фильтрах, такие как PTFE-мембраны или полиэфирные игольчатые фетры микропористой структуры (MPS®) способны обеспечить эффективность очистки 99% и выше. Специальное исследование по сжиганию загрязненной древесины в промышленном котлоагрегате со слоевой топкой и колосниковой решеткой, проведенное авторами, показало, что эти материалы могут также обеспечить высокую эффективность в захвате радиоцезия, содержащегося в летучих субмикронных твердых частицах. Радиоактивность дымовых газов снизилась в 103 раза, гарантируя выбросы радионуклидов заметно ниже допустимого уровня.

Как отмечалось, во время процесса сжигания топлива в зоне высоких температур образуется большое количество первичных субмикронных частиц. Двигаясь далее по тракту, они могут срачиваться друг с другом, а при дальнейшем понижении температуры на их поверхности происходит конденсация более летучих соединений, испарившихся в зонах горения. Количество и размеры пылевых частиц уноса в значительной степени зависят от вида топлива и способа его сжигания (табл. 7.5).

Требования к системе газоочистки определяются размером частиц в дымовых газах на выходе из топки. Методы очистки и размеры улавливаемых пылевых частиц, мкм, приводятся ниже:

- механические инерционные, 10–1000 и более;
- мокрые, 2–100;
- фильтрация, 0.01–100;
- электростатические, 0.005–10;
- комбинированные.

При проектировании пылеуловителей обычно рассматривают ряд важных характеристик, таких как коэффициент очистки, пористость,

| Тип топки          | Доля частиц уноса, % мас. |                          |             |
|--------------------|---------------------------|--------------------------|-------------|
|                    | в шлаках топки            | на стенках и в дымоходах | в атмосферу |
| Циклонная топка    | 80                        | 10                       | 10          |
| Кучевое сжигание   | 75                        | 15                       | 10          |
| Кипящий слой       | 60                        | 15                       | 25          |
| Факельное сжигание | 15                        | 10                       | 75          |

(7.1)

Пористость (для методов фильтрации)  $\epsilon$ .

(7.2)

где  $V_i$  и  $V_0$  – объем пространства между непроницаемыми элементами фильтрующего материала (объем пор) и общий объем, занятый фильтрующим материалом, соответственно;  $\rho_i$  и  $\rho_0$  – плотность материала и кажущаяся плотность фильтрующей среды соответственно;  $\alpha$  – плотность упаковки.

Скорость процесса фильтрации (для методов фильтрации)  $w$

(7.3)

где  $G_v$  – объемный расход газа через устройство, м<sup>3</sup>/с;  $S_f$  – площадь фильтрующей поверхности, м<sup>2</sup>.

Скорость осаждения – скорость перемещения частиц в направлении, перпендикулярном осадительной поверхности, м/с.

*Пылеемкость* – количество пыли, удерживаемой в пылеуловителе за промежуток времени между двумя регенерациями, кг.

*Гидравлическое сопротивление* – разность давлений среды  $\Delta p$ , Н/м<sup>2</sup>, на входе и на выходе из пылеуловителя.

*Экономические показатели* – расход энергии и материалов, затраты на установку, стоимость очистки. Эти показатели обычно выражаются в руб./(1000 м<sup>3</sup>/ч).

Рассмотрим краткое описание пылеуловителей.

*Механические инерционные пылеуловители*: циклон, мультициклон, жалюзи. Принцип действия: частицы пыли движутся в потоке с организованным вихревым течением, за счет центробежной силы прижимаются к стенкам циклона и ссыпаются в золоборник. Коэффициент очистки  $\eta = 0.30-0.60$ .

Выражение для скорости осаждения в циклоне  $w_0$ :

$$w_0 = B_d \frac{d_i^2 (\rho_i - \rho_g) w_g^2}{\nu_g \rho_g D}, \quad (7.4)$$

где  $d_i, \rho_i$  – диаметр и плотность частиц пыли;  $\nu_g, \rho_g$  – вязкость и плотность газа;  $w_g$  – окружная скорость потока газа в циклоне;  $D$  – диаметр циклона. Коэффициент  $B_d$  зависит от диаметра частиц.

*Мокрые пылеуловители*: газопромыватель, скруббер, центробежный скруббер. Принцип действия: частицы пыли улавливаются или смываются орошающей водой в золоборник. Коэффициент  $\eta = 0.80-0.95$ .

*Электростатические пылеуловители*: трубчатый вертикальный электрофильтр, пластинчатый горизонтальный электрофильтр. Принцип действия: частицы пыли, проходя через электрическое поле, приобретают отрицательный заряд и переносятся к положительному полюсу (осадительные электроды). После встряхивания последних ссыпаются в золоборник. Коэффициент  $\eta = 0.95-0.98$ .

Выражение для скорости осаждения в электрофильтре:

$$w_0 = B(d_i, s_g) \frac{d_i E^2}{\nu_g \rho_g}, \quad (7.5)$$

где  $d_i$  – диаметр частиц пыли;  $s_g$  – длина свободного пробега молекул в газе;  $E$  – напряженность электрического поля;  $\nu_g, \rho_g$  – динамическая вязкость и плотность газа;

*Фильтрация*: керамический, рукавный (тканевый), волокнистый, тонковолокнистый, мембранный фильтры. Принцип действия: частицы пыли, проходя с дымом через фильтр, осаждаются на поверхности и в порах фильтроматериала и после его регенерации (встряхивание, обратный импульс) ссыпаются в золоборник. Коэффициент  $\eta = 0.98-0.99$ . На рис. 7.5–7.7 приводятся зависимости проскока частиц для тканевых (рукавных) фильтров от скорости потока  $w$ , диаметра частиц  $d$  и размера волокон.

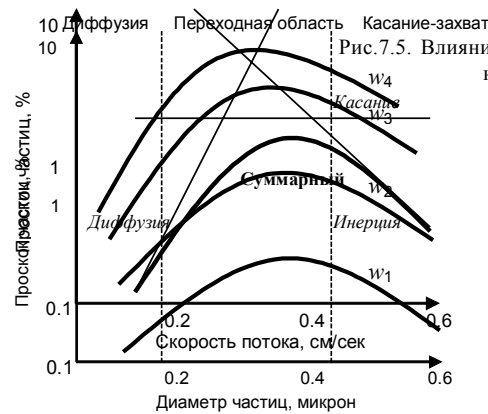


Рис. 7.5. Влияние скорости газопылевого потока на проскок частиц

Рис. 7.6. Влияние размера частиц на величину их проскока

Рис.7.7. Влияние размера волокон на величину проскока частиц

### 7.3. Обращение с зольными отходами

Зольность древесного топлива относительно высокая. Она составляет от 0.5% (твердые лиственные породы) до 2.5% (кустарниковые). Например, для работы котла мощностью 1 МВт необходимо около 550 кг/ч сухой древесины, зольные отходы составят до 13.5 кг/ч. За год при нагрузке 7200 ч количество зольных отходов будет почти 100 т. Большая часть соединений, входящих в состав зол, легко растворяется в воде.

При сжигании древесины, загрязненной радионуклидами, необходимо знать, какая активность содержится в зольных остатках и как категорируются радиоактивные отходы.

Радиоактивными отходами (РАО) являются изделия, материалы, вещества и биологические объекты, содержащие радиоактивные изотопы в количестве, превышающем установленные пределы, и декларируемые как не подлежащие дальнейшему использованию в производстве или исследованиях.

Категорирование радиоактивных отходов:

- твердые (ТРО);
- жидкие (ЖРО).

ЖРО делятся на следующие категории:

- слабоактивные, до 370 кБк/л;
- среднеактивные, от 370 кБк/л до 37 ГБк/л;
- высокоактивные, 37 ГБк/л и выше.

ТРО в зависимости от мощности дозы на расстоянии 10 см от поверхности делятся на три группы:

- I группа, до 0.3 мЗв/ч;
- II группа, от 0.3 мЗв/ч до 10 мЗв/ч;
- III группа, 10 мЗв/ч и выше.

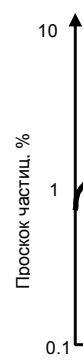
В практике обращения с твердыми отходами используется также классификация МАГАТЭ, в соответствии с которой отходы подразделяются на низкоактивные, среднеактивные, высокоактивные, долгоживущие и короткоживущие.

В основу категоризации отходов чернобыльского происхождения положено содержание в них радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ . В соответствии со СПОД-2000 твердые радиоактивные отходы дезактивации (к которым можно отнести золу) разделяются на следующие основные группы:

- очень низкоактивные, от 0.96 до 9.6 кБк/кг;
- низкоактивные радиоактивные, не выше 96 кБк/кг;
- среднеактивные радиоактивные, выше 96 кБк/кг.

Сбор и удаление радиоактивных зол из топки могут осуществляться тремя способами:

- механическим;
- пневматическим;
- гидравлическим.



В зависимости от категории отходов золы могут направляться на утилизацию в строительстве и сельском хозяйстве, золоотвалы и свалки, упаковку и захоронение, иммобилизацию и захоронение.

Обращение с жидкими и твердыми РАО представляет собой комплекс организационных и технологических мероприятий, включающих их сбор, сортировку, упаковку, временное хранение, кондиционирование (концентрирование, отверждение, прессование, сжигание), длительное хранение и/или захоронение. Процессы по обращению с РАО целесообразно организовывать в пределах площадки, на которой происходит образование значительных количеств РАО.

Сбор и сортировка отходов осуществляются в местах их образования с учетом физических, химических и токсических характеристик и методов последующего обращения. Сортировка первичных жидких и твердых РАО должна обеспечить их разделение по различным группам, характеризующимся равнозначными параметрами, с учетом выбранного способа дальнейшего обезвреживания отходов.

Кондиционирование отходов направлено на повышение экономичности и безопасности обращения с ними за счет минимизации объема, перевода в стабильные формы и упаковки отходов в контейнеры, отвечающие требованиям безопасности при транспортировке, хранении и/или захоронении. Наиболее широко используемыми методами кондиционирования являются компактирование (прессование) и сжигание.

Иммобилизация (стабилизация, отверждение) жидких и сыпучих отходов осуществляется:

- в тару при суперкомпактировании;
- цементную матрицу;
- полимерную матрицу;
- сложную матрицу.

Традиционным способом отверждения радиоактивной золы является цементирование, т. е. создание бетонного монолита, содержащего 25–50% зольных остатков. При высокой удельной активности зольных остатков характеристики бетонного компаунда, в первую очередь прочность на сжатие и гидростойкость, желательнее улучшить специальными приемами (смешение цемента с бентонитовой глиной, фосфогипсом, латексным раствором, некоторыми мономерами и т. п.). Перспективным вариантом считается включение зольных остатков в матрицу из отходов полиэтилена. При этом компаунд обладает приемлемыми физико-механическими свойствами и содержит до 80% золы.

Хранение отходов представляет собой их временное содержание в специально оборудованных местах, обеспечивающих изоляцию от окружающей среды, а также радиационный контроль, наблюдение и обслуживание в целях накопления и передачи отходов для переработки, кондиционирования или на длительное хранение (захоронение). Временное хранение может осуществляться на месте их образования при наличии соответствующего разрешения надзорных органов. Длительное выполняется только специализированными предприятиями по обращению с радиоактивными отходами.

Окончательное захоронение радиоактивных отходов предназначено для изоляции кондиционированных отходов от сферы деятельности человека и окружающей среды в течение всего срока сохранения ими потенциальной опасности без намерения последующего извлечения. Безопасность изоляции отходов при захоронении или длительном хранении достигается использованием системы барьеров на пути возможного распространения радиоактивных и токсичных материалов в окружающую среду.

Для подавляющей части отходов, образующихся в настоящее время на территории Беларуси, срок потенциальной опасности не превышает 300 лет и соответствует сроку действия защитных функций несложных инженерных барьеров. В соответствии с мировой практикой захоронение отвержденных форм отходов производится в приповерхностных пунктах захоронения (ПЗРО), важнейшим условием которого является соответствие требованиям, предъявляемым к характеристикам этих компаундов (определяются экспериментально по нормативно установленным методикам):

- физико-механические и прочностные характеристики;
- скорость выщелачивания радиоизотопов из отходов;
- морозостойкость;
- стойкость к биодеструкции.

Транспортировка в зависимости от агрегатного состояния и мощности дозы ионизирующих излучений организуется соответствующими упаковочными комплектами. Они представляют собой единицы транспортного оборудования, обеспечивающие сохранность перевозимых отходов и радиационную защиту.

Важность процесса безопасного обращения с радиоактивными отходами признана давно, и каждая страна устанавливает соответствующий порядок и требования, регулирующие этот процесс. При этом учитываются основополагающие принципы, рекомендуемые МАГАТЭ:

- защита здоровья человека: обращение с радиоактивными отходами должно обеспечивать приемлемый уровень защиты здоровья человека;
- охрана окружающей среды: обращение с радиоактивными отходами должно обеспечивать приемлемый уровень охраны окружающей среды;
- защита за пределами национальных границ: при обращении с радиоактивными отходами необходимо учитывать возможные последствия за пределами национальных границ;
- защита будущих поколений: предсказуемые последствия для здоровья будущих поколений от обращения с радиоактивными отходами не должны превышать соответствующие уровни последствий, которые считаются приемлемыми в настоящее время;
- нагрузка на будущие поколения: обращение с радиоактивными отходами не должно возлагать чрезмерных обязанностей на будущие поколения;
- национальная правовая структура: обращение с радиоактивными отходами должно осуществляться в рамках соответствующей национальной правовой структуры;

- минимизация образования радиоактивных отходов: образование радиоактивных отходов поддерживается на минимальном практически достижимом уровне;

- взаимозависимость образования радиоактивных отходов и обращения с ними: необходимо учитывать взаимозависимости между всеми стадиями образования радиоактивных отходов и обращения с ними;

- безопасность установок: безопасность установок для обращения с радиоактивными отходами должна быть обеспечена на протяжении всего срока их службы.

13 октября 1999 г. Республика Беларусь подписала Объединенную Конвенцию о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами 1997 г., подготовленную под эгидой МАГАТЭ. В ней устанавливается, что государства-участники будут при осуществлении своей деятельности принимать во внимание вышеуказанные принципы, а также подходы и нормы, содержащиеся в «Международных основных нормах безопасности для защиты от ионизирующих излучений и безопасного обращения с источниками излучения», МАГАТЭ, 1997 (Серия изданий по безопасности, № 115).

Нормативно-правовое обеспечение обращения с РАО осуществляется на основе законов и постановлений правительства общего характера, а также специальными правовыми актами, стандартами, правилами и нормами по ядерной и радиационной безопасности:

- Закон Республики Беларусь «О радиационной безопасности населения»;

- Закон Республики Беларусь «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС»;

- Кодекс Республики Беларусь о недрах;

- Закон Республики Беларусь «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения»;

- Закон Республики Беларусь «Об охране окружающей среды».

Вопросы деятельности в сфере обращения с РАО нашли свое отражение также в Уголовном кодексе Беларуси.

В республике введены в действие новые «Нормы радиационной безопасности НРБ-2000». Согласно этому документу, критерием отнесения отходов к радиоактивным является «радиоактивное загрязнение», определенное как присутствие радиоактивного вещества техногенного происхождения, которое может привести к облучению в индивидуаль-

ной дозе более 10 мкЗв/год или коллективной дозе 1 чел.-Зв/год. Исходя из этих норм в НРБ-2000 приведены значения активностей радионуклидов, ниже которых отходы освобождаются от регулирующего контроля.

Беларусь продолжает использовать правила по радиационной безопасности бывшего СССР:

- Основные санитарные правила ОСП-72/87;

- Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами;

- Сбор, хранение, переработка, и захоронение радиоактивных отходов. Термины и определения (ГОСТ 17606-81);

- Контроль радиационный при захоронении радиоактивных отходов (ГОСТ 12.1.048-85);

- Захоронение радиоактивных отходов агропромышленного производства (ГОСТ 22.8.02-97).

Обращение с радиоактивными отходами чернобыльского происхождения регламентируется «Временными санитарными правилами обращения с отходами дезактивации, образующимися в результате работ по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС» (СПООД 2000).

Регулирование обращения с радиоактивными отходами основано на принципе разделения ответственности среди четырех республиканских органов государственного управления в соответствии с утвержденными Правительством положениями об их функциях и полномочиях: Комитет по надзору за безопасным ведением работ в промышленности и атомной энергетике при МЧС (Проматомнадзор), Министерство здравоохранения Республики Беларусь, Комитет по проблемам последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС, а также Национальная Комиссия по радиационной защите при Совете Министров Республики Беларусь.

#### 7.4. Радиационный риск при сжигании загрязненного топлива

Предложенные технологии утилизации древесных отходов, содержащих радионуклиды, требуют всесторонней оценки доз и риска для персонала и населения. Такая оценка включает следующие элементы.

- *Анализ базового риска.* Исследование помогает определить риск, связанный с существующей ситуацией. Оцененный риск должен служить базой для сравнения потенциального воздействия на здоровье различных предложенных вариантов сжигания.

- *Оценка воздействия на здоровье эксплуатационного персонала.* Она должна определить потенциальную радиологическую дозовую на-

грузку на персонал – на операторов котельных, включая лиц, принимающих участие в операциях обращения с зольными остатками. При оценке должны быть определены источники эмиссии вредных веществ и ионизирующих излучений, рациональное размещение и физическая защита обслуживающего персонала.

- *Оценка окружающей среды и здоровья населения с учетом эмиссии.* При этом должен быть оценен радиологический риск потенциального облучения населения от эмиссии в атмосферу и осадения зольных остатков.

- *Принципы контроля эмиссии.* Они должны обеспечить получение количественных соотношений между технологиями контроля эмиссии и пользой для здоровья. Эти соотношения будут способствовать выбору технологий для использования в проектах котельного оборудования.

- *Реабилитационные ограничения.* Следует определить требования для ограничения концентрации радионуклидов в растениях и в грунте так, чтобы критерии радиационной защиты населения не превышались в процессе активного сценария (заготовки и сжигания биотоплива).

В дополнение к трем сценариям облучения, приведенным в подразделе 4.3, следует назвать наиболее вероятные пути облучения при реализации мер по реабилитации лесных ресурсов, которые представляют собой следующие сценарии.

Сценарий 4: облучение при дезактивационных работах в лесу:

- внешнее облучение от деревьев и грунта;
- ингаляция мелких опилок и аэрозольных частиц грунта.

Сценарий 5: облучение при сжигании биомассы в котлах:

- прямое внешнее облучение от оборудования;
- ингаляция от дымовой трубы.

Сценарий 6: облучение при обращении с зольными остатками:

- внешнее облучение при сборе, упаковке и транспортировке;
- внешнее облучение от предприятия захоронения.

Радиационная защита может быть легко обеспечена в пределах этих сценариев, снижая таким образом облучение до приемлемого уровня.

Доза от внешнего облучения определяется мощностью экспозиционной дозы  $D$ , мкР/ч или мкЗв/ч, и временем нахождения рецептора на загрязненной местности. При известных значениях удельной активности источников излучения и их распределения в среде величина мощности дозы рассчитывается методом Монте-Карло с учетом поглощения, замедления и вторичного излучения разными элементами среды (на-

пример, деревья и дома экранируют излучения от почвы). В условиях заглибления радионуклидов в почву метод учитывает распределение их по глубине. Для гамма-источников эффективную дозу внешнего облучения  $H_E^{внеш}$  можно рассчитать по формуле

$$H_E^{внеш} = 365 \sum (DQ w_i) t, \quad (7.6)$$

где  $Q$  – коэффициент качества ионизирующего излучения (см. подраздел 3.2);  $w_i$  – коэффициент риска для разных органов организма (см. подраздел 3.2);  $t$  – суточная доля пребывания в условиях ионизирующего облучения.

Доза внутреннего облучения  $H_E^{внут}$  определяется удельной активностью потребляемых продуктов питания и среднесуточным потреблением данного продукта:

$$H_E^{внут} = 365 \sum \sum (F_i^n A_{ik} G_k), \quad (7.7)$$

где  $F_i^n$  – дозовый эквивалент перорального поступления  $i$ -го радионуклида;  $A_{ik}$  – удельная активность  $i$ -го радионуклида в  $k$ -м продукте питания;  $G_k$  – среднесуточное потребление  $k$ -го продукта.

Доза внутреннего облучения за счет ингаляции аэрозолей, содержащих радионуклиды,  $H_E^{инг}$  определяется дисперсностью пылевых фракций, их активностью и темпом аспирации:

$$H_E^{инг} = 365 V \sum \sum (F_i^n A_{ik} r_k) t, \quad (7.8)$$

где  $V$  – среднесуточный объем вдыхаемого воздуха;  $F_i^n$  – дозовый эквивалент ингаляционного поступления  $i$ -го радионуклида;  $A_{ik}$  – удельная активность  $i$ -го радионуклида в  $k$ -й пылевой фракции;  $r_k$  – концентрация  $k$ -й пылевой фракции в единице объема воздуха;  $t$  – суточная доля пребывания в условиях ионизирующего облучения.

Расчет и анализ дозовых нагрузок на персонал лесхозов и население для леса с запасом активности в почве 15 Ки/км<sup>2</sup>, содержащего радиоактивную древесину с концентрацией <sup>137</sup>Cs около 0.40 мкКи/кг, показывает следующие значения эффективной годовой индивидуальной дозы, мЗв/год:

- при дезактивации лесной подстилки:
  - внешняя доза 0.21–0.83;
  - ингаляционная доза 0.002–0.008;
- заготовке биотоплива:
  - внешняя доза 0.12–0.65;
  - ингаляционная доза 0.0008;

- перевозке биотоплива:
  - внешняя доза 0.00004;
  - ингаляционная доза 0;
- перевозке пакетированной золы:
  - внешняя доза 0.0046;
  - ингаляционная доза 0;
- хранении пакетированной золы в приповерхностных могильниках:
  - внешняя доза 3.22;
  - ингаляционная доза 0.

Ежегодные эффективные индивидуальные дозы при обслуживании котлоагрегата (доля времени пребывания 12.5%, активность древесины 0.39 мКи/кг) представлены в табл. 7.6.

Таблица 7.6

**Эффективные внешние дозы, воздействующие на оператора котельной**

| Рабочее место оператора         | Расстояние от стенки, м | Доза, мЗв/год |
|---------------------------------|-------------------------|---------------|
| Между котлом и экономайзером    | 0.5                     | 5.18          |
| Между питателем и топкой        | 0.5                     | 1.06          |
|                                 | 5.0                     | 0.44          |
| Около золоборника подовой золы  | 0.5                     | 7.00          |
|                                 | 5.0                     | 1.31          |
| Около золоборника золы уноса    | 0.5                     | 16.71         |
|                                 | 5.0                     | 2.31          |
| Пакетирование золы (без защиты) | 0.1                     | 81.0          |
|                                 | 1.0                     | 32.4          |

Ежегодные эффективные дозы для населения в окрестностях котлоагрегата оценивались на основе расчетов эмиссии газопылевого потока из трубы котельной. Эмиссия аэрозолей определяется из системы уравнений сохранения для отдельных фракций, которые решаются численно вместе с уравнениями, описывающими процессы межфазового переноса и динамику межфазовых поверхностей. Перенос аэрозолей в атмосфере и их гравитационное осаждение определяются из уравнения конвективно-диффузионного переноса.

Для расчетов использовались следующие исходные данные:

- высота трубы, м 45.7;
- внутренний диаметр трубы, м 2.3;
- расход потока газа, м<sup>3</sup>/с 76.0;
- температура потока, °С 170.0;
- скорость частиц, м/с 18.5;

- концентрация частиц, г/м<sup>3</sup> 1.0 (вариант А);  
0.002 (вариант В);
- плотность частиц, г/см<sup>3</sup> 2.25;
- среднемассовый диаметр, мкм 1.2;
- скорость ветра, м/с 2.0.

Стационарный расчетный режим устанавливался примерно через 0.5 ч после начала выброса. Концентрация аэрозолей в приземном воздухе и осажденных пылевых частиц на поверхности почвы была максимальной при расстоянии от трубы котельной 500–700 м. Расчеты показали, что ежегодное увеличение внешней индивидуальной эффективной дозы облучения населения, проживающего в области максимального осаждения, составило 0.3 мЗв/год.

Максимальная концентрация в приземном слое воздуха составляет 4.7–5.5% начальной концентрации в устье трубы в зависимости от размера частиц. При отсутствии газоочистки концентрация в этом месте будет 36.45 Бк/м<sup>3</sup> (вариант А). При скорости дыхания 0.267 л/с и максимальном дозовом коэффициенте 0.1 мкЗв/Бк (МКРЗ-72) ингаляционная доза составляет 0.00 097 мкЗв/с. Если время пребывания критической группы населения (например, детей) вне помещения 10% (876 ч в год), максимальная индивидуальная эффективная доза составит 3.06 мЗв/год. Если используется фильтр с соответствующей эффективностью (вариант В), ингаляционная доза уменьшается до 0.006 мЗв/год.

## 8. БИОЭНЕРГЕТИКА В СТРУКТУРЕ ЭНЕРГЕТИКИ

### 8.1. План развития биоэнергетики

В Беларуси, где собственные ресурсы ископаемых энергоносителей не превышают 15% от потребности (рис. 8.1), биоэнергетика начинает интенсивно развиваться в условиях необходимости достичь определенного уровня энергетической безопасности. Уже сейчас в стране работает более 1300 малых и средних котельных на древесном топливе, обеспечивающих общую тепловую нагрузку около 500 МВт за счет сжигания биомассы.

Миллион т у. т.

Рис. 8.1. Изменение спроса на энергоносители и доля импорта

Развитие этой отрасли предопределено также следующими обстоятельствами:

- политикой импортозамещения, когда часть долга и текущих оплат в твердой валюте за импортируемые энергоресурсы может быть снижена за счет производства и использования местных видов топлива;
- необходимостью диверсификации (или разнообразия) поставок разного типа топлива из разных источников;
- необходимостью реконструкции (или замены) устаревших котлоагрегатов;
- заинтересованностью лесного хозяйства в крупном и надежном потенциальном потребителе большого объема отходов и неликвидной древесины, которые в настоящее время не находят сбыта, что не позволяет интенсифицировать лесную промышленность в условиях сохранения биоразнообразия и здоровья лесов;

- социальной выгодой, когда в рамках создания инфраструктуры новой отрасли будут созданы новые рабочие места и производства;
- необходимостью эффективной реабилитации территорий, пострадавших от Чернобыльской катастрофы, при обеспечении безопасной и контролируемой конверсии загрязненных ресурсов для производства энергии и тепла.

Анализ состояния генерирующих мощностей указывает на неуклонный рост дефицита в связи с ростом экономики и выводом из строя устаревших энергоблоков (табл. 8.1, рис. 8.2):

Таблица 8.1

Состояния генерирующих мощностей, ГВт-эл.

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| Установленные мощности (2002 г.) | Около 7.3 |
| Установленные мощности (2010 г.) | 4.8       |
| Реальная нагрузка (2002 г.)      | Около 5.5 |
| Прогноз потребности (2010 г.)    | 9.8       |
| Ожидаемый дефицит мощностей      | До 5      |

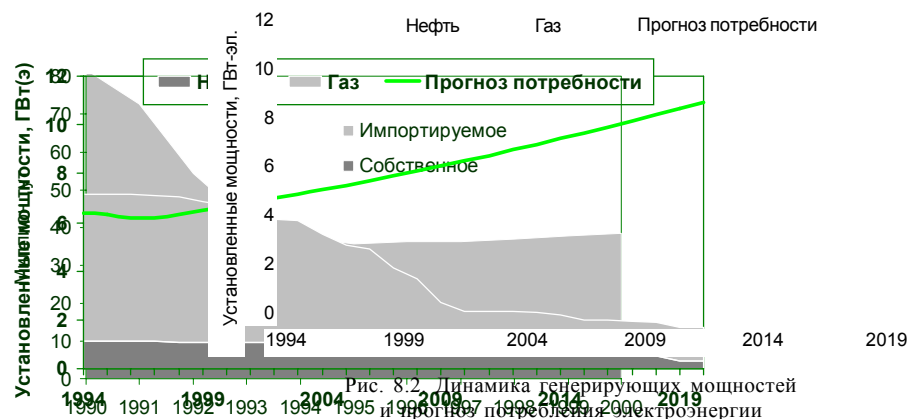


Рис. 8.2. Динамика генерирующих мощностей и потребности в электроэнергии

Располагаемый потенциал биоэнергоресурсов в настоящее время составляет около 1920 тыс. т у. т. в год. К 2015 г. при планируемых лесозаготовках этот потенциал возрастет до 2650 тыс. т у. т. в год.

Утилизация отходов злаковых культур и культивация быстрорастущих древесных пород на неудобьях и бросовых землях может дать дополнительно около 800 тыс. т у. т. в год.



Структура поставок древесного топлива зависит от мощности лесохозяйственных предприятий и объемов планируемых рубок древесины. Доля всех видов рубок в странах рационального лесопользования составляет около 60–70% от текущего прироста. В Беларуси она не превышает 40%, причем запас древесины на корню в 80 предприятиях лесохозяйственного сектора составляет более 1.3 млрд. м<sup>3</sup>, ежегодный текущий прирост 32–37 млн. м<sup>3</sup>.

Лесхозами производится на продажу около 11.9–12.7 млн. м<sup>3</sup>/год ликвидной древесины. При всех видах рубок образуется около 4.5 млн. м<sup>3</sup>/год отходов, что является потенциальным топливом для биоэнергетики. Этот потенциал используется лишь на четверть.

Планируется, что к 2015 г. производство товарной древесины увеличится до 14.8–18.8 млн. м<sup>3</sup>/год, при этом объемы отходов также возрастут до 5.4 млн. м<sup>3</sup>/год.

Древесное сырье, поставляемое на предприятия деревообработки в объеме 6.5 млн. м<sup>3</sup>/год, перерабатывается в ликвидную продукцию, при этом деревоперерабатывающие предприятия (около 2000 заводов) генерируют более 1.5 млн. м<sup>3</sup>/год отходов. Большинство из них может быть направлено на производство энергии в местных котельных.

С учетом потенциального вклада быстрорастущих «энергетических» посадок на 100–200 тыс. га бросовых земель и растительных отходов сельхозпроизводства потенциал топлива для биоэнергетики может составить 10–15 млн. м<sup>3</sup>/год (рис. 8.3).

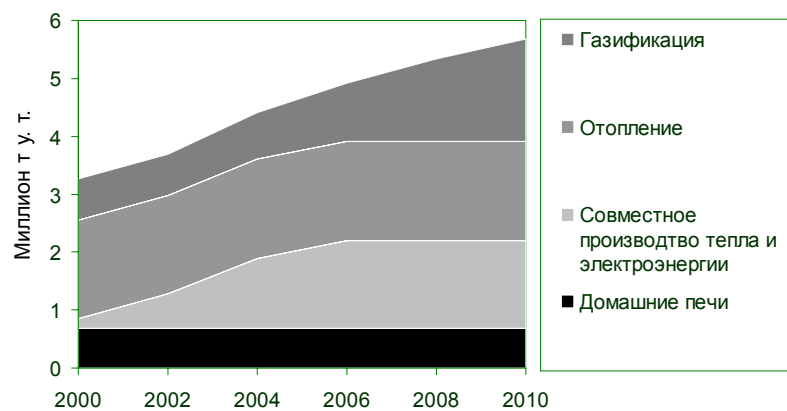


Рис. 8.3. Прогноз потребления биомассы в качестве топливных ресурсов

Таким образом, согласно прогнозным расчетам, биоэнергетика в ближайшее десятилетие может покрыть около 10% потребности страны в топливно-энергетических ресурсах (рис. 8.4). В то же время существует целый ряд барьеров, помимо радиоактивности биомассы, которые необходимо преодолеть для ее развития. Прежде всего, это отсутствие развитой инфраструктуры (производительной техники для сбора, транспортировки, переработки, хранения топлива на основе биомассы растений и деревьев). Вторым препятствием является неразвитость котлостроения. Производимые в стране котлоагрегаты, за небольшим исключением, имеют устаревшую конструкцию и низкую эффективность.



Рис. 8.4. Снижение потребления импортируемого топлива за счет ресурсов биомассы (расчет)

Исходя из изложенного выше, стратегия развития биоэнергетики должна состоять из трех этапов:

- краткосрочная перспектива (в сумме 10–20 МВт):
  - замещение топлива на старых котельных вблизи ресурсов биомассы;
  - малые котлоагрегаты при деревообработке;
  - постепенное развитие инфраструктуры заготовок и поставок топлива из биомассы;
- среднесрочная перспектива (в сумме 80–120 МВт):
  - замещение топлива на устаревших котлоагрегатах энергоблоков;
- долгосрочная перспектива (в сумме до 400 МВт):
  - новые котлоагрегаты малой и средней мощности на биомассе;

– новые высокоэффективные газотурбинные, парогазовые и газопаровые электрогенерирующие установки малой и средней мощности на биотопливе и смешанных видах топлива.

Такая стратегия обеспечит:

- ежегодную экономию до 3.5 млн. т у. т. импортируемого топлива за счет использования местного;
- постепенное создание необходимой инфраструктуры новой отрасли;
- расширение сроков эксплуатации блока за счет замены устаревшего оборудования и повышение эффективности преобразования топлива;
- большую привлекательность для инвестиций за счет короткого времени окупаемости и высокой рентабельности.

## 8.2. Ретрофит существующих котлоагрегатов

Как было отмечено в предыдущем подразделе, ближайшей перспективой развития биоэнергетики является замещение (ретрофит) топлива на устаревших котельных и энергоблоках с одновременным повышением их эффективности за счет замены или модернизации. Можно сформулировать следующие критерии выбора котлоагрегатов для замещения.

- Для ретрофита выбирается котлоагрегат тепловой мощностью 50–150 МВт. Меньшая мощность является малоэффективной с точки зрения рентабельности в структуре станции. Мощность выше 150 МВт может потребовать больших капитальных затрат и такого объема топлива, который трудно обеспечить в пределах экономически обоснованных плеч перевозок.

- Оптимальным является размещение котлоагрегата на станции, где сохранилась инфраструктура, связанная со сжиганием твердых видов топлива.

- Потенциальное место размещения должно быть вблизи деревообрабатывающего предприятия или в зоне промышленной заготовки древесины с радиусом транспортных плеч не более 60 км.

- Природный газ или мазут должны быть доступны в качестве резервного топлива.

При проведении ретрофита в зависимости от конструкции котлоагрегата и плана котельной можно предложить несколько технологических схем:

А) реконструкция топочного пространства. Нижняя часть топки ниже газовых горелок демонтируется, и на ее место устанавливается топка с подвижной колосниковой решеткой;

В) отдельный предтопок. Топочное пространство соединяется газодом с отдельно располагаемым предтопком на древесной щепе;

С) замена всего котлоагрегата на котлоагрегат с предтопком на древесной щепе с размещением выше предтопка газовых горелок для совместного сжигания;

Д) замена всего котлоагрегата на котлоагрегат на древесной щепе с размещением выше предтопка газовых горелок для резервного топлива.

В трех первых случаях (А, В и С) реализуется совместное сжигание ископаемого топлива и древесины, что позволяет либо наращивать, либо сохранять мощности. В последнем случае Д ископаемое топливо используется как резервное и мощность котлоагрегата определяется наличием ресурсов биотоплива. Во всех случаях используется инфраструктура котельной (станции), работавшая ранее в схеме сжигания твердых видов топлива.

Концептуальные принципы ретрофита, учитывая радиоактивное загрязнение древесного топлива, должны ориентироваться на относительно простую, но известную технологию, надежность систем и высокие стандарты качества, на проектные требования, легко адаптируемые к местным требованиям и правилам. В частности, необходимо следовать некоторым рекомендациям, изложенным в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Основные элементы проекта котлоагрегата

| Параметр           | Описание   | Комментарий  |
|--------------------|--|--|
| 1                  | 2  | 3  |
| Конструкция топки  | Механическая топка с колосниковой подвижной решеткой                                       | Подвижная (или вибрирующая) решетка. Экранная конструкция водяного охлаждения стенки |
| Конфигурация       | Опорная конструкция  | Геометрические параметры должны вписываться в имеющееся пространство котельного зала |
| Давление в топке   | Отрицательное, около –300 Па   | Чтобы исключить выход золы уноса за пределы котла                                    |
| Подача топлива     | Автоматическая   | Для обеспечения пылеподавления и минимизации присутствия обслуживающего персонала    |
| Подготовка топлива | Рубильная машина, оборудованный оперативный и долговременный склады                        | Простые системы, эффективность и минимальное обслуживание                            |
| Хранение топлива   | Геометрические параметры складов и бункеров должны соответствовать имеющемуся пространству | По возможности используется прежняя инфраструктура                                   |

Окончание табл. 8.2

| 1  | 2  | 3  |
|--|--|--|
| Очистка дымовых газов  | Мультициклон. Рукавный фильтр                                  | Для рукавного фильтра требуются наименее пожароопасные материалы из доступных  |
| Содержание пыли на выходе из трубы                                 | 1–2 мг/нм <sup>3</sup>   | Чтобы гарантировать эмиссию радионуклидов не выше установленных норм   |
| Контроль других загрязнителей (NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> ) | Ввод NH <sub>3</sub> или любой другой эффективной системы      | Эмиссия не должна быть выше, чем до реконструкции  |
| Удаление подовой золы  | Предпочтительно влажное  | Золосборник частично погружен в шлаковую яму, заполненную водой. Наклонный скребковый транспортер. Упаковка и хранение в пластиковых пакетах. Вариантом является оборотный контейнер |
| Удаление золы уноса  | Предпочтительно сухое  | Шнековый воздушно-герметичный транспортер. Герметичный бункер золы. Упаковка и хранение в пластиковых пакетах. Вариантом является оборотный контейнер                                |
| Здание и вентиляция  | Существующие в настоящее время                                 | Отдельные помещения для упаковки золы со специальными санитарными требованиями, спецвентиляцией и ограниченным доступом. Контрольно-пропускные дозиметрические пункты                |
| Полнота конверсии углерода   | Система возврата золы уноса в топку                            | Может привести к увеличению эмиссии радиоцезия, однако минимизирует объем отходов, требующих переработки   |
| Золоотвалы и пункты захоронения золы                               | Предпочтительно вблизи промплощадки (см. следующие подразделы) | Зольные остатки могут являться низкоактивными отходами и требовать захоронения на огражденных и оборудованных знаками простых золоотвалах при относительно минимальном контроле      |

Предпочтительно водяное охлаждение решетки, чтобы исключить плавление шлака и размягчение золы, приводящее к более значительной эмиссии радионуклидов и сложностям в очистке топочного пространства. Поэтому максимальная температура в топке не должна превышать

1000–1100°C. Вообще говоря, температура сгорания должна контролироваться для ограничения налипания золы на стенках отражателя и трубах.

Решетка любого типа (вибрирующая или подвижная) постепенно перемещает горящее топливо к нижнему бункеру-сборнику золы у задней стенки топки. Скорость перемещения регулируется автоматически. В случае вибрирующей решетки движение топлива обеспечивается слегка наклонным положением рамки решетки. Конструкция последней должна обеспечивать ограниченное обслуживание. Части, подверженные износу, должны быть легко заменяемы без проникновения внутрь загрязненной топочной камеры.

Температура в камере сгорания регулируется скоростью подачи топлива и воздуха. В камере сгорания и в испарителе используются мембранные (экранные) охлаждаемые водой газонепроницаемые стенные панели.

### 8.3. Методы прогнозных экономических оценок

Разработка прогноза потребления энергетических ресурсов требует достаточно подробной информации об энергетическом секторе экономики. Необходимые данные могут быть классифицированы следующим образом:

- структура потребления первичных энергетических ресурсов по секторам экономики;
- структура потребления тепловой и электрической энергии по секторам и регионам;
- технико-экономические характеристики энергетического оборудования;
- информация о наработке паркового ресурса энергетического оборудования.

В настоящее время существуют различные методы и подходы к прогнозированию потребности в энергетических ресурсах. Эти методы могут быть классифицированы следующим образом:

- эволюционные модели прогнозирования;
- эконометрические модели;
- модели конечного потребления энергии.

*Эволюционные модели:*

- представляют собой рекуррентные зависимости между потребностью в энергетических ресурсах в различные моменты времени;
- другие факторы учитываются в виде параметров;
- время является единственной независимой переменной;

- необходимость в статистической информации минимальна;
- надежность результатов очень высока при выполнении краткосрочных прогнозов до 5 лет.

Фактически метод сводится к построению линий тренда для каждого конкретного вида энергетического ресурса, в которых макроэкономические характеристики (ВВП, численность населения и т. д.) являются параметрами:

(8.1)

где  $E_{ij}^t$  – потребность в  $i$ -м энергетическом ресурсе в  $j$ -м секторе экономики в предыдущий период времени;  $\alpha_j$  – доля в валовом внутреннем продукте  $j$ -го сектора экономики в предыдущий период времени;  $N$  – численность населения;  $\beta_j$  – другие параметры.

*Эконометрические модели:*

- формализуют явные причинные зависимости между зависимой переменной (потребление энергетических ресурсов) и другими экономическими, технологическими или демографическими переменными;
- прогнозируют экономическое развитие региона на среднесрочную и долгосрочную перспективу;
- включают оптимизационную модель натурально-стоимостного межотраслевого баланса.

Модель натурально-стоимостного межотраслевого баланса – это сводная структурная модель экономики региона, включающая:

- обобщенные стоимостные показатели развития народного хозяйства;
- совокупный общественный продукт;
- национальный доход и его важнейшие элементы – фонд потребления и фонд накопления капвложений;
- внешнеэкономические связи;
- межотраслевые пропорции;
- процессы производства и распределения важнейших продуктов в натуральном выражении.

Целевая функция оптимизации может включать:

- максимизацию валового внутреннего продукта региона в условиях заданной системы балансовых ограничений;
- минимизацию использования энергоресурсов.

Основными уравнениями модели натурально-стоимостного баланса являются уравнения балансов производства и распределения продукции в натуральном выражении:

(8.2)

где  $x_m^t$  – объем производства продукта  $m$  в году  $t$ ;  $x_l^t$  – объем производства продукта  $l$  в году  $t$ ;  $Y^t$  – объем производства валовой продукции  $j$ -й отрасли в стоимостном выражении в году  $t$ ;  $F_m^t$  – рыночные фонды продукта  $m$  в году  $t$ ;  $K^t$  – общий объем капвложений в году  $t$ ;  $C_m^t$  – объем потребления в году  $t$ ;  $E_m^t$  – объем вывоза продукта  $m$  из региона в году  $t$ ;  $I_m^t$  – объем ввоза продукта  $m$  из соседних регионов в году  $t$ ;  $X_m^t$  – объем экспорта продукта  $m$  в страны дальнего зарубежья в году  $t$ ;  $Z_m^t$  – объем импорта продукта  $m$  из стран дальнего зарубежья в году  $t$ .

Экзогенные параметры (коэффициенты) расхода:  $\alpha_m$  – продукта  $m$  на единицу продукта  $l$  в году  $t$ ;  $\beta_m$  – продукта  $m$  на единицу валовой продукции  $j$ -й отрасли в году  $t$ ;  $\gamma_m$  – продукта  $m$  на единицу капвложений в году  $t$ ;  $\delta_m$  – продукта  $m$  на единицу фонда потребления в году  $t$ .

Экономический смысл уравнения состоит в том, что объем производства продукции в натуральном выражении в перспективном периоде должен быть достаточным для удовлетворения определенного уровня производственного потребления, а также объема конечного использования данного вида продукции. Результатом расчетов по оптимизационной натурально-стоимостной межотраслевой модели является прогноз взаимно сбалансированной системы показателей:

- объемы валового внутреннего продукта;
- объемы фонда потребления и фонда накопления;
- объемы капвложений;
- объемы производства продукции по отраслям и важнейшим видам продукции в натуральном выражении;
- потребность народного хозяйства в важнейших видах материальных ресурсов (в том числе энергоресурсов) по направлениям их использования;
- объемы внешнеторговых поставок между странами.

*Модели конечного потребления энергии:*

- дают детальное описание того, как используются энергетические ресурсы;
- прогнозируют потребности в ресурсах для разного варианта конечного потребления;
- прогнозируют изменения потребности в услугах, которые требуют использования энергии.

При моделировании поведение потребителя определяется ценовыми сигналами.

Приложение этой модели к биоэнергетике позволяет провести анализ использования древесных отходов в конечном потреблении (в системах генерации тепла и электроэнергии) наравне с другими топливными ресурсами и оптимизировать энергопроизводство, преобразование, распределение и использование потоков энергии и топлива.

Для моделирования потоков энергии через связи в сети энергии и цены используются два уравнения. Уравнение количества представляет собой трансформацию потока входной энергии в энергию или продукцию на выходе (обслуживание, связанное с энергопотреблением). Уравнение цены представляет собой величины, добавляемые к входной цене вследствие проведения процесса.

Уравнение количества может быть представлено в виде

$$(8.3)$$

где  $Q_2$  – поток энергии на выходе;  $Q_1$  – поток энергии на входе,  $K_e$  – эффективный коэффициент трансформации.

Основное предположение при разработке уравнения цены состоит в том, что ежегодный доход, полученный на выходе, равняется годовой стоимости входной энергии и процесса. Уравнением цены, связывающим ежегодный доход и стоимость, является

$$Q_2 P_2 = Q_1 P_1 + O\&M Q_2 + P_K K_A(i, n), \quad (8.4)$$

где  $P_2$  – цена потока энергии на выходе;  $P_1$  – цена потока энергии на входе; O&M – стоимость эксплуатации и обслуживания, за исключением стоимости входной энергии;  $P_K$  – капитальная составляющая стоимости предприятия или процесса;  $K_A$  – амортизационный коэффициент капитальной стоимости  $n$ -го процесса при  $i$ -й годовой норме.

Коэффициент амортизации капитальной составляющей стоимости  $K_A(i, n)$  для процесса при фиксированном количестве дискретных временных интервалов вычисляется по следующему стандартному соотношению:

$$K_A(i, n) = \frac{i(1+i)^n}{[(1+i)^n - 1]}. \quad (8.5)$$

При моделировании решения процесс в узле имеет одну или большее количество входных и выходных связей. При нахождении узлов вы-

бирается количество топлива, которое будет поставлено от альтернативных источников (входные связи узлов) из различных пунктов. Энергия разделяется для удовлетворения потребностей по выходным связям узла. Уравнения цены и количества связаны с узлами. Последние приравнивают поток энергии на выходных связях узла и поток энергии на входных связях, таким образом поток энергии в узле сохраняется. Уравнение цены связывает цены топлива на входных и выходных связях узла. Кроме того, несколько других уравнений показывают долю топлива, полученного по входным связям узлов. Доли основаны на относительной стоимости топлива от альтернативных источников, предельной мощности источников поставки и правительственной политике.

Следует отметить, что одна из особенностей алгоритма нахождения узла состоит в том, что энергетические требования могут быть согласованы с выбором топлива из нескольких источников поставки одновременно скорее, чем из единственного источника, как в случае, когда выбор топлива основан на минимальной стоимости. Однако параметры нахождения узла также могут быть определены, таким образом топливо выбирается только из наиболее дешевого источника. Решения узлов помещаются в сеть, чтобы показать пункт, который выбирается для поставки топлива из альтернативных источников.

Доля энергии в узле, вообще говоря, является функцией относительной цены на связи. Более высокая цена на входной связи приводит к меньшей доле энергии на выходной связи. Доля для входной связи определяется формулой

$$(8.6)$$

где  $P_i$  – цена по входной связи  $i$ ;  $r$  – параметр чувствительности цены;  $P_j$  – цена по выходной связи  $j$ ;  $n$  – множество входных связей в узле.

#### 8.4. Результаты экономических оценок

Из шести областей Беларуси три – Гомельская, Минская и Витебская – были выбраны при анализе существующих энергетических котлов с точки зрения замены на агрегаты на биомассе. Было идентифицировано четыре энергоблока в качестве кандидатов на размещение первого демонстрационного котлоагрегата на биомассе:

Светлогорская электростанция, БелГРЭС, Жодинская и Полоцкая электростанции.

*Светлогорская ТЭЦ.* До последней реконструкции в состав первой очереди входили пять котлов с параметрами пара 250 т/ч, 535°C, 90 бар. В состав второй очереди – четыре котла с параметрами пара 210 т/ч, 545°C, 130 бар. Каждая очередь работает на общий паропровод, питая четыре (первая очередь) и две турбины (вторая очередь) общей мощностью 260 МВт-эл. Котлоагрегаты находились в эксплуатации в среднем более 40 лет. Одним из вариантов техперевооружения первой очереди предусматривается размещение двух парогазовых установок по сбросной схеме с одновременной переделкой в НППГ двух котлов ПК-14 и демонтаж одного котла ПК-14 для размещения газовых турбин. Один из двух остающихся котлоагрегатов можно рекомендовать на реконструкцию/замену под демонстрационный котлоагрегат на древесной массе с параметрами пара 110 т/ч, 535°C, 90 бар. Для обеспечения этих параметров котлоагрегат с эффективностью 90% должен потреблять около 220 тыс. т древесного топлива в год (время эксплуатации 7500 ч в год). В зависимости от расстояния до станции доступные годовые поставки топлива от всех источников (топливная древесина, лесосечные отходы, отходы деревообработки) распределяются следующим образом: до 20 км – 73 600 т у. т., до 40 км – 98 900 т у. т., до 60 км – 126 000 т у. т.

*БелГРЭС.* Ранее пять котлоагрегатов станции, сжигающие торф, работали на три турбины общей мощностью 35 МВт-эл. В настоящее время станция располагает двумя действующими и одним резервным котлоагрегатами производительностью 75 т перегретого пара (33.6 бар, 435°C) каждый и двумя противодавленческими турбинами общей мощностью 16.9 МВт-эл. Станция работает на природном газе (резервное топливо – мазут). Хорошо сохранилась прежняя инфраструктура для твердых видов топлива. На территории станции в настоящее время располагается также деревообрабатывающий завод производительностью около 30 000 м<sup>3</sup> обработанной древесины в год и с годовым выходом древесных отходов около 2500 т у. т. Потенциал других доступных источников биомассы (топливная древесина, лесосечные отходы, отходы деревообработки) в зависимости от расстояния до станции распределяется следующим образом: до 20 км – 17 120 т у. т., до 40 км – 39 960 т у. т., до 60 км – 54 030 т у. т. Таким образом, для одного котлоагрегата этой станции частичное замещение ископаемого топлива на древесное может быть обеспечено располагаемыми ресурсами в случае реализации

совместного сжигания, например, по варианту В (с.115) с предтопком мощностью 30 МВт-тепл. Вариант D (с. 115) с полной заменой котлоагрегата может быть также реализован для меньшей производительности (около 50 т пара, т. е. в 1.5 раза меньше, чем производительность каждого из установленных котлов).

*Жодинская ТЭЦ.* Первая очередь станции была введена в 1951 г., и в качестве топлива использовались торф и уголь. В настоящее время станция имеет два котлоагрегата теплопроизводительностью 40 и 105 МВт-тепл., пар от которых срабатывает на двух турбинах мощностью по 27 МВт-эл. На территории сохранились некоторые остатки инфраструктуры топливоподачи и золоудаления. Имеется территория для склада топлива. Потенциал доступных источников биомассы (топливная древесина, лесосечные отходы, отходы деревообработки) достаточно велик. В зависимости от расстояния до станции он распределяется следующим образом: до 20 км – 66 770 т у. т., до 40 км – 105 400 т у. т., до 60 км – 142 000 т у. т. Располагаемого объема топлива, таким образом, достаточно для котлоагрегата с производительностью по пару до 125 т/ч. При замещении ископаемого топлива могут быть реализованы любые варианты без изменения мощности действующего котлоагрегата в 40 МВт-тепл. или вариант с совместным сжиганием (предтопок на 80 МВт-тепл.) для действующего котлоагрегата в 105 МВт-тепл. Возможен также вариант с заменой обоих старых котлоагрегатов на один мощностью 80 МВт-тепл.

*Полоцкая ТЭЦ.* Полоцкая станция относится к разряду малых ТЭЦ, и ее установленную мощность представляют два блока по 5 МВт-эл. с двумя котлоагрегатами соответствующей производительности (по 25 т/ч пара). Станция никогда не работала на твердых видах топлива, поэтому здесь отсутствует соответствующая инфраструктура. Стратегия замещения ископаемого топлива на древесное для малых станций, однако, может иметь свои преимущества, например при замене устаревших котлов малой производительности на один котел, утилизирующий древесную биомассу. В таком случае может быть достаточно пространства для размещения систем топливоподачи и золоудаления. Для этой конкретной станции потенциал доступных источников биомассы (топливная древесина, лесосечные отходы, отходы деревообработки) невелик, но достаточен для реализации выбранной стратегии. В зависимости от расстояния до станции он распределяется следующим образом: до 20 км – 18 690 т у. т., до 40 км – 45 380 т у. т., до 60 км –

65 960 т у. т. Располагаемого объема топлива, таким образом, достаточно для котлоагрегата с паропроизводительностью до 60 т/ч. Может быть реализовано полное замещение топлива по любому варианту без изменения общей мощности действующих котлоагрегатов. Возможна также замена двух котлоагрегатов на один мощностью 40 МВт-тепл., работающий на биомассе.

Для всех рассмотренных станций цены на древесное топливо выбирались в зависимости от расстояния до станции (табл. 8.3). Дополнительная стоимость оценивалась, чтобы учесть радиологические условия для персонала, занятого подготовкой и доставкой топлива. Учитывались также затраты на обращение с низкоактивными зольными отходами. Отнесение данных затрат к стоимости древесного топлива приводит к заметному его удорожанию, повышая стоимость 1 т у. т. на 4–7 долларов США.

Таблица 8.3

Цена франко-склад топливной древесины, долларов США/т у. т.

| Структура цены         | Светлогорская ТЭЦ | БелГРЭС | Жодинская ТЭЦ | Полоцкая ТЭЦ |
|------------------------|-------------------|---------|---------------|--------------|
| Расстояние 10–20 км    |                   |         |               |              |
| Базовая цена           | 10.14             | 10.18   | 10.22         | 10.21        |
| Перевозка              | 4.8               | 3.80    | 4.57          | 3.12         |
| Погрузка/выгрузка      | 0.5               | 1.19    | 0.73          | 0.49         |
| Измельчение            | 9.94              | 9.98    | 10.00         | 10.00        |
| Дополнительные затраты | 17.46             | 2.51    | 2.55          | 2.38         |
| Цена                   | 42.84             | 27.66   | 28.06         | 26.20        |
| Расстояние 20–30 км    |                   |         |               |              |
| Базовая цена           | 10.14             | 10.23   | 10.20         | 10.24        |
| Перевозка              | 5.4               | 10.83   | 10.85         | 7.85         |
| Погрузка/выгрузка      | 0.5               | 1.21    | 0.72          | 0.49         |
| Измельчение            | 9.94              | 9.99    | 9.99          | 9.99         |
| Дополнительные затраты | 17.93             | 3.23    | 3.18          | 2.86         |
| Цена                   | 43.91             | 35.49   | 34.94         | 31.43        |
| Расстояние 30–60 км    |                   |         |               |              |
| Базовая цена           | –                 | 10.18   | –             | 10.18        |
| Перевозка              | –                 | 18.51   | –             | 17.08        |
| Погрузка/выгрузка      | –                 | 1.21    | –             | 1.21         |
| Измельчение            | –                 | 10.00   | –             | 10.00        |
| Дополнительные затраты | –                 | 3.99    | –             | 3.64         |
| Цена                   | –                 | 43.88   | –             | 42.10        |

Проведенный экономический анализ капитальных затрат приводит в табл. 8.4.

Таблица 8.4

Капитальные затраты для двух вариантов замещения (вариант В – отдельный предтопок, вариант D – замена всего) котлоагрегата)

Сравнительный анализ вариантов, выполненный по методике минимальных издержек, дан в табл. 8.5.

Таблица 8.5

Результаты анализа приведенных затрат и чистого дохода

| Показатель                                       | Ожидаемый объем производства |               |              |                   |
|--|------------------------------|---------------|--------------|-------------------|
|  | БелГРЭС                      | Жодинская ТЭЦ | Полоцкая ТЭЦ | Светлогорская ТЭЦ |
| Единица мощности, МВт-эл.                        | 15                           | 15            | 15           | 15                |
| Электрическая мощность блока, МВт                | 28 468.8                     | 174 924.7     | 30 667.2     | 103 911.0         |
| Тепловая энергия, Гкал                           | 53 998.9                     | 127 176.3     | 5 997 14.4   | 215 451.6         |
| Капитальные затраты (инвестиции), тыс. долл. США |                              |               |              |                   |
| Вариант В  | 5 100.1                      | 5 312.9       | 4 392.7      | 9 649             |
| Вариант D  | 15 762.0                     | 9 689.0       | 5 628.1      | 16 025            |
| Затраты на эксплуатацию, тыс. долл. США/год      |                              |               |              |                   |
| Проектирование, долл. США                        | 344.8                        | 462.5         | 259.3        | 1 265.3           |
| Сборка и монтаж, долл. США                       | 32.7                         | 209.9         | 35.3         | 1 132.6           |
| Всего  | 2 202.3                      | 499.4         | 8 083.5      | 1 404.6           |
| Затраты на топливо, тыс. долл. США/год           |                              |               |              |                   |
| Всего на замену                                  | 304.9                        | 1 114.3       | 489.1        | 1 563.0           |
| Расстояние 10–20 км                              | 4 393                        | 6 282         | 9 649        | 16 025            |
| Расстояние 20–40 км                              | –                            | –             | –            | –                 |
| Всего  | 304.9                        | 1 114.3       | 599.1        | 2 263.4           |
| Ожидаемый годовой доход, тыс. долл. США/год      |                              |               |              |                   |
| От продажи электроэнергии                        | 1 517.4                      | 9 323.5       | 1 634.6      | 5 538.45          |
| От продажи тепловой энергии                      | 1 744.2                      | 4 107.8       | 3 220.8      | 6 959.05          |
| Всего  | 3 261.5                      | 13 431.3      | 4 855.3      | 12 497.50         |
| Учетная ставка банка, %                          | 10                           | 10            | 10           | 10                |
| Чистая прибыль через 10 лет, тыс. долл. США      |                              |               |              |                   |
| Вариант В  | 8 005.1                      | 47 399.0      | 14 335.0     | 30 142.0          |
| Вариант D  | 1 892.3                      | 44 039.6      | 12 614.4     | 24 334.4          |
| Внутренняя норма рентабельности, %               |                              |               |              |                   |
| Вариант В  | 37.0                         | 100.8         | 56.5         | 55                |
| Вариант D  | 13.6                         | 71.9          | 42.6         | 36                |

На рис. 8.5 приведено сравнение двух вариантов ретрофита по удельным капитальным затратам, из которого следует, что замена всего котлоагрегата является наиболее капиталоемкой для БелГРЭС.

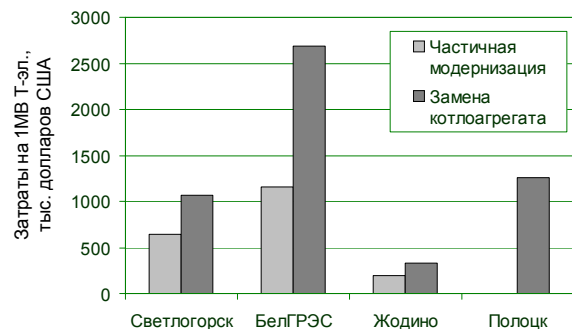


Рис. 8.5. Сравнение удельных затрат по двум схемам ретрофита

На рис. 8.6 показано сравнение топливной составляющей с другими ежегодными затратами.

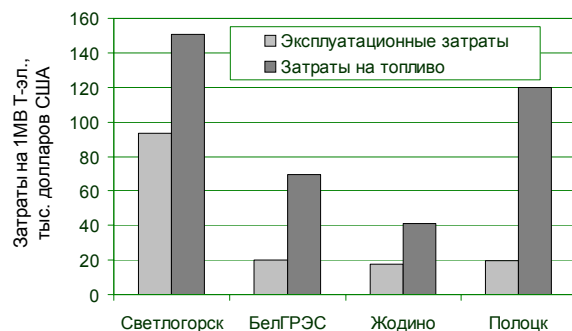


Рис. 8.6. Топливная составляющая в структуре ежегодных затрат

Из анализа очевидно, что затраты на приобретение, подготовку, хранение и подачу топлива намного превышают остальные эксплуатационные издержки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящий учебный курс содержит в себе основные знания и предварительные оценки по практической реализации некоторых реабилитационных технологий, позволяющих вовлечь загрязненные ресурсы черныбыльских районов в биоэнергетику. Приводятся методы оценки сопутствующих дозовых нагрузок при использовании загрязненной древесины в качестве топлива для энерго/теплогенерирующих источников малой мощности в Беларуси. На примерах демонстрационных схем ретрофита рассмотрены составляющие краткосрочной программы замещения ископаемого топлива на древесное. В рамках данного курса проведен анализ путей реабилитации основного возобновляемого ресурса на зараженных радионуклидами территориях, из которого можно сделать следующие выводы:

- проблема утилизации все возрастающего количества отходов лесопользования и деревообработки, включая отходы загрязненной древесины, может быть эффективно решена только на основе широкого внедрения биоэнергетики;
- острый недостаток энергоресурсов в Беларуси, ожидаемый в ближайшем десятилетии, может быть частично компенсирован за счет развития биоэнергетики, а значит без вовлечения импортируемых ископаемых видов топлива;
- экологические и социальные проблемы в загрязненных районах могут быть смягчены путем создания объектов биоэнергетики и соответствующей инфраструктуры;
- все первоочередные котлоагрегаты, выбранные для замещения на них ископаемого топлива, могут быть полностью обеспечены древесными отходами, и затраты на их реконструкцию/замену будут экономически эффективными;
- в рамках ближайшей программы развития биоэнергетики можно сэкономить до 380 тыс. т у. т. Для долговременной программы необходимо строительство новых блоков на биомассе, общая мощность которых в перспективе составит до 100–200 МВт.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Азаров С. И. Загрязнение атмосферы  $^{137}\text{Cs}$  в процессе лесных пожаров в Чернобыле // Радиационная биология и экология. – 1996. – Т. 36. – № 4. – С. 506–515.
2. Дворник А. М. Радиологическая оценка лесных экосистем после ядерной аварии: методология, моделирование и прогноз: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 18.04.98. – Гомель: Институт леса НАНБ, 1998.
3. Котельные установки промышленных предприятий / Н. А. Семенов, Л. Н. Сидельковский, В. Н. Юренев. – М.: Госэнергоиздат, 1960.
4. Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации / Под ред. В. А. Ипатьева. – Гомель: Институт леса НАНБ, 1999.
5. Механизация лесохозяйственных работ с основами теоретической механики / Л. С. Застенский. – Минск: Выш. шк., 1995.
6. Окружающая среда и природные ресурсы Республики Беларусь. – Минск: Изд-во Министерства статистики и анализа РБ. НИИ статистики, 1985–2001.
7. Охрана окружающей среды / Под ред. С. В. Белова. – М.: Высш. шк., 1991.
8. Охрана окружающей среды на предприятиях атомной промышленности / Под ред. Б. Н. Ласкорина. – М.: Энергоиздат, 1982.
9. Очистка промышленных газов фильтрами / В. Н. Ужов, Б. И. Мягков. – М.: Химия, 1970.
10. Радиоактивные загрязнения и их измерение / М. Т. Максимов, Г. О. Оджагов. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
11. Моделирование дозовых нагрузок на основе метода Монте-Карло для лесов Чернобыльской зоны / И. А. Савушкин, Е. И. Равкова, О. Б. Гурко и др. // Инженерно-физический журнал. – 1997. – Т. 70. – № 5. – С. 824–827.
12. Amiro B., Grebenkov A., Vandenhove H. Countermeasures and Risks Associated with Contaminated Forest // Contaminated Forest: Recent Developments in Risk Identification and Future Perspectives. Kluwer Academic Publishers. NATO Science Series 2. – 1999. – Vol. 58. – P. 395–401.
13. Baxter L., Buckley S., Grebenkov A., Lunden M., Robinson A. Aerosol Generation from Cs- and Sr-Doped Biomass Combustion // Proc. of AIChE 1998 Spring National Meeting (March 8–12, 1998). – New Orleans, USA, 1998. – P. 344–353.
14. Grebenkov A., Kalb P., Milian L., Zabrodski V. Treatment of Chernobyl Contaminated Ash Using Thermoplastic Encapsulation // Proc. of WM' 98 International Conference (March 1–5, 1998). – Tucson, USA, 1998. – CD publication.
15. Hedvall R., Erlandsson B., Matsson S. Cs-137 in Fuels and Ash Products from Biofuel Power Plants in Sweden // J. Environ. Radioactivity. – 1996. – Vol. 31, № 1. – P. 103–117.
16. Hillamo R., Kauppinen E. On the Performance of the Berner Low Pressure Impactor // Aerosol Science and Technology. – 1991. – Vol. 14. – P. 33–47.
17. Hubert P., Annisimova L., Antsipov G. et al. (eds.). Experimental Collaboration Project no.4: Strategies of Decontamination. – Brussels, EC-DGXII: EUR16530 EN, 1996.
18. Junker H., Jensen J.-M., Jorgensen H. et al. Chernobyl Bioenergy Project: Power Production from Radioactively Contaminated Biomass and Forest Litter in Belarus // Final Report, Phase 1. Elsamprojekt, Fredericia, Denmark. – September 1998. – 423 p.
19. Vandenhove H., Gommers A., Thiry Y., Grebenkov A. et al. Evaluation of Short Rotation Coppice as Remediation Option for Contaminated Farmland // Contaminated Forest: Recent Developments in Risk Identification and Future Perspectives. NATO Science Series 2. – Vol. 58. – Kluwer Academic Publishers. – 1999.
20. Vandenhove H., Thiry Y., Gommers A., Grebenkov A. et al. Short Rotation Coppice for Revaluation of Contaminated Land // Journal of Environmental Radioactivity. – 2001. – Vol. 56. – P. 157–184.

Учебное издание

**Гребеньков** Александр Жоресович, **Трубников** Виталий Петрович

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
НА ЗАРАЖЕННЫХ РАДИОНУКЛИДАМИ ТЕРРИТОРИЯХ**

Тексты лекций

Редактор *Ю. А. Ирхина*  
Компьютерная верстка *О. Ю. Шантарович*

Подписано в печать 14.09.2006. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 7,5. Уч.-изд. л. 7,8.  
Тираж 75 экз. Заказ .

Учреждение образования  
«Белорусский государственный технологический университет».  
220050. Минск, Свердлова, 13а.  
ЛИ № 02330/0133255 от 30.04.2004.

Отпечатано в лаборатории полиграфии учреждения образования  
«Белорусский государственный технологический университет».  
220050. Минск, Свердлова, 13.  
ЛИ № 02330/0056739 от 22.01.2004.





