

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Лекция 3

**Лектор: д.т.н., проф.
Абросимов Леонид Иванович**

3. ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

- **Ядерная энергетика** (Атомная энергетика) — это отрасль энергетики, занимающаяся производством электрической и тепловой энергии путём преобразования ядерной энергии.
- Главное отличие АЭС от ТЭС состоит в использовании *ядерного горючего* вместо органического топлива. Обычно для получения ядерной энергии используют цепную ядерную реакцию деления ядер урана-235 или плутония.
- Ядерная энергия производится в атомных электрических станциях, используется на атомных ледоколах, атомных подводных лодках; США осуществляют программу по созданию ядерного двигателя для космических кораблей, кроме того, предпринимались попытки создать ядерный двигатель для самолётов (атомолётов) и «атомных»

Атомная электростанция (АЭС) — ядерная установка для производства энергии

- в заданных режимах
- в заданных условиях применения,
- располагающаяся в пределах определённой проектом территории,
- на которой для осуществления этой цели используются ядерный реактор (реакторы)
- и комплекс необходимых систем, устройств, оборудования и сооружений
- с необходимыми работниками (персоналом), предназначенная для производства электрической энергии

История развития атомной энергетики

- В мае 1950 года близ посёлка Обнинское Калужской области начались работы по строительству первой в мире АЭС.
- Первая в мире промышленная атомная электростанция мощностью 5 МВт была запущена 27 июня 1954 года в СССР, в городе Обнинске, расположенном в Калужской области.
- В 1958 году была введена в эксплуатацию 1-я очередь Сибирской АЭС мощностью 100 МВт, впоследствии полная проектная мощность была доведена до 600 МВт. В том же году развернулось строительство Белоярской промышленной АЭС, а 26 апреля 1964 года генератор 1-й очереди дал ток потребителям.
- В сентябре 1964 года был пущен 1-й блок Нововоронежской АЭС мощностью 210 МВт. Второй блок мощностью 365 МВт запущен в декабре 1969 года. В 1973 году запущена Ленинградская АЭС.
- За пределами СССР первая АЭС промышленного назначения мощностью 46 МВт была введена в эксплуатацию в 1956 году в Колдер-Хоппе

- В 1979 году произошла серьёзная авария на АЭС Три-Майл-Айленд, после чего США прекратили строительство атомных реакторов, в планах постройка новых 2 реакторов на базе старой АЭС лишь к 2017
- В 1986 году — масштабная катастрофа на Чернобыльской АЭС, которая, помимо непосредственных последствий, серьёзно отразилась на всей ядерной энергетике в целом. Она вынудила специалистов всего мира пересмотреть проблему безопасности АЭС.
- Крупнейшая АЭС в Европе — Запорожская АЭС в г. Энергодаре (Украина), строительство которой началось в 1980 году. С 1996 года работают 6 энергоблоков суммарной мощностью 6 ГВт.
- Крупнейшая АЭС в мире (по установленной мощности) — АЭС Касивадзаки-Карива (на 2008 год) находится в Японском городе Касивадзаки префектуры Ниигата. В эксплуатации находятся пять кипящих ядерных реакторов (BWR) и два улучшенных кипящих ядерных реакторов (ABWR), суммарная мощность которых составляет 8,212 ГВт.
- Последняя крупная авария на АЭС произошла в марте 2011 года в Японии в префектуре Фукусима. Авария на АЭС Фукусима-1 произошла в результате воздействия на АЭС сильного землетрясения и последовавшего за ним цунами.

Темпы развития АЭС

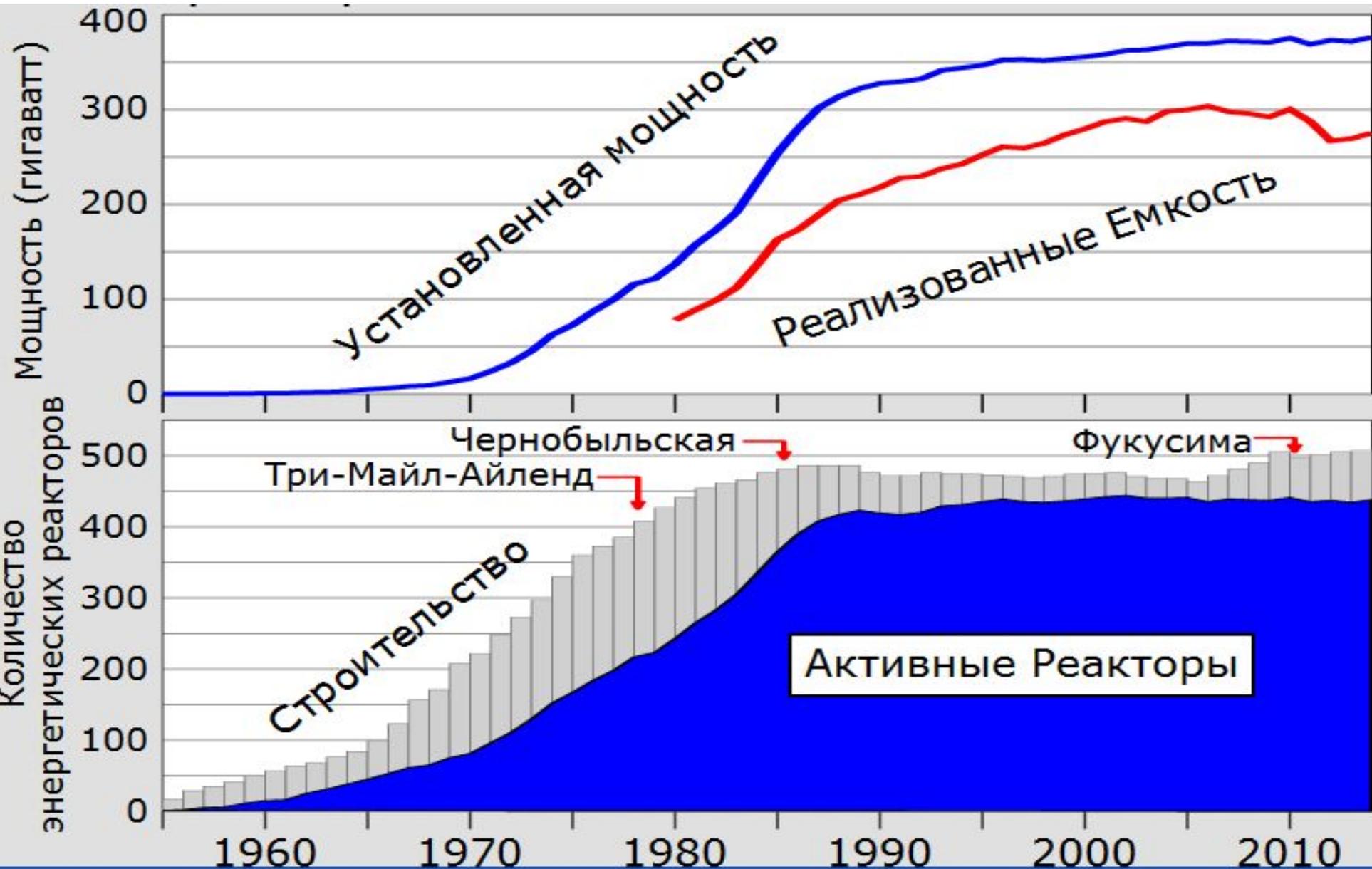


Схема работы атомной электростанции

Атомная электростанция (АЭС) представляет собой комплекс технических сооружений, предназначенных для выработки электрической энергии путем использования энергии, выделяемой при контролируемой ядерной реакции.

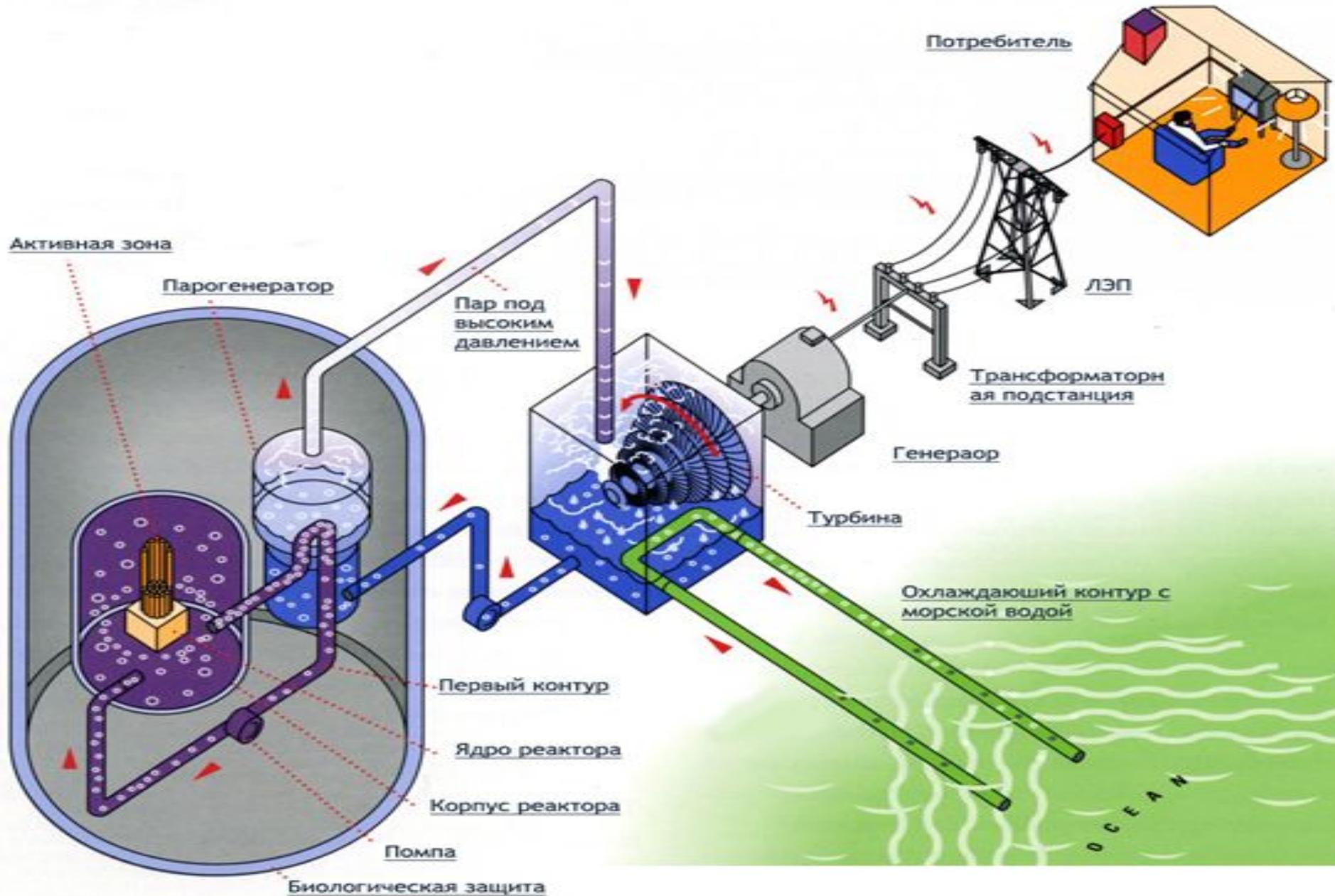
В качестве распространенного топлива для атомных электростанций применяется уран. Реакция деления осуществляется в основном блоке атомной электростанции – ядерном реакторе.

Атомные электростанции классифицируются в соответствии с типом используемых реакторов на тепловых нейтронах, в том числе:

- водо-водяными
- кипящими
- тяжеловодными
- газоохлаждаемыми
- графито-водными
- высокотемпературными газоохлаждаемыми
- тяжеловодными газоохлаждаемыми
- тяжеловодными водоохлаждаемыми
- кипящими тяжеловодными
- с реакторами на быстрых нейтронах

- Организация МАГАТЭ (международное агентство по атомной энергетике) создало свою классификацию, которая зависит от выбора теплоносителя и замедлителя.
- **PWR (pressurized water reactors) — водо-водяной реактор** (реактор с водой под давлением). В странах СНГ такие реакторы называют аббревиатурой ВВЭР. В качестве теплоносителя и замедлителя в них используется обычная вода. Водо-водяные реакторы самые распространенные в мире (около 62% от всех реакторов). Водо-водяные реакторы дешевы и удобны, т.к. вода не воспламеняется, не затвердевает, и ее использование относительно безопасно.
- **BWR (boiling water reactor) — кипящий реактор или кипящий водо-водяной реактор**. Принцип действия АЭС на таком реакторе очень похож на то, как работает АЭС на ВВЭР. Кипящий реактор также использует обычную воду, его особенность в только том, что пар генерируется сразу в активной зоне. В водо-водяном реакторе сначала нагревается вода, которая позже, спустя несколько этапов, переводится в пар, в кипящих реакторах тепло сразу отдается кипящей воде, которая мгновенно становится горячим паром. Кипящие реакторы достаточно распространены, их 20% от всех атомных реакторов мира.
- **LWGR (light water graphite reactor) — графито-водный реактор**, ГВР, ВРГ или уран-графитовый реактор. В качестве замедлителя в таком типе реактора используется графит, в качестве теплоносителя – обычная вода. Схема работы АЭС, запущенной впервые в мире, основывалась на графито-водном реакторе. Сегодня такие реакторы используют редко, большинство из них расположены в России.
- **PHWR (pressurised heavy water reactor) — тяжеловодный реактор**. В таких реакторах в качестве теплоносителя и замедлителя используется тяжелая вода (D_2O), по-другому ее называют тяжеловодородной водой или оксидом дейтерия. С химической точки зрения оксид дейтерия идеальный замедлитель и теплоноситель, т.к. ее атомы наиболее эффективно взаимодействуют с нейтронами урана по сравнению с другими веществами.

Схема работы АЭС с двухконтурным водо-водяным энергетическим реактором



- Главное различие ТЭС и АЭС – это топливо. На атомной электростанции применяется уран – предварительно обогащенная природная руда, и пар производится посредством расщепления ядра, а не сжигания нефти, газа или угля.
- В биологически защищенном здании реактора располагается реактор (*ядро реактора*), в активной зоне которого располагаются *тепловыделяющие элементы* ТВЭЛы. Именно в ТВЭЛлах атомы урана во время расщепления высвобождаются элементы атома – нейтроны. Нейтроны сталкиваются с атомами урана, в результате выделяется тепло. необходимое для выработки электричества.
- Теплоноситель *первого контура*, циркуляция которого обеспечивается насосом (*помпой*), доставляется в *парогенератор*. Парогенератор является устройством, в котором тепло теплоносителя первого контура передается теплоносителю *второго контура*, в результате чего теплоноситель второго контура переходит в парообразное состояние под высоким давлением. Пар теплоносителя второго контура приводит во вращение *турбину*. Отработанный пар конденсируется и охлаждается водой специально созданного водохранилища.

- В зависимости от вида и агрегатного состояния теплоносителя создаётся тот или иной термодинамический цикл АЭС.
- Выбор верхней температурной границы термодинамического цикла определяется максимально допустимой температурой оболочек *тепловыделяющих элементов* (ТВЭЛ), содержащих ядерное горючее, допустимой температурой собственно ядерного горючего, а также свойствами теплоносителя, принятого для данного типа реактора.
- На АЭС с *водяным теплоносителем*, тепловой реактор которой охлаждается водой, обычно пользуются низкотемпературными паровыми циклами.
- Вода после поступления с помощью насосов в активную зону реактора, нагревается с 250 до 300 градусов и выходит с “другой стороны” реактора. Это называется *первым контуром*.
- После чего вода первого контура направляется в теплообменник, где взаимодействует со *вторым контуром*. В результате теплообмена во втором контуре образуется пар под высоким давлением, который поступает на лопатки турбин. Турбины вращают вал электрогенератора.
- Реакторы с *газовым теплоносителем* позволяют применять относительно более экономичные циклы водяного пара с повышенными начальными давлением и температурой.

- При реакторах с *кипящим водяным* или высокотемпературным газовым теплоносителем возможна одноконтурная тепловая АЭС. В кипящих реакторах вода кипит в активной зоне, полученная пароводяная смесь сепарируется, и насыщенный пар направляется или непосредственно в турбину, или предварительно возвращается в активную зону для перегрева.
- В высокотемпературных *графито-газовых* реакторах возможно применение обычного газотурбинного цикла. Реактор в этом случае выполняет роль камеры сгорания.
- При работе реактора концентрация делящихся изотопов в ядерном топливе постепенно уменьшается, т. е. ТВЭЛы выгорают. Поэтому со временем их заменяют свежими. Ядерное горючее перезагружают с помощью механизмов и приспособлений с дистанционным управлением. Отработавшие ТВЭЛы переносят в бассейн выдержки, а затем направляют на переработку.
- К реактору и обслуживающим его системам относятся: собственно реактор с биологической защитой, теплообменники, насосы или газодувные установки, осуществляющие циркуляцию теплоносителя; трубопроводы и арматура циркуляционного контура

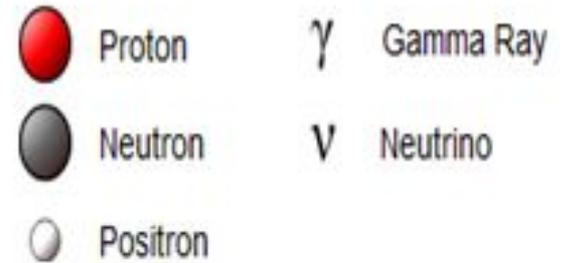
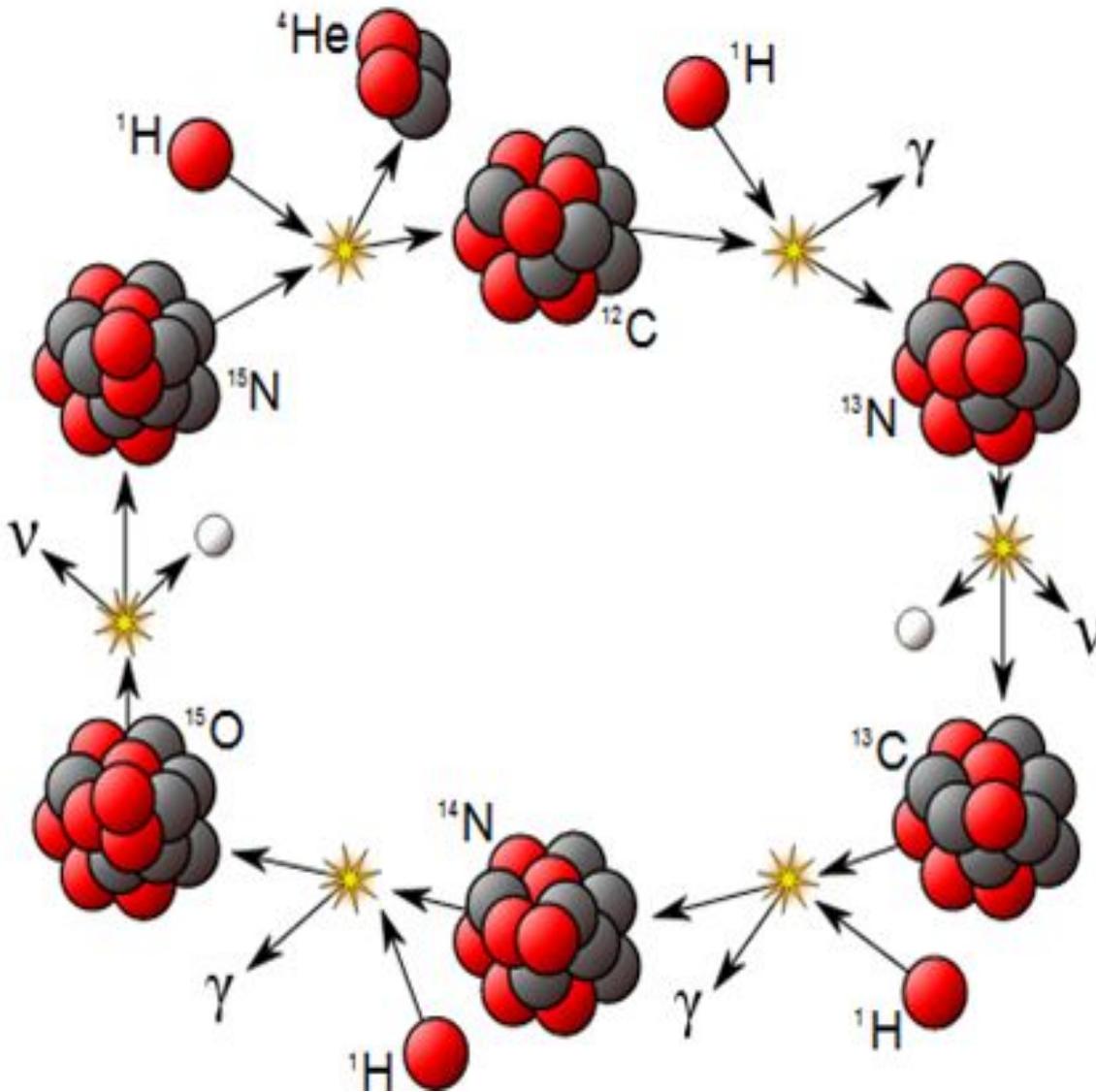
Технология ω_{12}^4 - подготовка топлива

- Класс $k=4$ соответствует преобразованию $U_1 \Rightarrow U_2$, при котором U_1 – исходная внутренняя энергия добытого ядерного топлива в единице объема, U_2 - внутренняя энергия преобразованного ядерного топлива в единице объема: $U_2 = U_T$
- $U_2 = a_{12} U_1$ (3.1)
- где a_{12} – коэффициент преобразования качества ядерного топлива в единице объема.
- В природном уране содержится три изотопа ^{235}U , ^{234}U и ^{238}U : (массовая доля 99,2745 %), (доля 0,72 %) и (доля 0,0055 %)
- Изотоп ^{238}U является относительно стабильным изотопом, не способным к самостоятельной цепной ядерной реакции, в отличие от редкого ^{235}U , который является первичным делящимся материалом в цепочке технологий ядерных реакторов и ядерного оружия.
- Однако для многих применений доля изотопа ^{235}U в природном уране мала и подготовка ядерного топлива обычно включает стадию обогащения урана.

Технология ω_{23}^3 – ядерной реакции «сгорание ядерного топлива»

- Материальными носителями технологии являются: ядерное топливо и участвующие в ядерной реакции «разогретые» атомные ядра и элементарные частицы,
- Класс $k=3$ соответствует преобразованию $U_2 \Rightarrow W_3$, при котором U_2 - внутренняя энергия обогащенного ядерного топлива в единице объема, W_3 - тепловая энергия ядерной реакции, полученная в реакторе.
- Тепловая энергия ядерная реакция — это процесс взаимодействия атомного ядра с другим ядром или элементарной частицей, который может сопровождаться изменением состава и строения ядра.
- Последствием взаимодействия может стать деление ядра, испускание элементарных частиц или фотонов. Кинетическая энергия вновь образованных частиц

Схема ядерной реакции



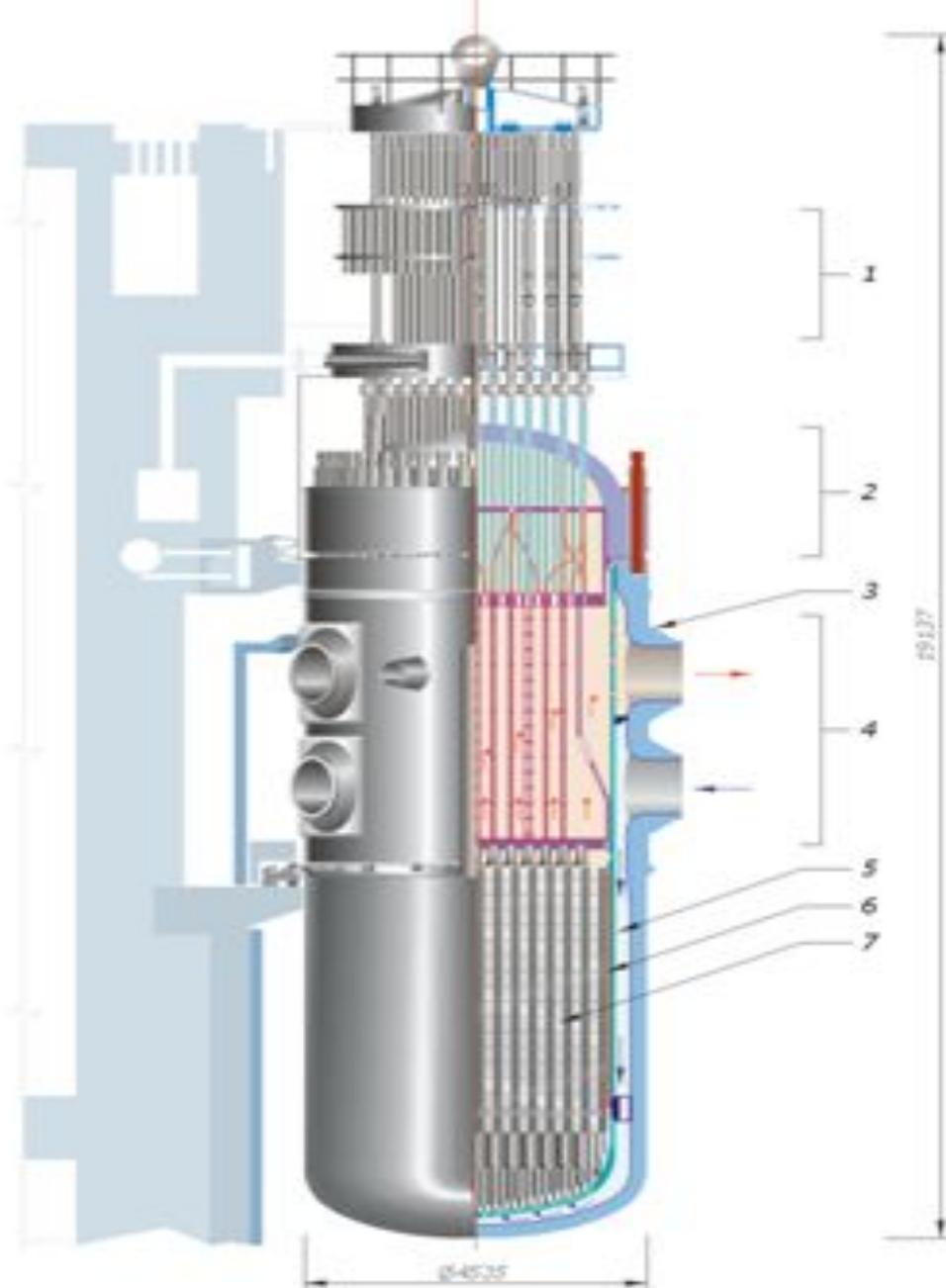
- Согласно теории, разработанной Нильсом Бором, ядерная реакция идёт в два этапа. В начале исходные частицы образуют промежуточное (составное) ядро за ядерное время, то есть время, необходимое для того, чтобы частица пересекла ядро, примерно равное 10^{-23} — 10^{-21} с.
- При этом составное ядро всегда образуется в возбуждённом состоянии, так как оно обладает избыточной энергией, приносимой частицей в ядро в виде энергии связи нуклона в составном ядре и части его кинетической энергии, которая равна сумме кинетической энергии ядра-мишени ^{235}U с массовым числом A и частицы в системе центра инерции.
- При распаде урана происходит выделение тепла, сопровождаемое выбросом двух-трех нейтронов. По статистическим данным — 2,5. Эти нейтроны сталкиваются с другими атомами урана. При делении урана превращается в нестабильный изотоп, который практически сразу же распадается на ^{92}Kr и ^{141}Ba — эти самые 2–3 нейтрона. Распад сопровождается выделением энергии в виде гамма излучения и тепла.

- Атомы делятся, количество распадов увеличивается в геометрической прогрессии, что в конечном итоге приводит к молниеносному, по нашим меркам высвобождению огромного количества энергии — происходит атомный взрыв, как следствие **неуправляемой** цепной реакции.
- В ядерном реакторе организуется **управляемая** ядерная реакция.
- Энергия, выделяющаяся при делении каждого ядра ${}^{235}\text{U}$, составляет в среднем около 200 МэВ. Минералы, используемые для добычи урана, содержат, как правило, около 1 г на 1 кг урановой руды (например *настуран*).
- Поскольку изотопное содержание в природном уране всего 0,7% получаем, что *на каждый килограмм* добытой руды будет приходиться $1,8 \cdot 10^{19}$ атомов урана. Если все эти атомы в результате цепной ядерной реакции поделятся, то выделится $3,6 \cdot 10^{27}$ эВ

- Энергия ядерной реакции (или тепловой эффект реакции) измеряется в *электронвольтах* (эВ) и рассчитывается по соотношению:
- $W_3 = 931,5 (m_1 - m_2)$ (МэВ) (3.2)
- где m_1 сумма масс частиц до реакции
- m_2 сумма масс частиц после реакции
- Энергия W_3 ядерной реакции измеряется в *электронвольтах* (эВ)
- Один электронвольт равен энергии, необходимой для переноса элементарного заряда в электростатическом поле между точками с разницей потенциалов в 1 В. Так как работа при переносе заряда q равна qU (где U — разность потенциалов), а элементарный заряд составляет $1,602\ 176\ 6208(98) \cdot 10^{-19}$ Кл[3], то: **1 эВ = 1,602 10^{-19} Дж**
- Один *мегаэлектронвольт* (МэВ) : $1\ \text{МэВ} = 1,602\ 10^{-13}$ Дж
- Та $\eta_{2-3} = (W_3 - \Delta U_{2-3})/W_3$ коэффициент η_{2-3} полезного действия процесса «горения ядерного топлива» определяется

Технология ω_{34}^1 теплопередача в реакторе

- Материальными носителями технологии теплопередачи в реакторе являются: участвующие в ядерной реакции «разогретые» атомные ядра и элементарные частицы, осуществляющие излучение (радиацию) тепловой энергии, и масса тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), собранных в кассеты
- Класс $k=1$ соответствует преобразованию $W_3 \Rightarrow W_4$; при котором W_3 – тепловая энергия «разогретых» атомных ядер и элементарные частицы, участвующие в ядерной реакции, W_4 – тепловая энергия массы m^M ТВЭЛов, собранных в кассеты.
- В СССР первый реактор был построен под руководством академика И. В. Курчатова. Реактор Ф-1 заработал 25 декабря 1946 г. Реактор был в форме шара, имел в диаметре около 7,5 метров.
- В настоящее время в основном используют два типа ядерных реакторов ВВЭР (водоводяной энергетический реактор) и РБМК (реактор большой мощности канальный). Отличие в том, что РБМК — кипящий реактор, а ВВЭР использует воду под давлением в 120 атмосфер.



Каждый ядерный реактор промышленного типа представляет собой котел, сквозь который протекает теплоноситель. Как правило, это обычная вода (ок. 75% в мире), жидкий графит (20%) и тяжелая вода (5%). В экспериментальных целях использовался бериллий и предполагался углеводород.

Реактор ВВЭР-1000, представленный на рисунке 3.4, содержит:

- привод (1) системы управления защитой (СУЗ);
- крышку (2) реактора;
- корпус (3) реактора;
- блок (4) защитных труб (БЗТ);
- шахту (5) реактора;
- выгородку (6) активной зоны реактора;
- топливные сборки (7) (ТВС), объединяющие тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) и регулирующие стержни.

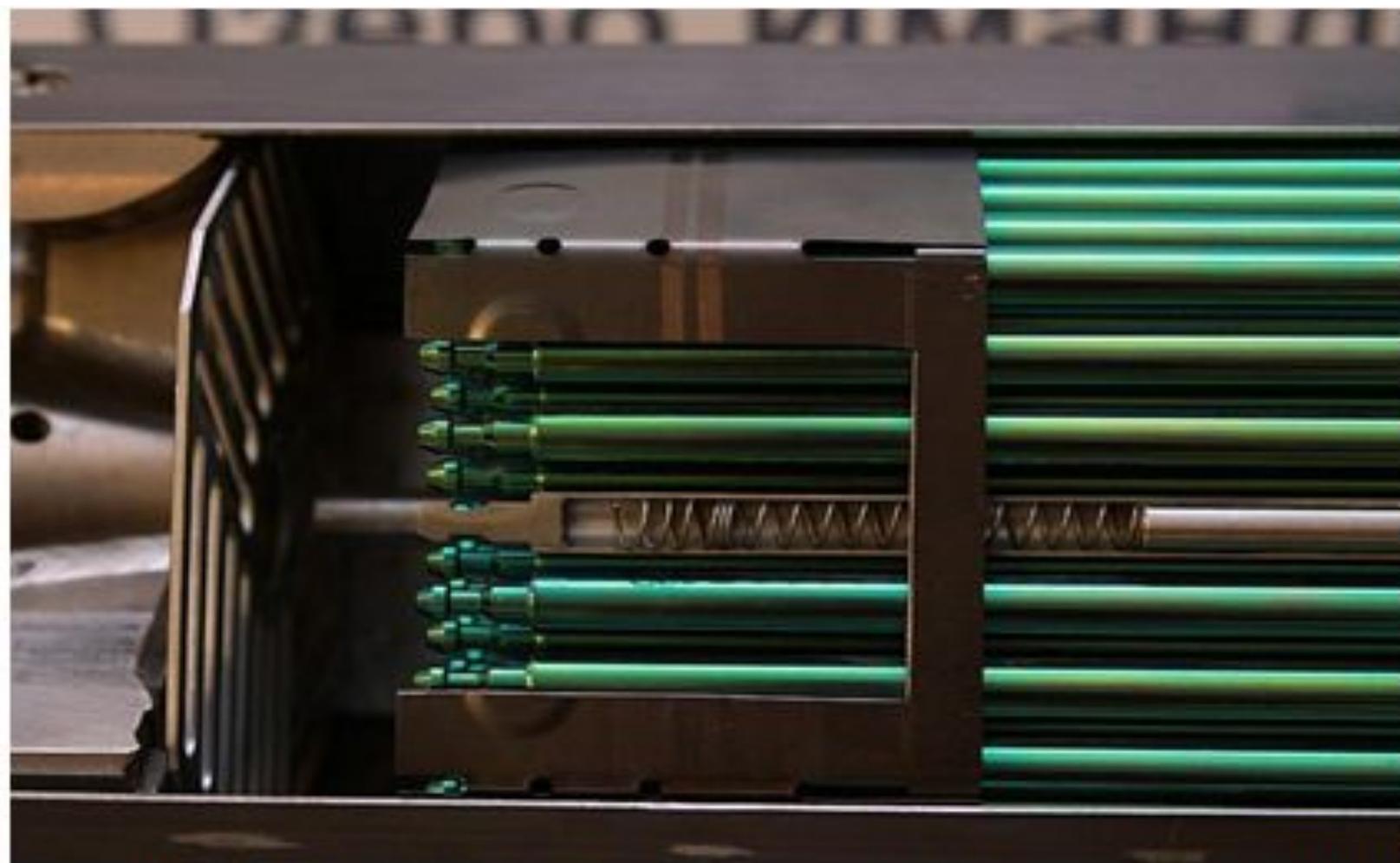


Рис. 3.6. Кассета ядерного реактора с установленными ТВЭЛаами в кассете выделены зеленым ¶

Активная зона реактора состоит из сотен кассет, поставленных вертикально и объединенных вместе металлической оболочкой — корпусом, играющим также роль отражателей нейтронов. ¶

Ядерные реакции происходят в тепловыделяющих элементах ТВЭЛах, которые представляют собой стержни в циркониевой оболочке с ниобийным легированием, внутри которых расположены таблетки из диоксида урана. ¶

Каждый ТВЭЛ включает в себя пружинную систему удержания топливных таблеток на одном уровне, что позволяет точнее регулировать глубину погружения/выведения топлива в активную зону. ¶



Рис.3.5. Устройство ТВЭЛА реактора РБМК: 1 — заглушка; 2 — таблетки диоксида урана; 3 — оболочка из циркония; 4 — пружина; 5 — втулка; 6 — наконечник. ¶

ТВЭЛы собраны в кассеты шестигранной формы, каждая из которых включает в себя несколько десятков ТВЭЛов. По каналам в каждой кассете протекает теплоноситель. ¶

- **Ядерная энергетика** (Атомная энергетика) — это отрасль энергетики, занимающаяся производством электрической и тепловой энергии путём преобразования ядерной энергии.
- Главное отличие АЭС от ТЭС состоит в использовании *ядерного горючего* вместо органического топлива.
- Обычно для получения ядерной энергии *используют цепную ядерную реакцию деления ядер урана-235 или плутония..*
- Ядерная энергия производится в атомных электрических станциях, используется на атомных ледоколах, атомных подводных лодках; США осуществляют программу по созданию ядерного двигателя для космических кораблей, кроме того, предпринимались попытки создать ядерный двигатель для самолётов (атомолётов) и «атомных» танков.

Атомная электростанция (АЭС) — ядерная установка для производства энергии

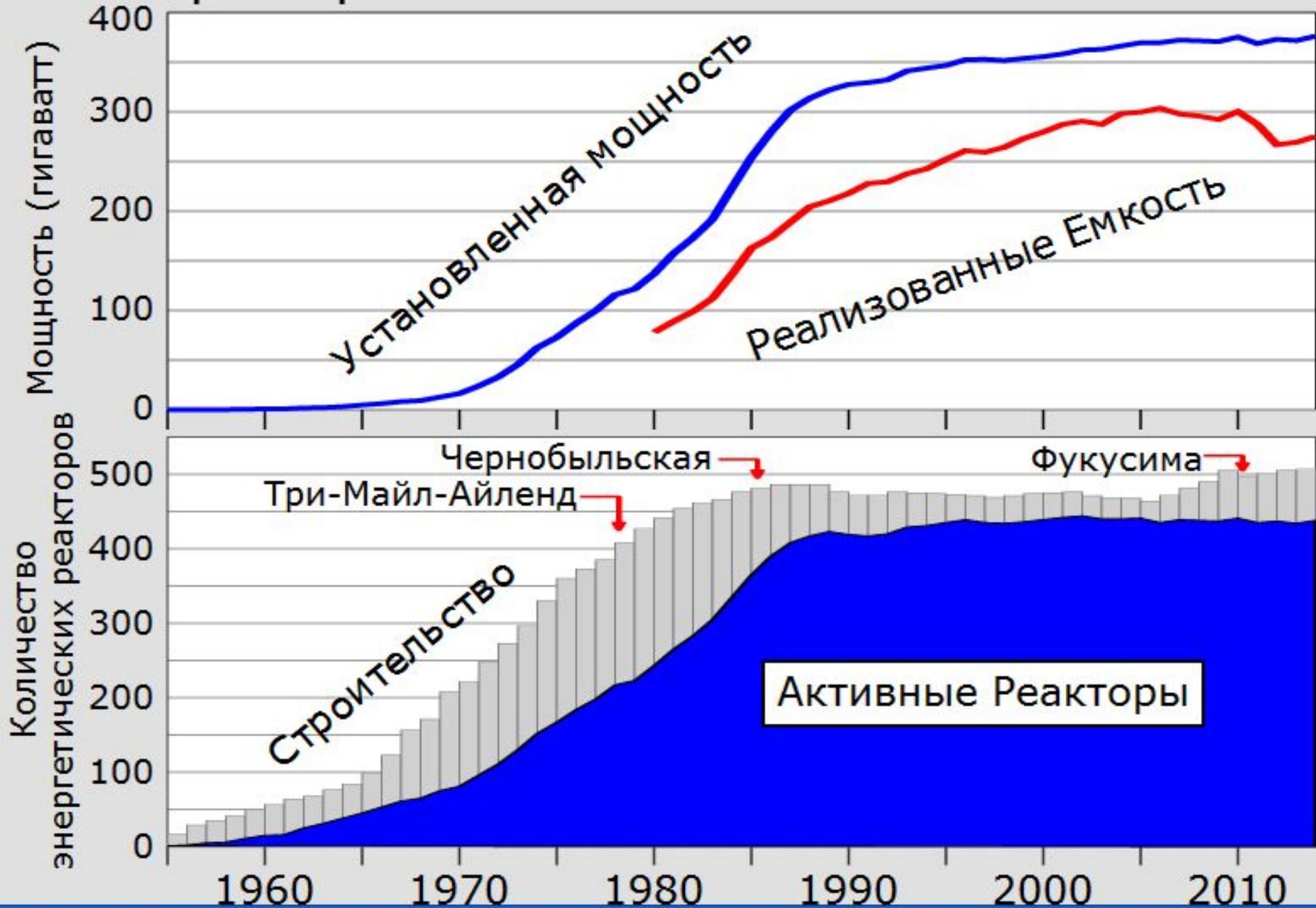
- в заданных режимах
- в заданных условиях применения,
- располагающаяся в пределах определённой проектом территории,
- на которой для осуществления этой цели используются ядерный реактор (реакторы)
- и комплекс необходимых систем, устройств, оборудования и сооружений
- с необходимыми работниками (персоналом), предназначенная для производства электрической энергии

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

- В мае 1950 года близ посёлка Обнинское Калужской области начались работы по строительству первой в мире АЭС.
- Первая в мире промышленная атомная электростанция мощностью 5 МВт была запущена 27 июня 1954 года в СССР, в городе Обнинске, расположенном в Калужской области.
- В 1958 году была введена в эксплуатацию 1-я очередь Сибирской АЭС мощностью 100 МВт, впоследствии полная проектная мощность была доведена до 600 МВт. В том же году развернулось строительство Белоярской промышленной АЭС, а 26 апреля 1964 года генератор 1-й очереди дал ток потребителям.
- В сентябре 1964 года был пущен 1-й блок Нововоронежской АЭС мощностью 210 МВт. Второй блок мощностью 365 МВт запущен в декабре 1969 года. В 1973 году запущена Ленинградская АЭС.
- За пределами СССР первая АЭС промышленного назначения мощностью 46 МВт была введена в эксплуатацию в 1956 году в Колдер-Холле (Великобритания). Через год вступила в строй АЭС (англ.)русск. мощностью 60 МВт в Шиппингпорте (США).

- В 1979 году произошла серьёзная авария на АЭС Три-Майл-Айленд, после чего США прекратили строительство атомных реакторов, в планах постройка новых 2 реакторов на базе старой АЭС лишь к 2017
- В 1986 году — масштабная катастрофа на Чернобыльской АЭС, которая, помимо непосредственных последствий, серьёзно отразилась на всей ядерной энергетике в целом. Она вынудила специалистов всего мира пересмотреть проблему безопасности АЭС.
- Крупнейшая АЭС в Европе — Запорожская АЭС в г. Энергодаре (Украина), строительство которой началось в 1980 году. С 1996 года работают 6 энергоблоков суммарной мощностью 6 ГВт.
- Крупнейшая АЭС в мире (по установленной мощности) — АЭС Касивадзаки-Карива (на 2008 год) находится в Японском городе Касивадзаки префектуры Ниигата. В эксплуатации находятся пять кипящих ядерных реакторов (BWR) и два улучшенных кипящих ядерных реакторов (ABWR), суммарная мощность которых составляет 8,212 ГВт.
- Последняя крупная авария на АЭС произошла в марте 2011 года в Японии в префектуре Фукусима. Авария на АЭС Фукусима-1 произошла в результате воздействия на АЭС сильного землетрясения и последовавшего за ним цунами.

История промышленности Глобальный АЭС



Технологические процессы производства электроэнергии на атомных электростанциях

Процесс процессы «горения» — расщепления ядер ^{235}U , с выделением огромного количества тепла

- изготовление тепловыделяющих сборок (ТВС) ;
- удаление и хранение ТВС
- **Первый цикл теплообмена**
- **Второй цикл теплообмена**
- **Преобразование полезной энергии**
- электрическая энергия
- тепловая энергия
- **Охлаждение неиспользованной энергии**

Атомные электростанции классифицируются в соответствии с типом используемых реакторов на тепловых нейтронах, в том числе:

- **ВОДО-ВОДЯНЫМИ**
- **КИПЯЩИМИ**
- **ТЯЖЕЛОВОДНЫМИ**
- **ГАЗООХЛАЖДАЕМЫМИ**
- **ГРАФИТО-ВОДНЫМИ**
- **ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ ГАЗООХЛАЖДАЕМЫМИ**
- **ТЯЖЕЛОВОДНЫМИ ГАЗООХЛАЖДАЕМЫМИ**
- **ТЯЖЕЛОВОДНЫМИ ВОДООХЛАЖДАЕМЫМИ**
- **КИПЯЩИМИ ТЯЖЕЛОВОДНЫМИ**
- **С РЕАКТОРАМИ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ**

Ядерный реактор, принцип действия

- Ядерный реактор, устройство в котором протекает управляемая цепная ядерная реакция с выделением тепла
- Ядра делятся при попадании в них нейтрона, при этом получаются новые нейтроны и осколки деления. Нейтроны деления и осколки деления обладают большой кинетической энергией. В результате столкновений осколков с другими атомами эта кинетическая энергия быстро преобразуется в тепло.
- Прототип ядерного реактора был построен в декабре 1942 года в США под руководством Э. Ферми. Это была так называемая “Чикагская стопка”. Chicago Pile (впоследствии слово “Pile” наряду с другими значениями стало обозначать ядерный реактор). Такое название дали ему из-за того, что он напоминал собой большую стопку графитовых блоков, положенных один на другой.

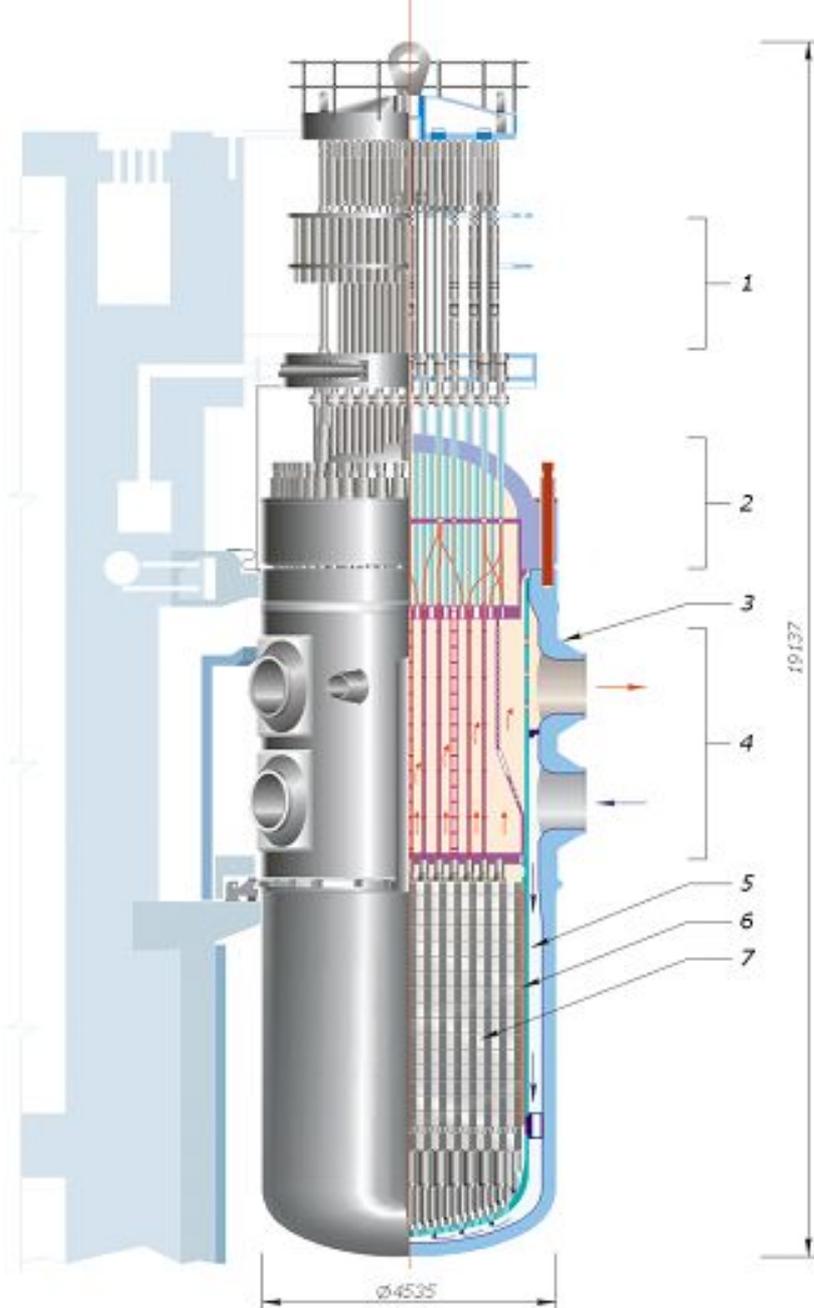
Принцип действия атомного реактора – цепная реакция.

- При распаде урана U_{235} происходит выделение тепла, сопровождаемое выбросом двух трех нейтронов. По статистическим данным — 2,5. Эти нейтроны сталкиваются с другими атомами урана U_{235} . При столкновении уран U_{235} превращается в нестабильный изотоп U_{236} , который практически сразу же распадается на Kr_{92} и Ba_{141} + эти самые 2–3 нейтрона. Распад сопровождается выделением энергии в виде гамма излучения и тепла.
- Атомы делятся, количество распадов увеличивается в геометрической прогрессии, что в конечном итоге приводит к молниеносному, по нашим меркам высвобождению огромного количества энергии — происходит атомный взрыв, как следствие **неуправляемой** цепной реакции.
- В ядерном реакторе организуется **управляемая** ядерная реакция.
- В СССР первый реактор был построен под руководством академика И. В. Курчатова. Реактор Ф-1 заработал 25 декабря 1946 г. Реактор был в форме шара, имел в диаметре около 7,5 метров.

Ресурсы, потребляемые АЭС

- Природный уран — это смесь в основном неделящегося изотопа урана ^{238}U (более 99 %) и делящегося изотопа ^{235}U (0,71 %).
- Для работы реакторов АЭС требуется обогащение урана. Для этого природный уран направляется на обогатительный завод, после переработки на котором 10 % приобретают обогащение до нескольких процентов (3,3—4,4 % для энергетических реакторов)

Энергия, выделяющаяся при делении каждого ядра ^{235}U , составляет в среднем около 200 МэВ. Минералы, используемые для добычи урана, содержат, как правило, около 1 г на кг урановой руды (настуран, например). Поскольку изотопное содержание ^{235}U в природном уране всего 0,7 %, получаем, что на каждый килограмм добытой руды будет приходиться $1,8 \cdot 10^{19}$ атомов ^{235}U . Если все эти атомы ^{235}U из 1 грамма урана поделятся, то выделится $3,6 \cdot 10^{27}$ эВ = $5,8 \cdot 10^8$ Дж энергии. Для сравнения, при сжигании 1 кг угля наилучшего качества (антрацит) выделяется энергия около $4 \cdot 10^7$ Дж энергии, то есть для получения ядерной энергии, содержащейся в 1 кг природного урана, необходимо сжечь более 10 тонн антрацита.



В настоящее время в основном используют два типа ядерных реакторов ВВЭР (водоводяной энергетический реактор) и РБМК (реактор большой мощности канальный).

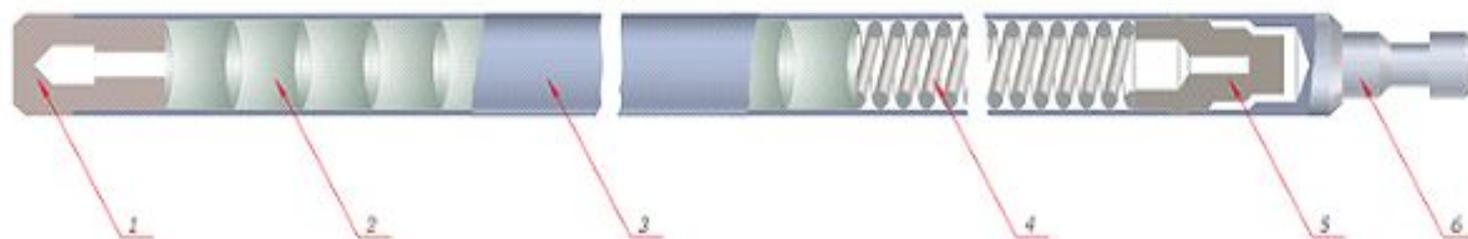
Отличие в том, что РБМК — кипящий реактор, а ВВЭР использует воду под давлением в 120 атмосфер.

Реактор ВВЭР 1000.

- 1 — привод СУЗ;
- 2 — крышка реактора;
- 3 — корпус реактора;
- 4 — блок защитных труб (БЗТ);
- 5 — шахта;
- 6 — выгородка активной зоны;
- 7 — топливные сборки (ТВС) и регулирующие стержни;

Каждый ядерный реактор промышленного типа представляет собой котел, сквозь который протекает теплоноситель. Как правило это обычная вода (ок. 75% в мире), жидкий графит (20%) и тяжелая вода (5%). В экспериментальных целях использовался бериллий и предполагался углеводород.

ТВЭЛ — (тепловыделяющий элемент). Это стержни в циркониевой оболочке с ниобийным легированием, внутри которых расположены таблетки из диоксида урана.

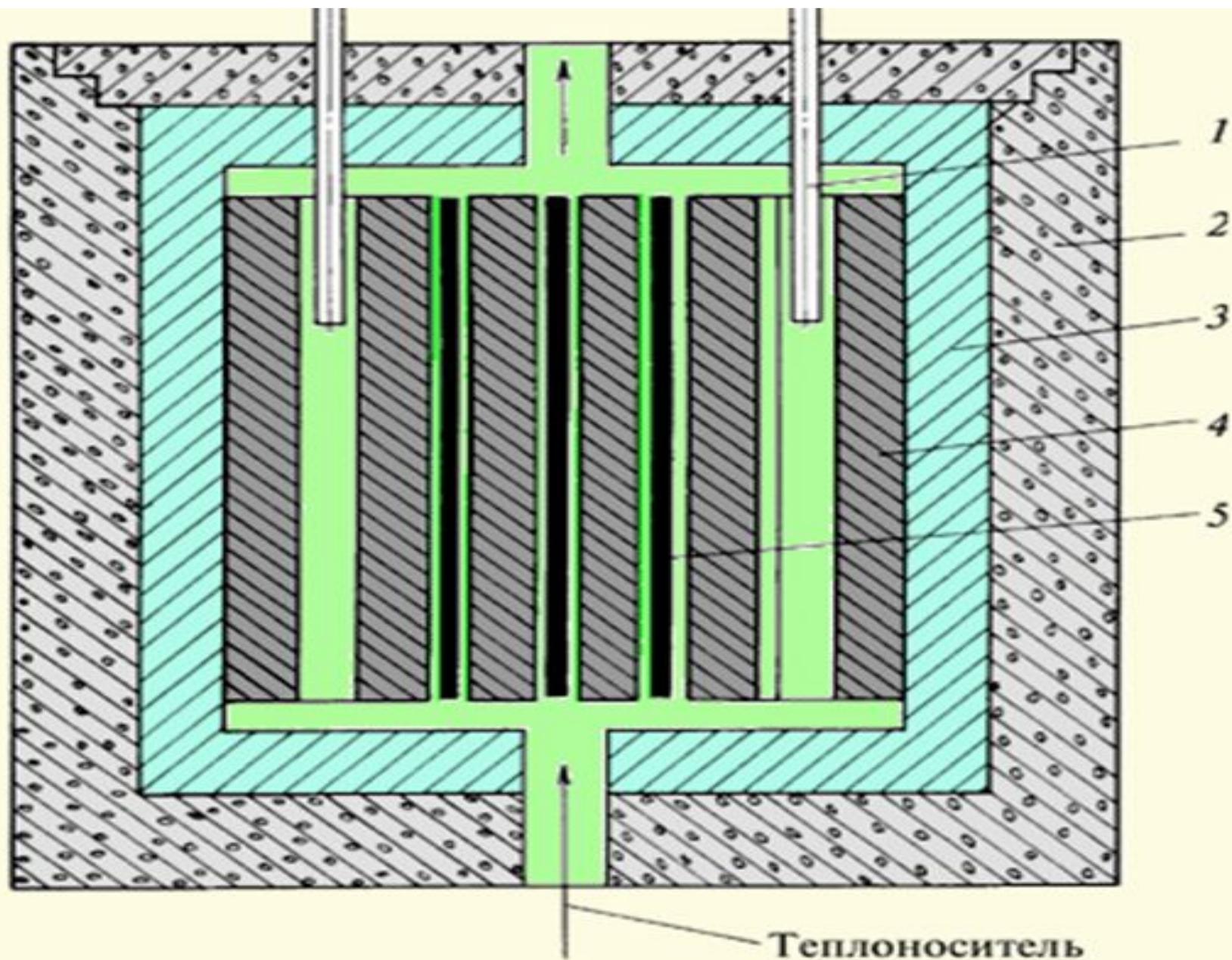


ТВЭЛ реактора РБМК. Устройство ТВЭЛА реактора РБМК: 1 — заглушка; 2 — таблетки диоксида урана; 3 — оболочка из циркония; 4 — пружина; 5 — втулка; 6 — наконечник.

Также ТВЭЛ включает в себя пружинную систему удержания топливных таблеток на одном уровне, что позволяет точнее регулировать глубину погружения/выведения топлива в активную зону. Они собраны в кассеты шестигранной формы, каждая из которых включает в себя несколько десятков ТВЭЛов. По каналам в каждой кассете протекает теплоноситель.

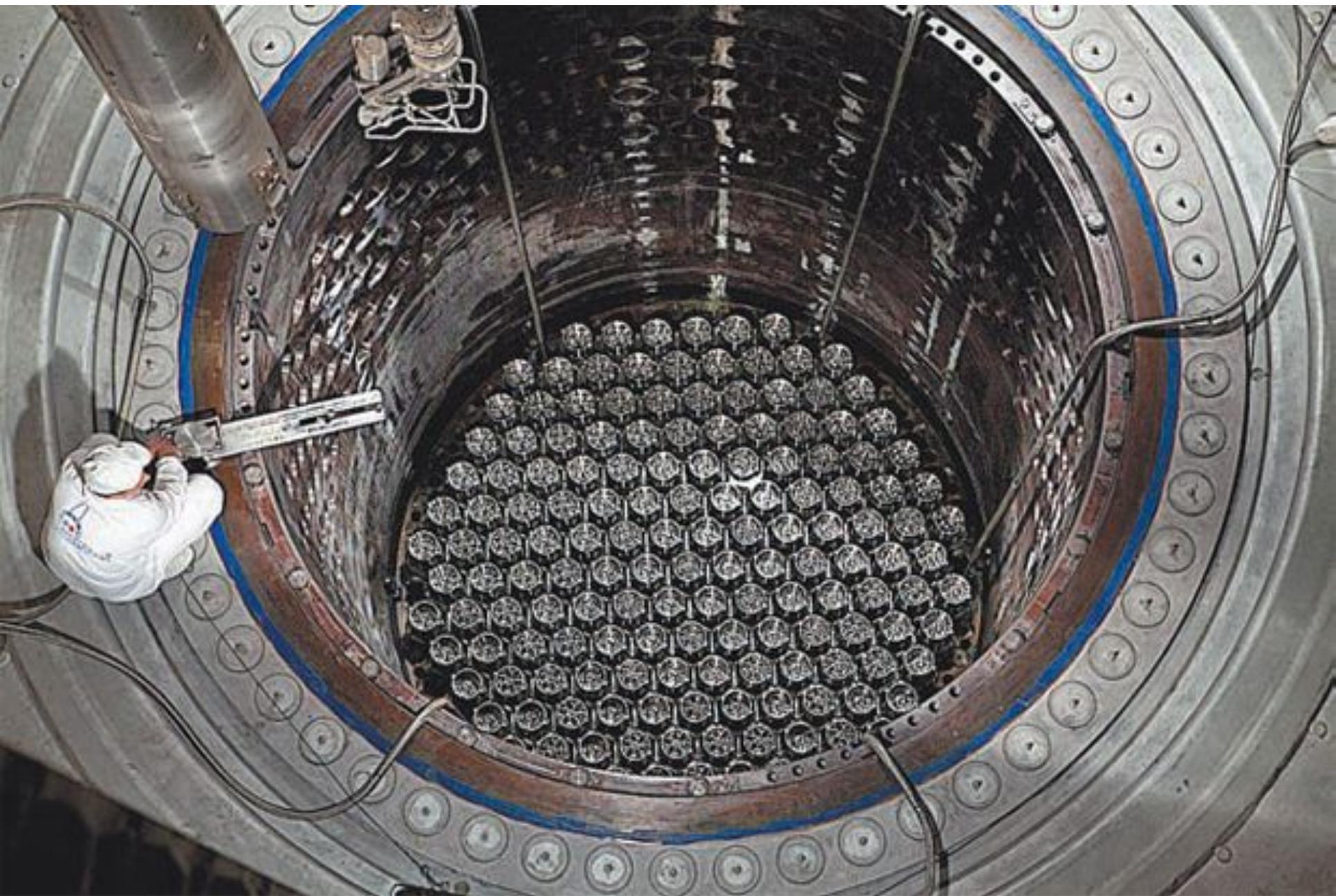
Принципиальная схема ядерного реактора

- Расщепление ядра делящегося элемента происходит вследствие попадания в него нейтрона. При этом возникают движущиеся с большой скоростью осколки деления (ядра других элементов) и 2—3 новых нейтрона, которые способны вызывать деление новых ядер.
- Образующиеся в результате деления нейтроны могут быть *быстрыми* (т.е. и *медленными* (тепловыми)). Вероятность захвата медленного нейтрона ядром и его последующего расщепления больше, чем быстрого нейтрона. Поэтому **ТВЭЛЫ** окружают *замедлителем* (обычно это вода, графитовая кладка и другие материалы).
- Изменяют мощность реактора с помощью стержней системы регулирования и защиты (СУЗ), выполненных из материалов хорошо поглощающих нейтроны. При опускании стержней поглощение нейтронов увеличивается, общее число нейтронов уменьшается, и мощность реактора также уменьшается вплоть до полной остановки

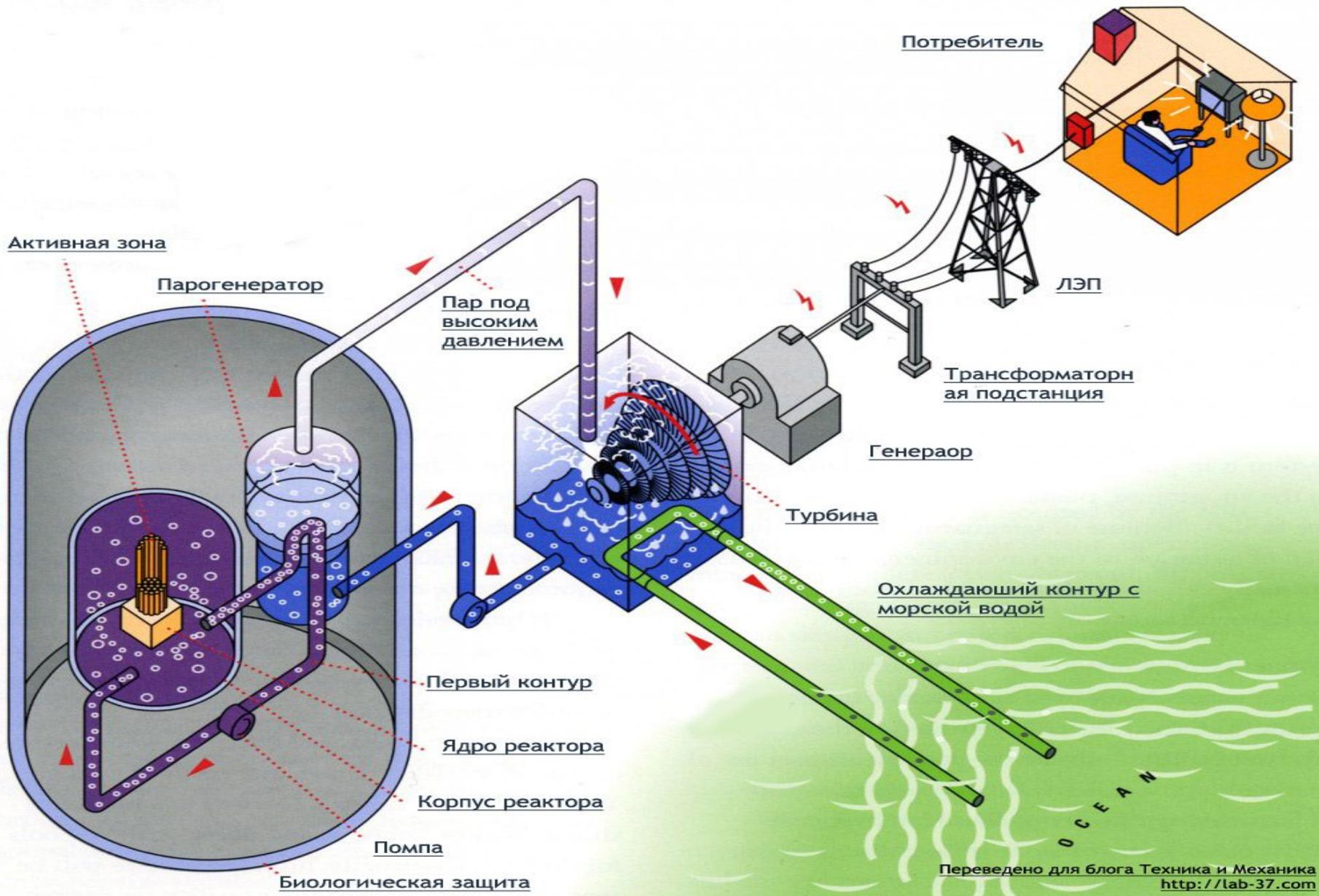


. Схема ядерного реактора на тепловых нейтронах

ВНУТРИ АТОМНОГО РЕАКТОРА



РАБОТА АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ



Турбинное отделение АЭС и сама турбина



Щит управления расположен в реакторном отделении, но в «чистой зоне» и на нем постоянно находятся: ведущий инженер по управлению реактором ведущий инженер по управлению турбинами ведущий инженер по управлению блоком начальник смены блока



Безопасность атомной электростанции

- Концепция глубоко эшелонированной защиты подразумевает наличие нескольких барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду. Очень похоже на принцип Кащея Бессмертного: топливо сгруппировано в таблетки, которые находятся в циркониевых ТВЭЛах, которые помещены в стальной корпус реактора, который помещен в железобетонную гермооболочку.
- Таким образом, разрушение одного из барьеров компенсируется следующим. Делается все, чтобы при любой аварии радиоактивные вещества не вышли за пределы зоны контролируемого доступа.
- Также, все системы имеют двух- и трехкратное резервирование, в соответствии с принципом единичного отказа, по которому система должна бесперебойно выполнять свои функции даже при отказе любого ее элемента.

• ТЕСТЫ 3

- 1. В чём сходство АЭС и ТЭС?
- 2. В чем различие АЭС и ТЭС?
- 3. Назовите типы используемых на АЭС реакторов.
- 4. Какие функции выполняют ТВЭЛ и ТВС?
- 5. Какие функции выполняют два цикла теплообмена АЭС?
- 6. Задача 1 Вода первого контура АЭС получает от ядерного реактора (ЯР) в каждую секунду количество теплоты 7 200 кДж и возвращает в ЯР 1 531,1 Ккалории. Каков КПД ядерного реактора?
- 7. Задача 2 Каков КПД идеальной паровой турбины, если пар поступает в турбину с температурой 480 С, а оставляет её при температуре 30 С?