

# **Атомная энергетика**

# АЭС

- Источником облучения, вокруг которого ведутся наиболее интенсивные споры, являются атомные электростанции, хотя в настоящее время они вносят весьма незначительный вклад в суммарное облучение населения. При нормальной работе ядерных установок выбросы радиоактивных материалов в окружающую среду очень невелики.

- **Атомная электростанция (АЭС)** - единый производственно-технологический комплекс, который предназначен для производства энергии, на котором для осуществления этой цели используются ядерные установки и объекты, предназначенные для обращения с радиоактивными отходами, с комплексом необходимых систем, устройств, оборудования и сооружений.

- Первая в мире промышленная атомная электростанция мощностью 5 МВт была запущена 27 июня 1954 года в СССР, в городе Обнинске, расположенном в Калужской области.

- За пределами СССР первая АЭС промышленного назначения мощностью 46 МВт была введена в эксплуатацию в 1956 году в Колдер-Холле (Великобритания).

- На 2014 год суммарно АЭС мира выработали 2,410 тВт·ч энергии, что составило 10,8 % всемирной генерации электричества.

# Мировыми лидерами в производстве ядерной электроэнергии на 2014 год являются

- США (798 млрд кВт·ч/год), работает 104 атомных реактора (20 % от вырабатываемой электроэнергии)
- Франция (418 млрд кВт·ч/год), 58 реакторов.
- Россия (169 млрд кВт·ч/год), 34 реактора.
- Южная Корея (149 млрд кВт·ч/год), 23 реактора.
- Китай (123 млрд кВт·ч/год), 23 реактора.
- Канада (98 млрд кВт·ч/год), 19 реакторов.
- Германия (91 млрд кВт·ч/год), 9 реакторов.
- Украина (83 млрд кВт·ч/год), 15 реакторов.
- Швеция (62 млрд кВт·ч/год), 10 реакторов.
- Великобритания (58 млрд кВт·ч/год), 16 реакторов.

Половина всемирной выработки электроэнергии на АЭС приходится на США и Францию.

- 31 страна использует атомные электростанции. 14 стран строят ядерные реакторы или развивают проекты их строительства. В мире действует 391 энергетических ядерных реакторов общей мощностью 337 ГВт, российская компания «ТВЭЛ» поставляет топливо для 73 из них (17 % мирового рынка). Однако 45 реакторов не производили электричество более полутора лет. Большая часть из них находится в Японии.



- **Атомные электрические станции** - это тепловые станции, использующие энергию ядерных реакций. В качестве ядерного горючего используют обычно изотоп урана U-235, содержание которого в природном уране составляет 0,714%.

- Реакция деления происходит в ядерном реакторе. Ядерное топливо используют обычно в твердом виде. Его заключают в предохранительную оболочку. Такого рода тепловыделяющие элементы называют **ТВЭлами**. Их устанавливают в рабочих каналах активной зоны реактора. Тепловая энергия, выделяющаяся при реакции деления, отводится из активной зоны реактора с помощью теплоносителя, который прокачивают под давлением через каждый рабочий канал или через всю активную зону.

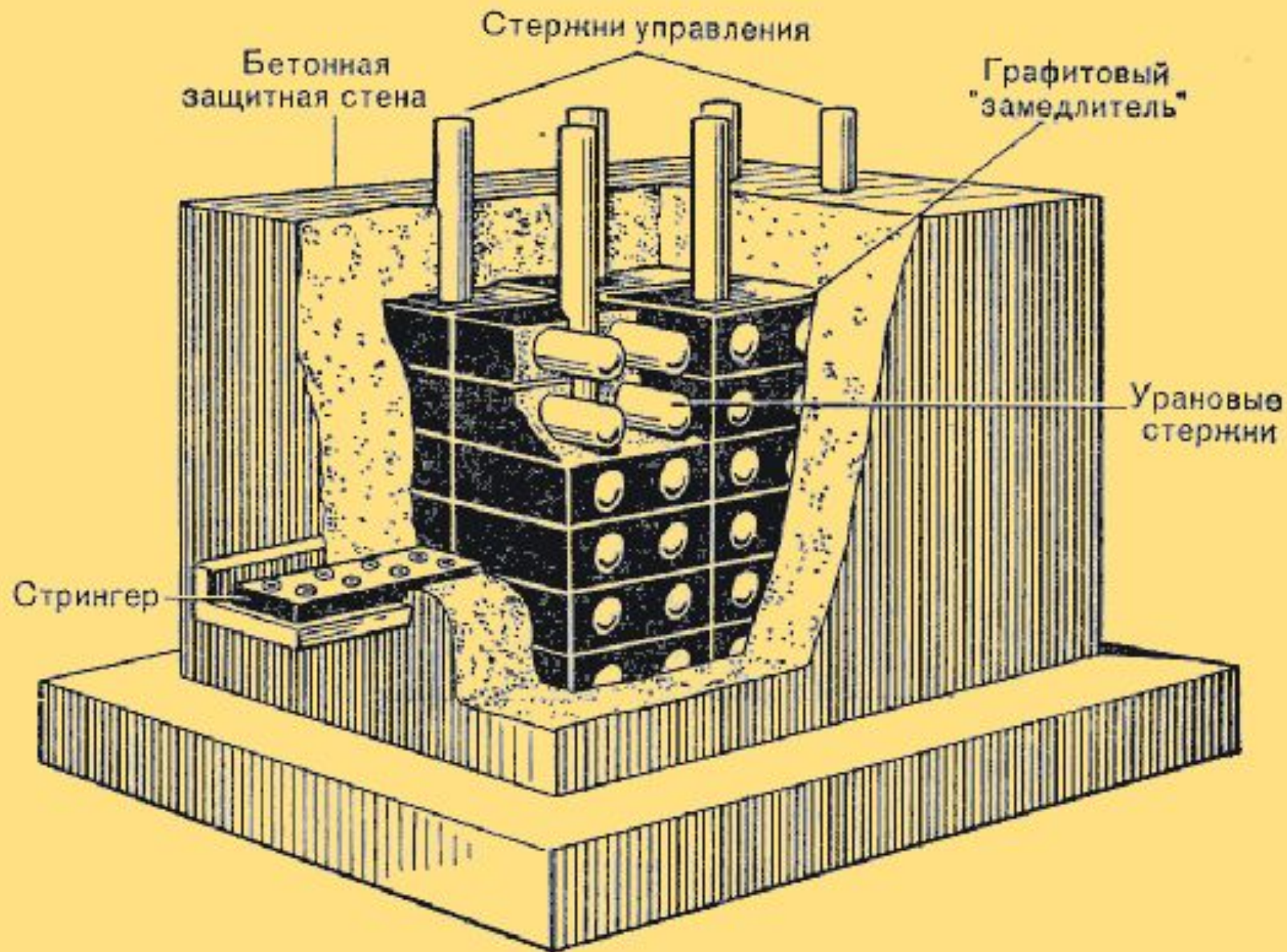
- Ядерная «топка» представляет собой активную зону, объемом, меньшим, чем средний объем жилой комнаты в нашем доме. Ядерное топливо, используемое в современных атомных электростанциях, содержит только несколько процентов  $^{235}\text{U}$ .

- Для того чтобы начать и поддерживать цепную реакцию на определенном уровне, топливные стержни надо внедрить в определенное вещество, преимущественно состоящее из легких химических элементов, цель которого состоит в торможении или замедлении нейтронов, образующихся в результате деления **U235**, эти нейтроны движутся с большой скоростью.

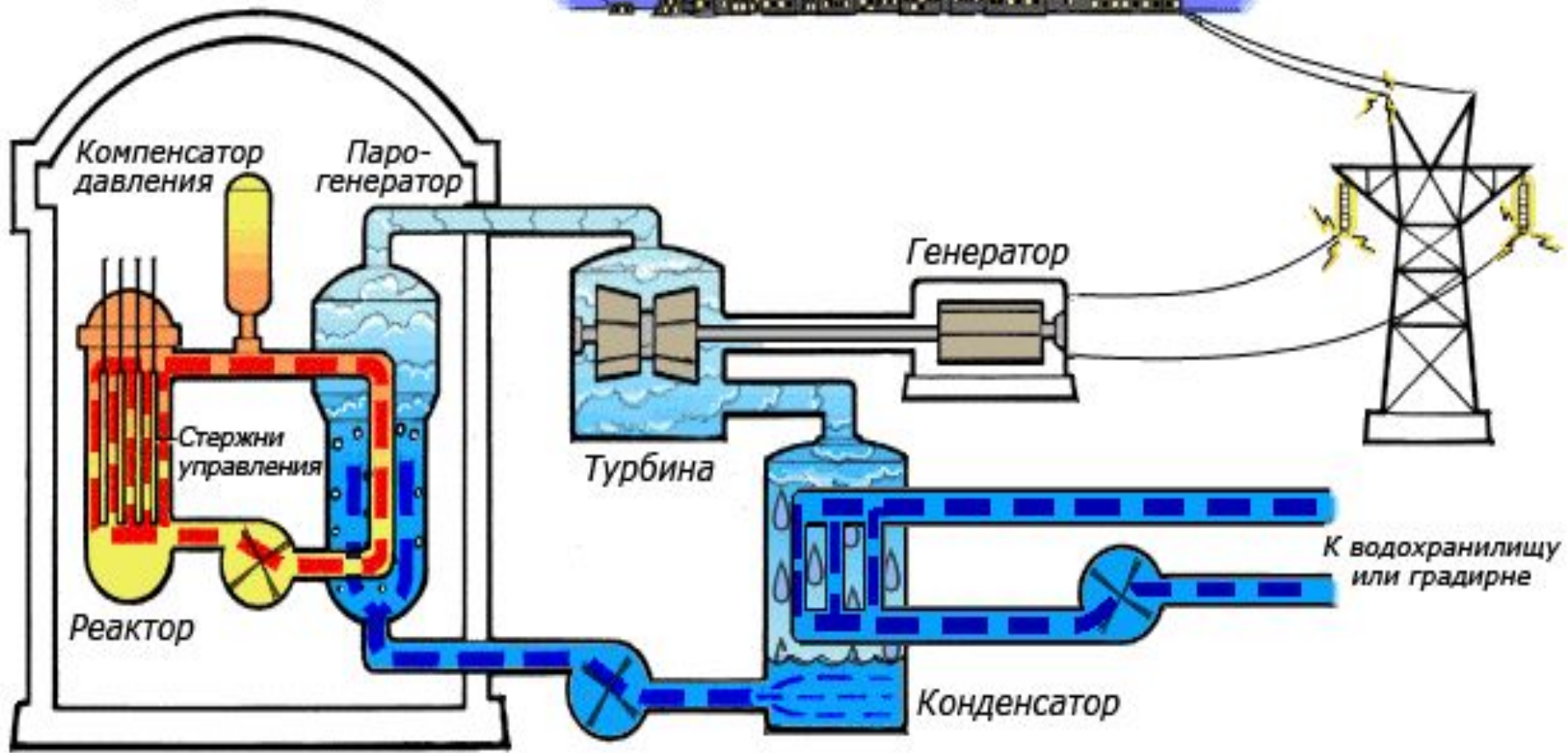
- Существуют всевозможные вещества, которые применяют в качестве активной зоны или замедлителя реактора: графит (углерод), обычная (легкая) вода, «тяжелая» вода, т. е. вода, в которой водород заменен на дейтерий — более тяжелый изотоп водорода.

# Стержни управления

- Процесс в реакторе регулируется путем погружения в активную зону стержней из **бора или кадмия**, которые стремятся поглотить нейтроны. Посредством непрерывной регулировки стержней, вводя и выводя их из активной зоны, работу реактора можно поддерживать на желаемом уровне.



*Здание реактора*





- На рисунке показана схема работы атомной электростанции с двухконтурным водо-водяным энергетическим реактором.
- Энергия, выделяемая в активной зоне реактора, передаётся теплоносителю первого контура. Далее теплоноситель поступает в теплообменник (парогенератор), где нагревает до кипения воду второго контура. Полученный при этом пар поступает в турбины, вращающие электрогенераторы. На выходе из турбин пар поступает в конденсатор, где охлаждается большим количеством воды, поступающим из водохранилища.

- Помимо воды, в различных реакторах в качестве теплоносителя могут применяться также расплавы металлов: натрий, свинец, эвтектический сплав свинца с висмутом и др. Использование жидкометаллических теплоносителей позволяет упростить конструкцию оболочки активной зоны реактора (в отличие от водяного контура, давление в жидкометаллическом контуре не превышает атмосферное).

- В случае невозможности использования большого количества воды для конденсации пара, вместо использования водохранилища вода может охлаждаться в специальных охладительных башнях (градирнях), которые благодаря своим размерам обычно являются самой заметной частью атомной электростанции.

# Достоинства

- Главное преимущество — практическая независимость от источников топлива из-за небольшого объёма используемого топлива.
- Расходы на перевозку ядерного топлива, в отличие от традиционного, ничтожны. В России это особенно важно в европейской части, так как доставка угля из Сибири слишком дорога.

- При делении 1 г изотопов урана или плутония высвобождается 22 500 квт ч, что эквивалентно энергии, содержащейся в 2800 кг условного топлива. Установлено, что мировые энергетические ресурсы ядерного горючего (уран, плутоний и др.) существенно превышают энергоресурсы природных запасов органического топлива (нефть, уголь, природный газ и др.).

- Огромным преимуществом АЭС является её относительная экологическая чистота. На ТЭС суммарные годовые выбросы вредных веществ, в которые входят *сернистый газ*, оксиды азота, оксиды углерода, углеводороды, альдегиды и золовая пыль огромны.

- Подобные выбросы на АЭС полностью отсутствуют.
- ТЭС мощностью 1000 МВт потребляет 8 миллионов тонн кислорода в год для окисления топлива, АЭС же не потребляют кислорода вообще

- Кроме того, большой удельный (на единицу произведенной электроэнергии) выброс радиоактивных веществ даёт угольная станция.
- В угле всегда содержатся природные *радиоактивные вещества*, при сжигании угля они практически полностью попадают во внешнюю среду.
- При этом удельная *активность* выбросов ТЭС в несколько раз выше, чем для АЭС.



- Для большинства стран, в том числе и России, производство электроэнергии на АЭС не дороже, чем на пылеугольных и тем более газомазутных ТЭС. Особенно заметно преимущество АЭС в стоимости производимой электроэнергии во время так называемых энергетических кризисов, начавшихся с начала 70-х годов.
- Падение цен на нефть автоматически снижает конкурентоспособность АЭС.

- Затраты на *строительство АЭС* по оценкам, составленным на основе реализованных в 2000-х годах проектов, на 35 % выше, чем для угольных, на 45 % — газовых ТЭС.

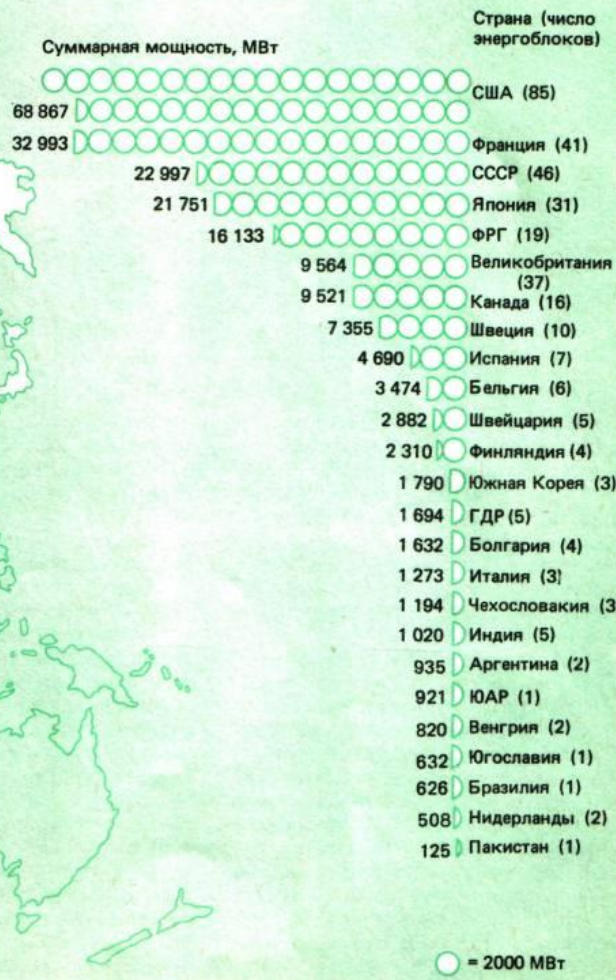
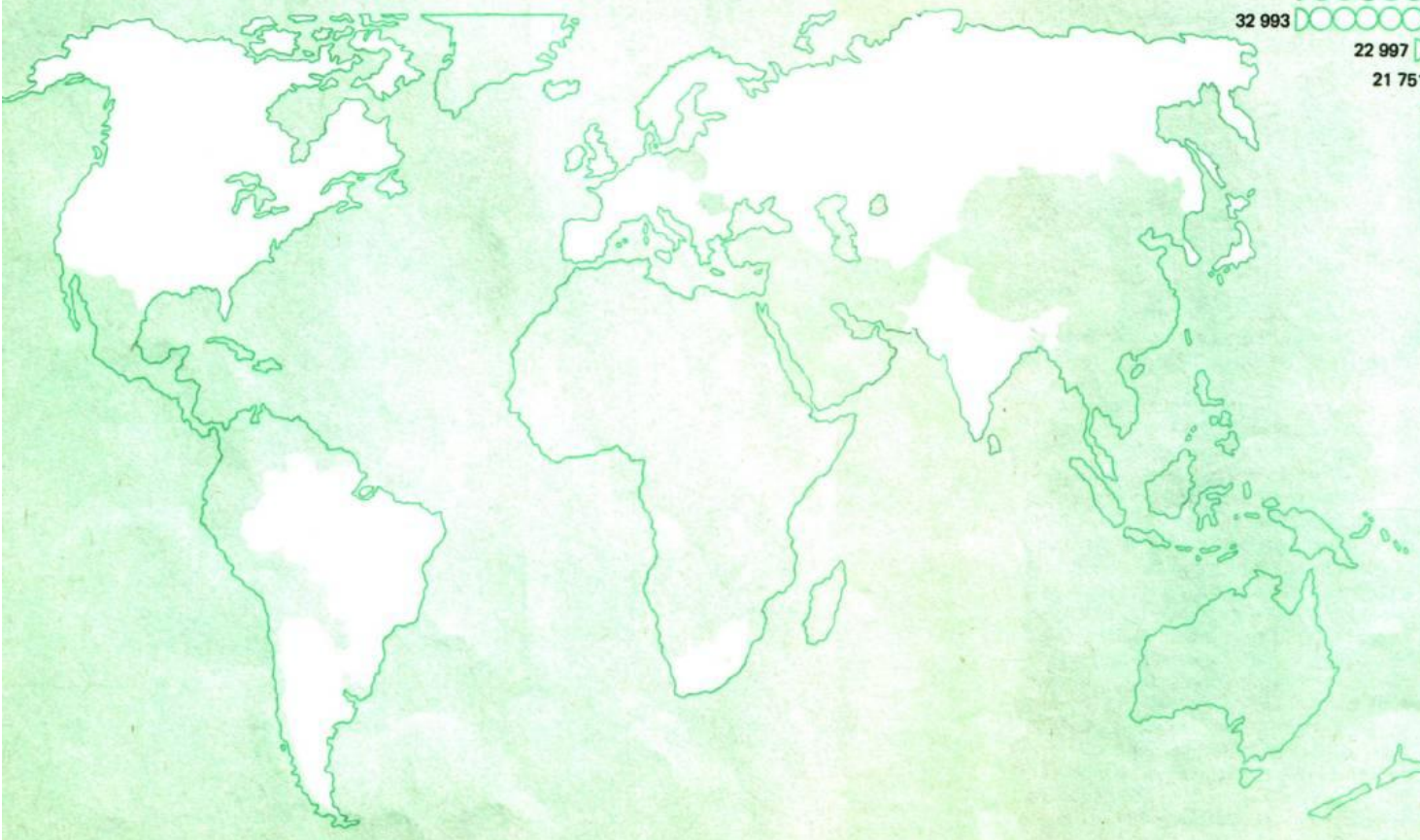
- Главный недостаток АЭС — тяжелые последствия аварий, для исключения которых АЭС оборудуются сложнейшими системами безопасности.

- Серьёзной проблемой для АЭС является ликвидация ядерного топлива после выработки, по оценкам она может составить до 20 % от стоимости их строительства.

#### 4.12. МИРОВАЯ АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Страны, в которых к концу 1984 г. имелись действующие атомные станции

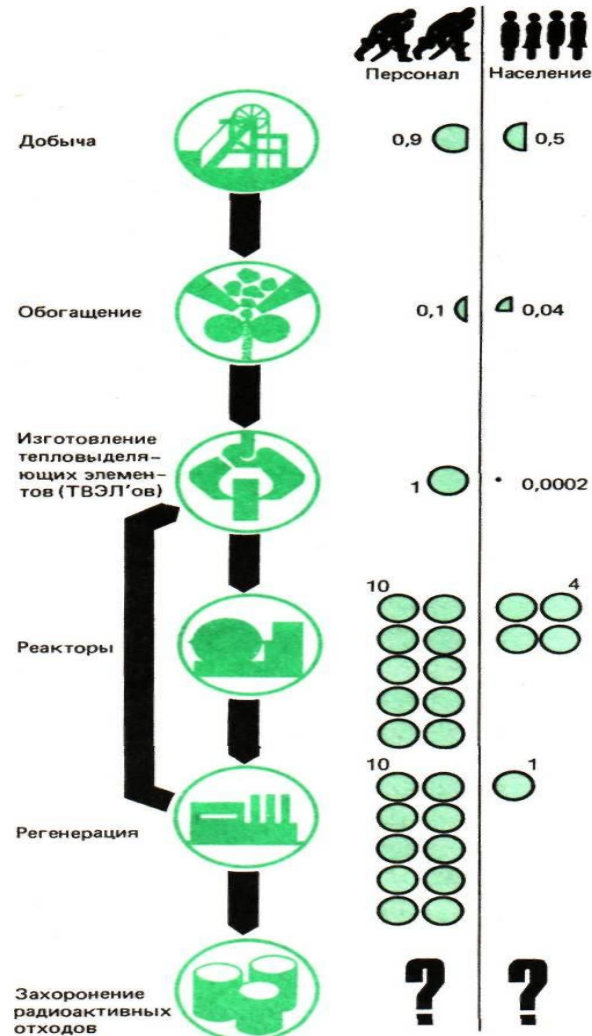
Источник: Отчет Международного агентства по атомной энергии за 1984 г.



- **Атомные электростанции являются лишь частью ядерного топливного цикла,** который начинается с добычи и обогащения урановой руды. Следующий этап- производство ядерного топлива. Отработанное в АЭС ядерное топливо иногда подвергают вторичной обработке, чтобы извлечь из него уран и плутоний. Заканчивается цикл, как правило, захоронением радиоактивных отходов.

*Ядерный топливный цикл и дозы, которые получают на разных его этапах обслуживающий персонал и жители прилегающих районов. Приведены типичные ожидаемые коллективные эффективные эквивалентные дозы в чел-Зв на гигаватт-год вырабатываемой электроэнергии*

4.14. ЯДЕРНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ



Оценки типичной ожидаемой коллективной эффективной эквивалентной дозы на соответствующих этапах (чел - Зв на каждый гигаватт-год вырабатываемой электроэнергии)

- В последнее время наблюдается тенденция к уменьшению количества выбросов из ядерных реакторов, несмотря на увеличение мощности АЭС. Частично это связано с техническими усовершенствованиями, частично-с введением более строгих мер по радиационной защите.



- Весь ядерный топливный цикл дает ожидаемую коллективную эффективную эквивалентную дозу облучения за счет **короткоживущих изотопов** около 5,5 чел-Зв на каждый гигаواتт-год вырабатываемой АЭС электроэнергии. Из них процесс добычи руды дает вклад 0,5 чел-Зв, ее обогащение-0,04 чел-Зв, производство ядерного топлива - 0,002 чел-Зв, эксплуатация ядерных реакторов - около 4 чел-Зв (наибольший вклад) и, наконец, процессы, связанные с регенерацией топлива, -1 чел-Зв.

- Ядерный топливный цикл сопровождается также образованием большого количества **долгоживущих радионуклидов**, которые распространяются по всему земному шару. НКДАР оценивает коллективную эффективную ожидаемую эквивалентную дозу облучения такими изотопами в 670 чел-Зв на каждый гигаватт-год вырабатываемой электроэнергии, из которых на первые 500 лет после выброса приходится менее 3%.

- От долгоживущих радионуклидов все население Земли получает примерно такую же среднегодовую дозу облучения, как и население, живущее вблизи АЭС, от короткоживущих радионуклидов, при этом долгоживущие изотопы оказывают свое воздействие в течение гораздо более длительного времени-90% всей дозы население получит за время от тысячи до сотен миллионов лет после выброса.

- Люди, живущие вблизи АЭС, даже при нормальной работе реактора получают всю дозу сполна от короткоживущих изотопов и малую часть дозы от долгоживущих.

- Люди, проживающие вблизи ядерных реакторов, без сомнения, получают гораздо большие дозы, чем население в среднем. Тем не менее в настоящее время эти дозы обычно не превышают нескольких процентов естественного радиационного фона.

- Все приведенные выше цифры, конечно, получены в предположении, что ядерные реакторы работают нормально.

На ядерных реакторах аварии с выбросом радионуклидов в атмосферу происходили трижды:

- Уиндскейл, Англия (10 октября 1957 г.),
- Три-Мойл-Айленд США (28 марта 1979 г.),
- Чернобыль, СССР (26 апреля 1986 г.),
- Авария на АЭС Фукусима-1 (11 марта 2011 года).

.

- Выброс в результате аварии в **Уиндскейле** произошел через вентиляционную трубу высотой 125 м, продолжался в течение суток. Основными радионуклидами в выбросе были  $^{137}\text{Cs}$  ( $2,2 \cdot 10^{13}$  Бк),  $^{131}\text{I}$  ( $7,4 \cdot 10^{14}$  Бк),  $^{89}\text{Sr}$  ( $3 \cdot 10^{12}$  Бк),  $^{90}\text{Sr}$  ( $7 \cdot 10^{10}$  Бк),  $^{106}\text{Ru}$  ( $3 \cdot 10^{12}$  Бк),  $^{132}\text{Te}$  ( $4,4 \cdot 10^{14}$  Бк),  $^{133}\text{Xe}$  ( $1,2 \cdot 10^{16}$  Бк),  $^{239}\text{Pu}$  ( $1,6 \cdot 10^9$  Бк). След от выпадений из выброса простирался на расстояние  $\sim 4$  км к юго-востоку. Радиоактивное облако распространилось на юго-восток и достигло **Бельгии, Голландии, Германии, Норвегии.**



- Выброс в результате аварии на АЭС **Три-Мойл-Айленд** произошел из-под защитной оболочки реактора, продолжался около 30 часов и был сравнительно небольшим (в сутки  $10^{17}$  Бк). В составе выбросов были преимущественно РБГ ( $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{133\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ) и небольшое количество  $^{131}\text{I}$  ( $<1,1$  Бк). От места аварии выброс распространялся преимущественно на север на расстояние около 50 км.

- Выброс в результате аварии на IV блоке ЧАЭС, в отличие от предыдущих, отличался значительной мощностью, продолжительностью и высотой. Выброс происходил из горячей активной зоны, продолжался 10 дней, был высотой до 2,3 км и по суммарной мощности составил  $\sim 2 \cdot 10^{18}$  Бк (3,4 % активности, содержащейся в активной зоне к моменту аварии).

- Факел выброса днем 26 апреля повернул на северо-запад и север (на следующий день облако достигло Скандинавии - здесь были самые большие за пределами СССР выпадающие доли  $1 \cdot 10^5$  Бк (м<sup>2</sup>). В последующие дни выбросы распространялись как через Польшу на Европу, так на востоке и юго-востоке в сторону Турции и Греции. Таким образом, к 30 апреля завершили полный разворот ветра и до середины мая в большей или меньшей мере загрязнение от чернобыльских выпадений распространилось во всем Северном полушарии.

- **Авария на АЭС Фукусима-1** — произошла 11 марта 2011 года в результате сильнейшего в истории Японии землетрясения и последовавшего за ним цунами. Землетрясение и удар цунами вывели из строя внешние средства электроснабжения и резервные дизельные генераторы, что явилось причиной неработоспособности всех систем нормального и аварийного охлаждения и привело к расплавлению активной зоны реакторов на энергоблоках 1, 2 и 3 в первые дни развития аварии.
- В декабре 2013 года АЭС была официально закрыта. На территории станции продолжают работы по ликвидации последствий аварии. По оценке японских инженеров-ядерщиков, приведение объекта в стабильное, безопасное состояние может потребовать до 40 лет.