

# **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

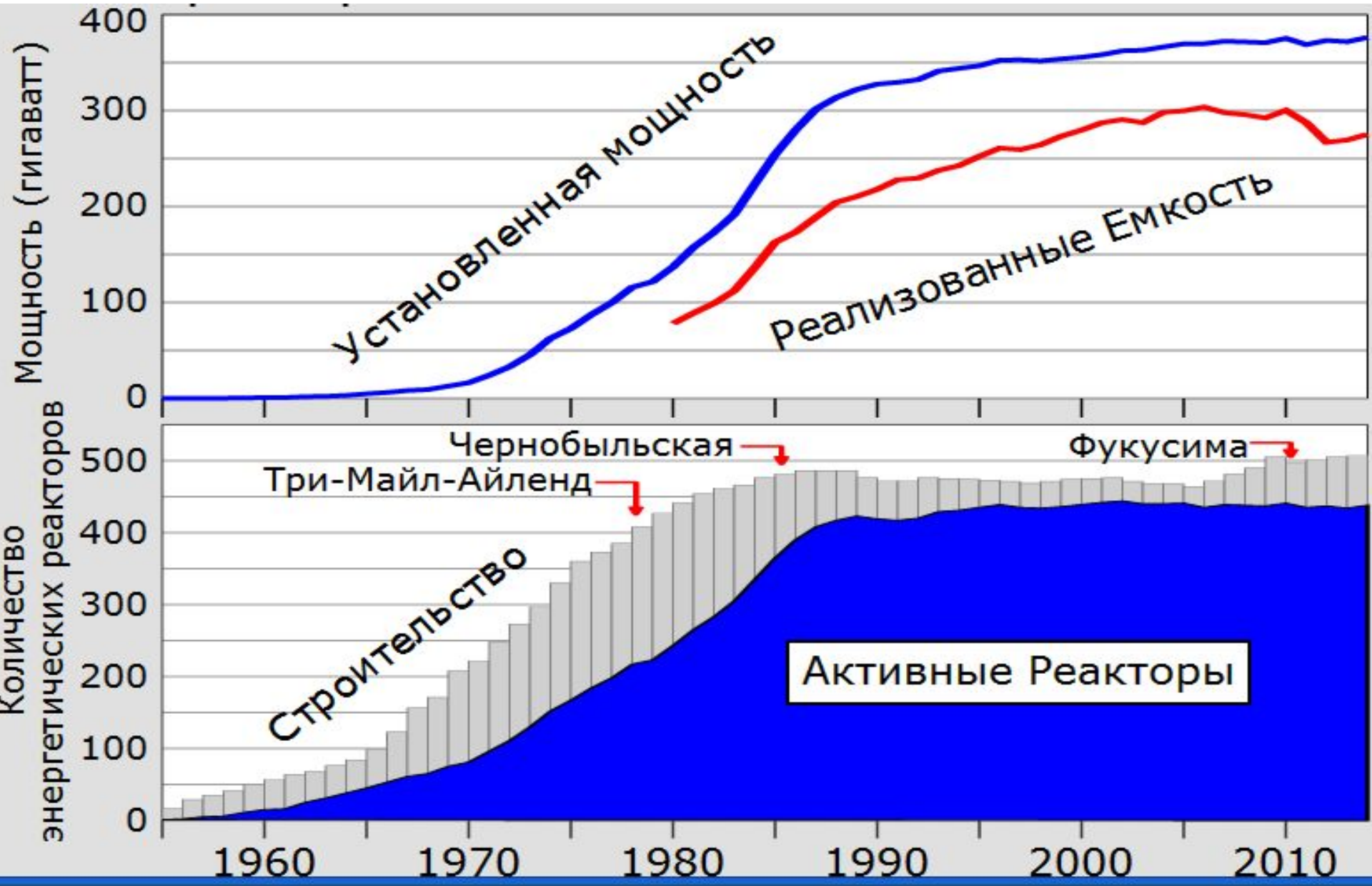
- в заданных режимах
- в заданных условиях применения,
- располагающаяся в пределах определённой проектом территории,
- на которой для осуществления этой цели используются ядерный реактор (реакторы)
- и комплекс необходимых систем, устройств, оборудования и сооружений
- с необходимыми работниками (персоналом),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

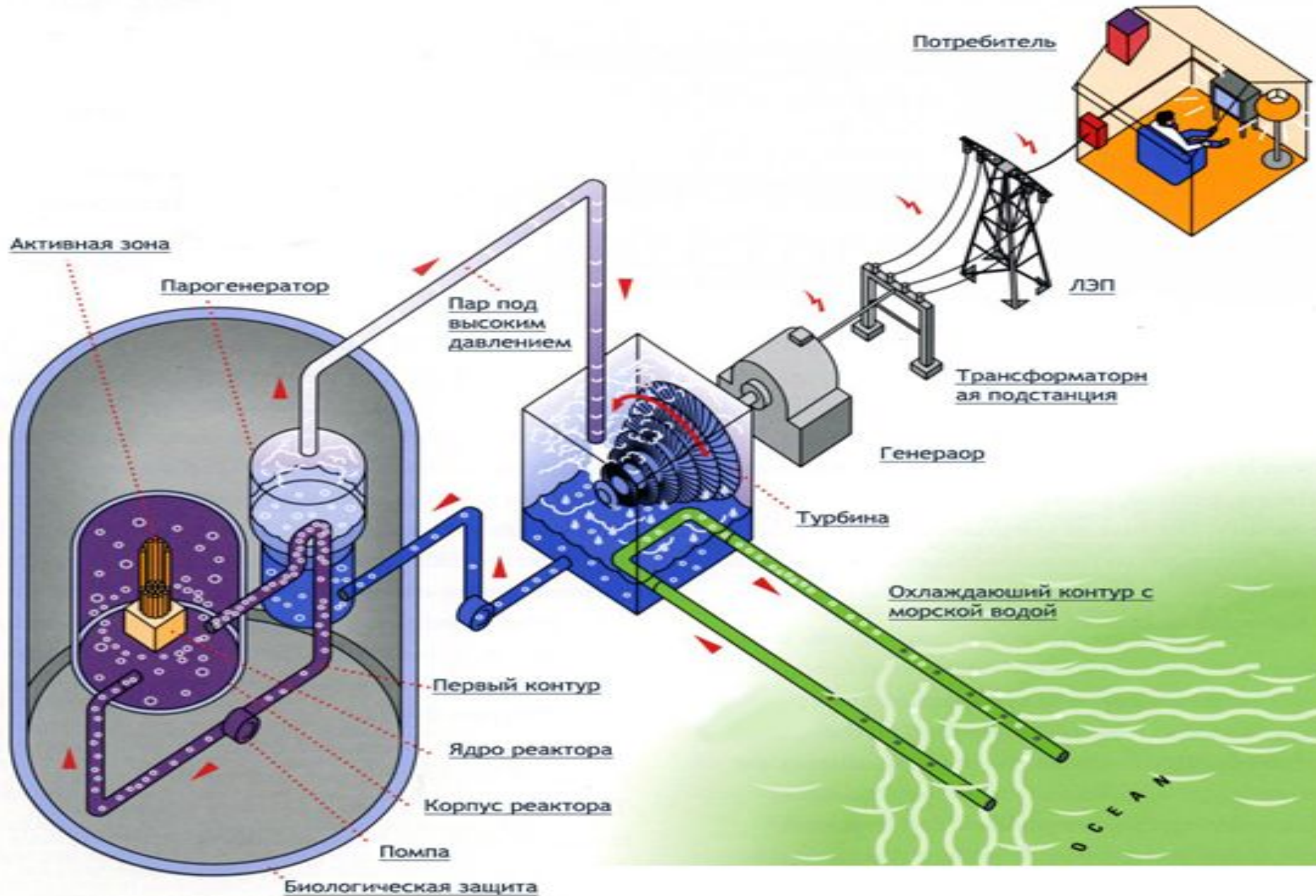
**Атомные электростанции классифицируются в соответствии с типом используемых реакторов на тепловых нейтронах, в том числе:**

- 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 $\omega_{12}^4$ - подготовка топлива

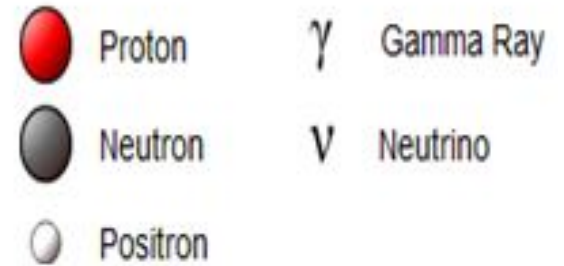
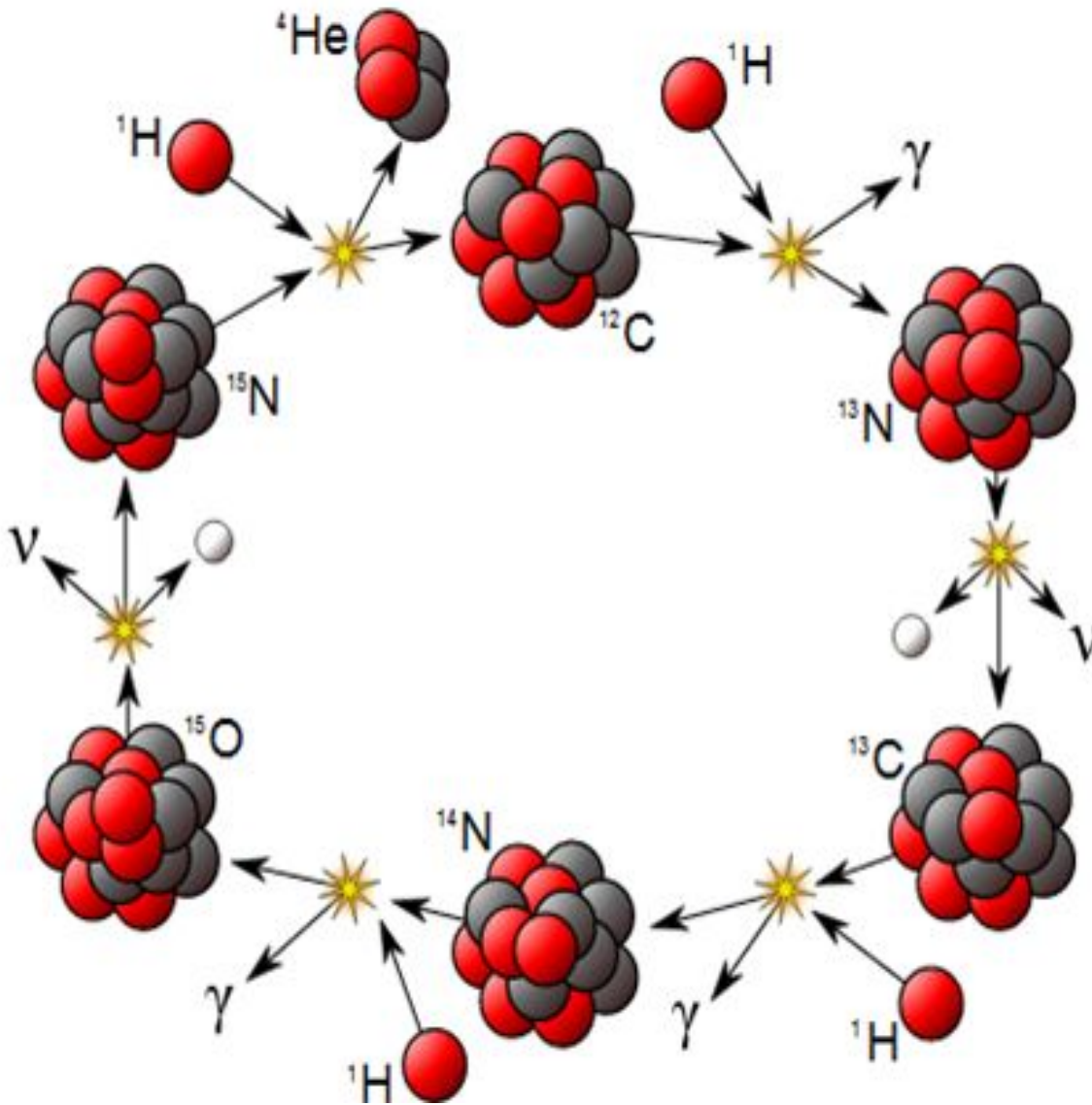
- Класс  $k=4$  соответствует преобразованию  $U_1 \Rightarrow U_2$ , при котором  $U_1$  – исходная внутренняя энергия добытого ядерного топлива в единице объема,  $U_2$  - внутренняя энергия преобразованного ядерного топлива в единице объема:  $U_2 = U_T$
- $U_2 = a_{12} U_1$  (3.1)
- где  $a_{12}$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

# Технология $\omega_{23}^3$ – 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  $^{235}\text{U}$  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  $^{92}\text{Kr}$  и  $^{141}\text{Ba}$  — эти самые 2–3 нейтрона. Распад сопровождается выделением энергии в виде гамма излучения и тепла.

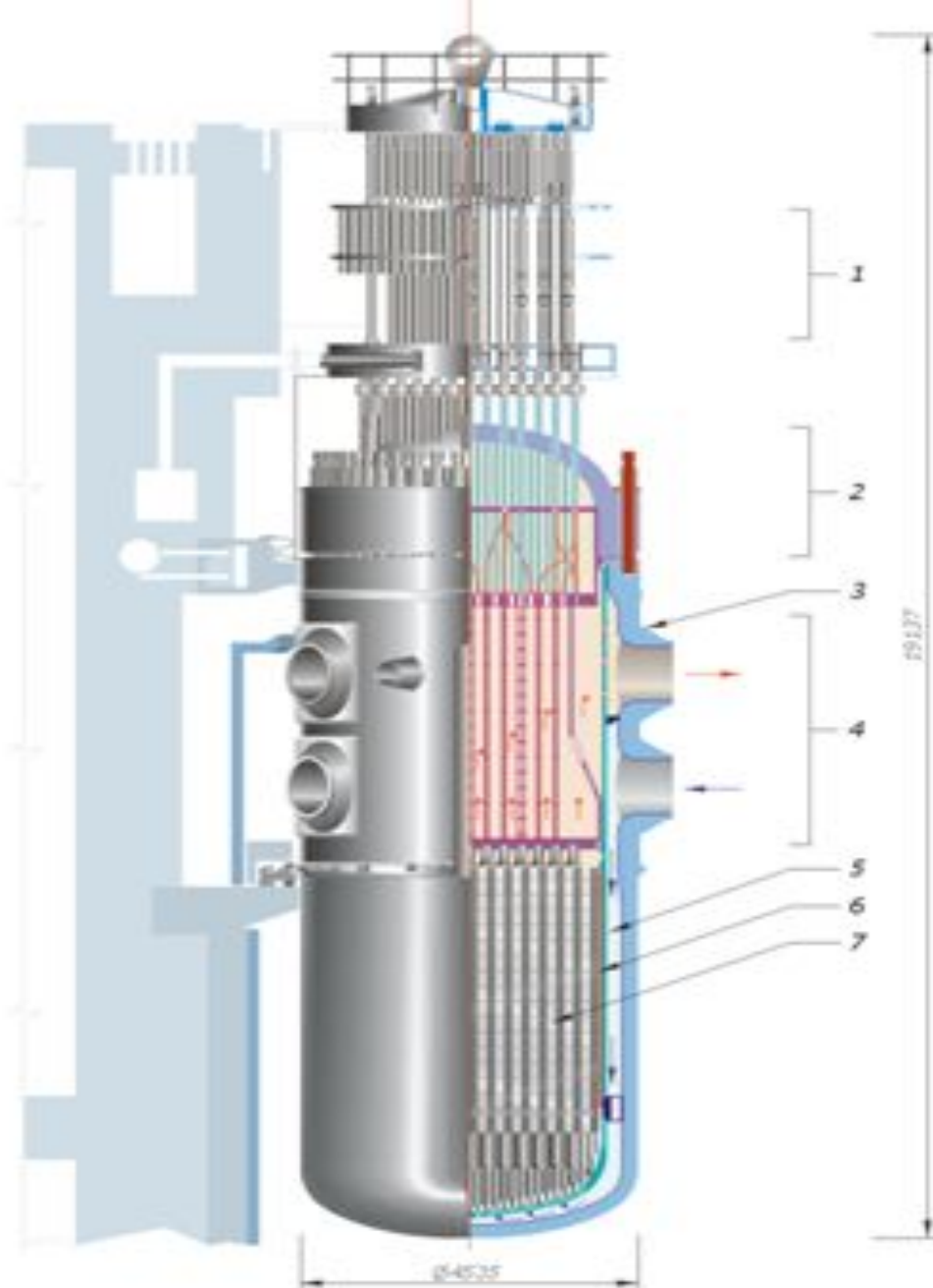


- Атомы делятся, количество распадов увеличивается в геометрической прогрессии, что в конечном итоге приводит к молниеносному, по нашим меркам высвобождению огромного количества энергии — происходит атомный взрыв, как следствие **неуправляемой** цепной реакции.
- В ядерном реакторе организуется **управляемая** 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:
- $W_3 = 931,5 (m_1 - m_2) \quad (\text{МэВ}) \quad (3.2)$
- 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) :  $1 \text{ МэВ} = 1,602 \cdot 10^{-13}$  Дж
- Та  $\eta_{2-3} = (W_3 - \Delta U_{2-3})/W_3$  коэффициент  $\eta_{2-3}$  полезного действия процесса «горения ядерного топлива» определяется

# Технология $\omega_{34}^1$ 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.



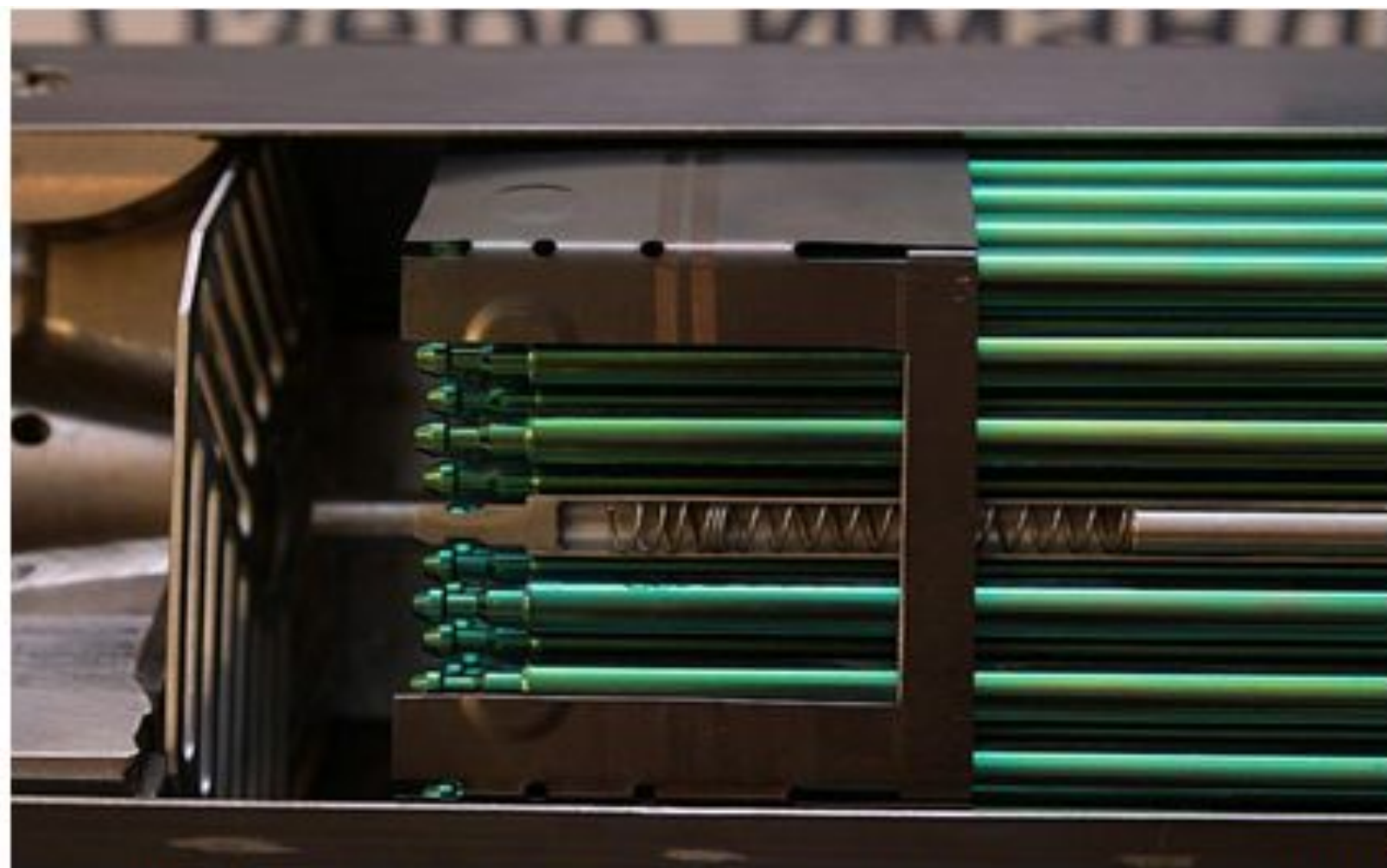


Рис. 3.6. Кассета ядерного реактора с установленными ТВЭЛами в кассете выделены зеленым ¶

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. ¶

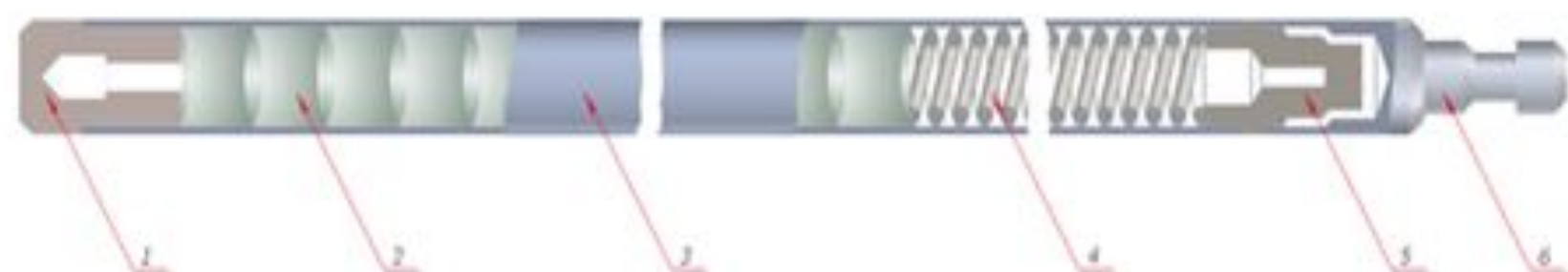


Рис.3.5. Устройство ТВЭЛА реактора РБМК: 1 — заглушка; 2 — таблетки диоксида урана; 3 — оболочка из циркония; 4 — пружина; 5 — втулка; 6 — наконечник. ¶

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

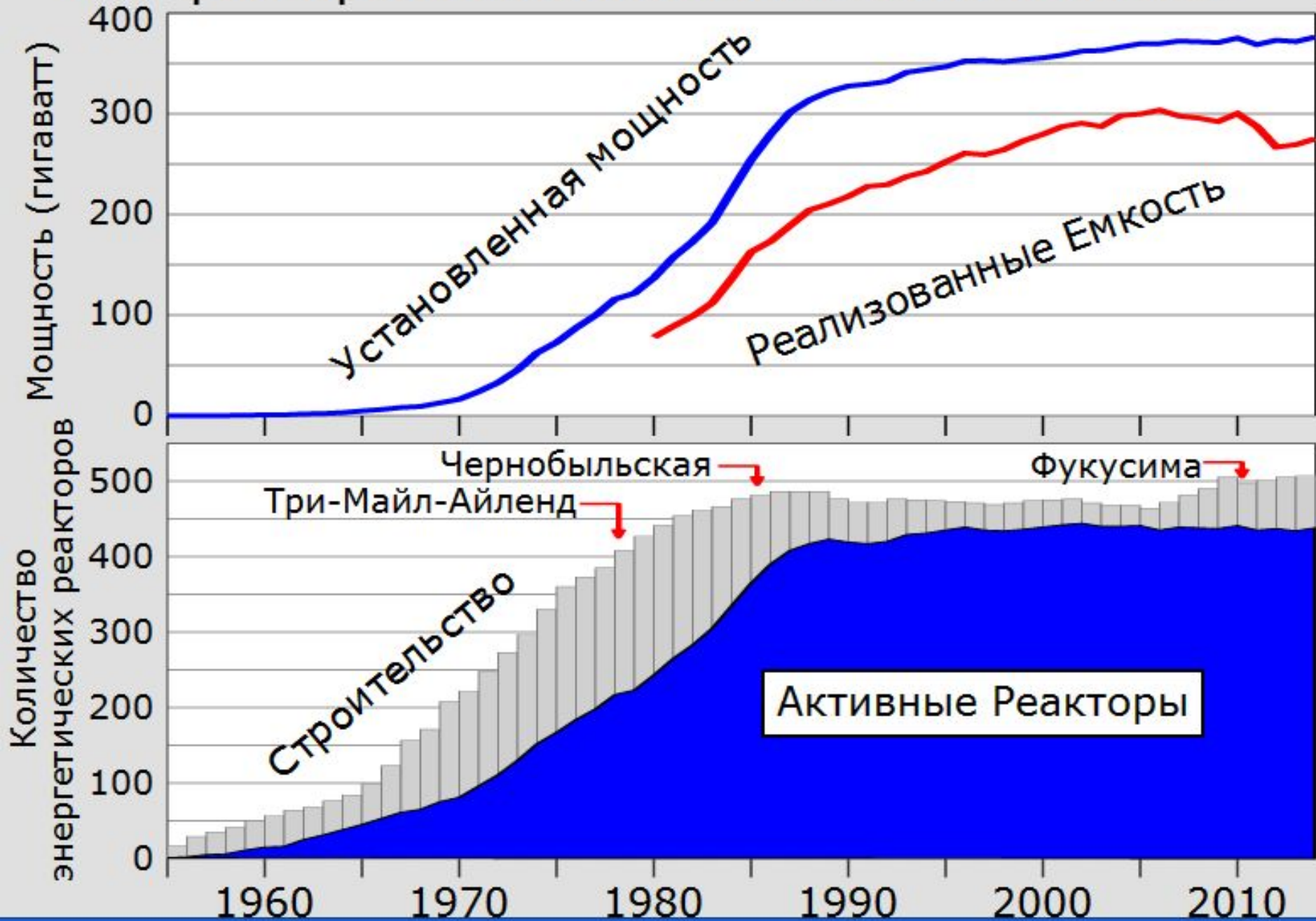
- в заданных режимах
- в заданных условиях применения,
- располагающаяся в пределах определённой проектом территории,
- на которой для осуществления этой цели используются ядерный реактор (реакторы)
- и комплекс необходимых систем, устройств, оборудования и сооружений
- с необходимыми работниками (персоналом), 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  $^{235}\text{U}$ , 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.

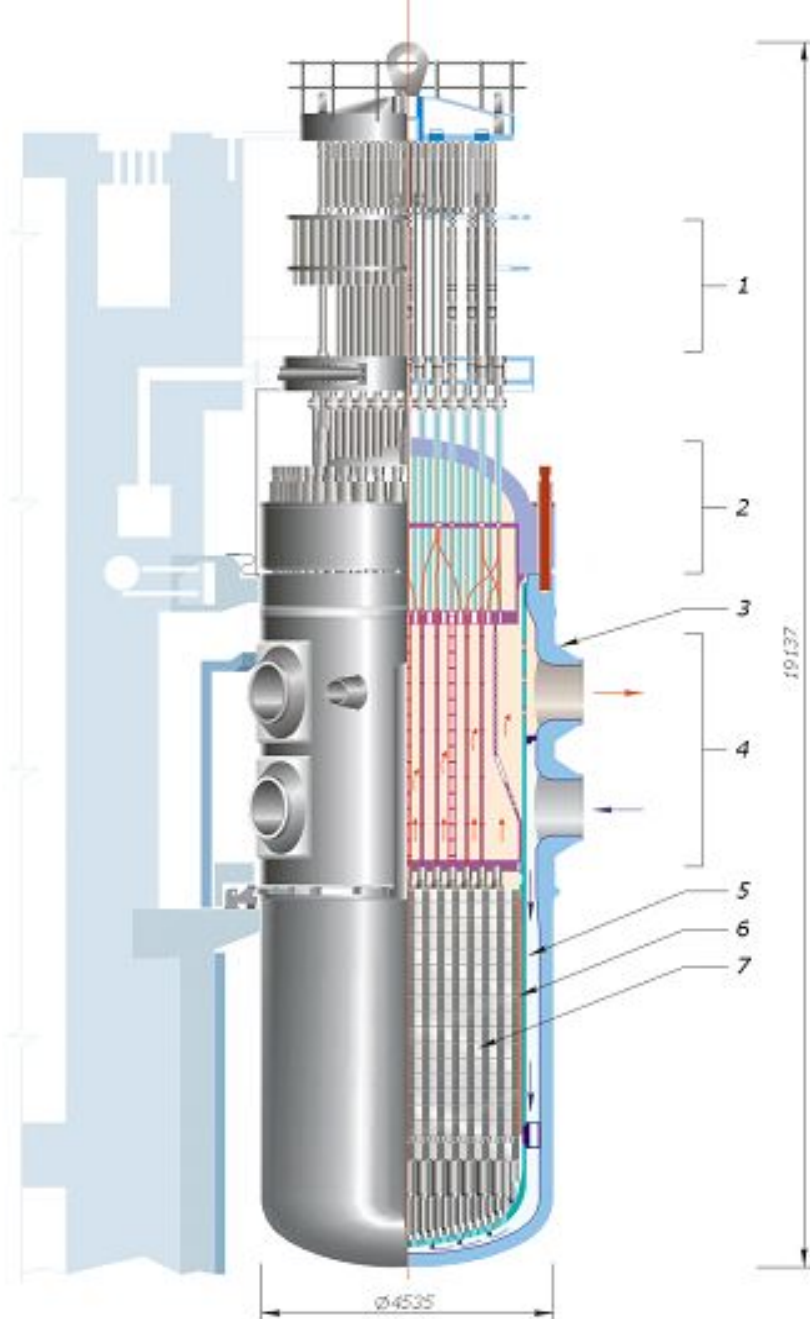
- При распаде урана  $U_{235}$  происходит выделение тепла, сопровождаемое выбросом двух трех нейтронов. По статистическим данным — 2,5. Эти нейтроны сталкиваются с другими атомами урана  $U_{235}$ . При столкновении уран  $U_{235}$  превращается в нестабильный изотоп  $U_{236}$ , который практически 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  $^{238}\text{U}$  (более 99 %) и делящегося изотопа  $^{235}\text{U}$  (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  $^{235}\text{U}$ , 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  $^{235}\text{U}$  в природном уране всего 0,7 %, получаем, что на каждый килограмм добытой руды будет приходиться  $1,8 \cdot 10^{19}$  атомов  $^{235}\text{U}$ . Если все эти атомы  $^{235}\text{U}$  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.

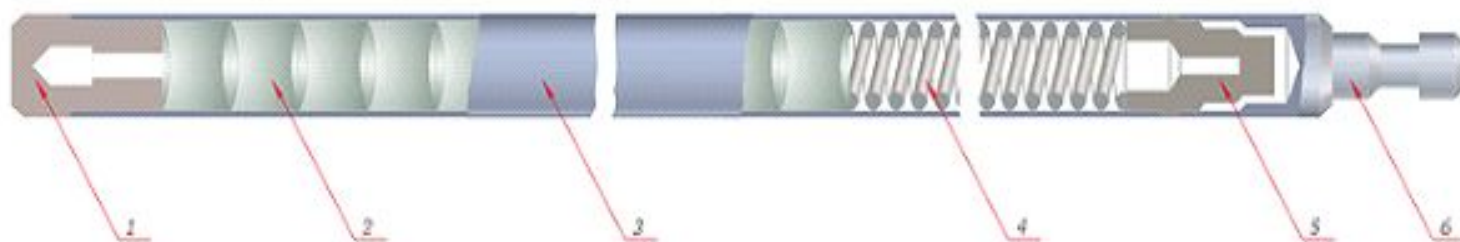
Реактор ВВЭР 1000.

- 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.



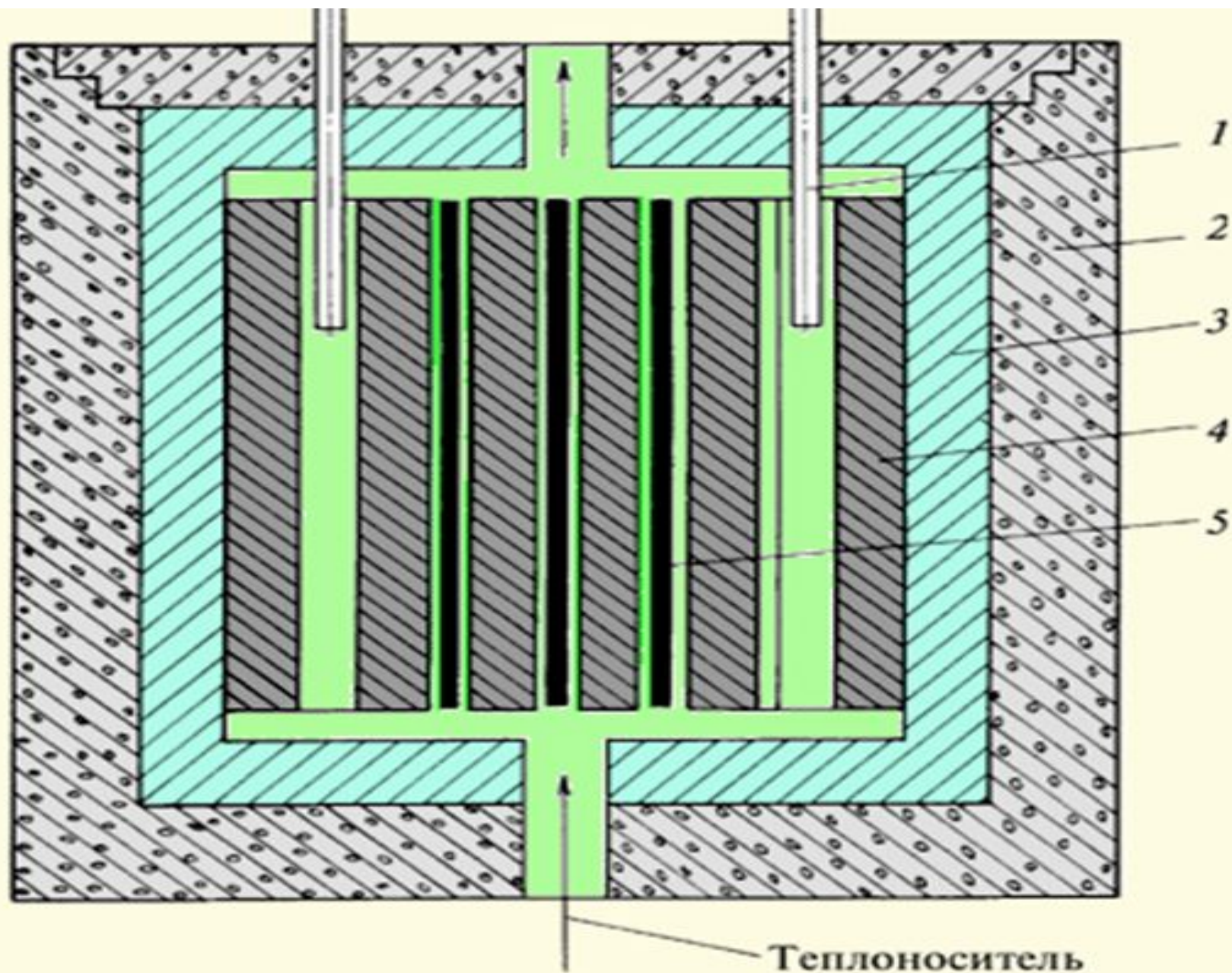
ТВЭЛ реактора РБМК. Устройство ТВЭЛА реактора РБМК: 1 — заглушка; 2 — таблетки диоксида урана; 3 — оболочка из циркония; 4 — пружина; 5 — втулка; 6 — наконечник.

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

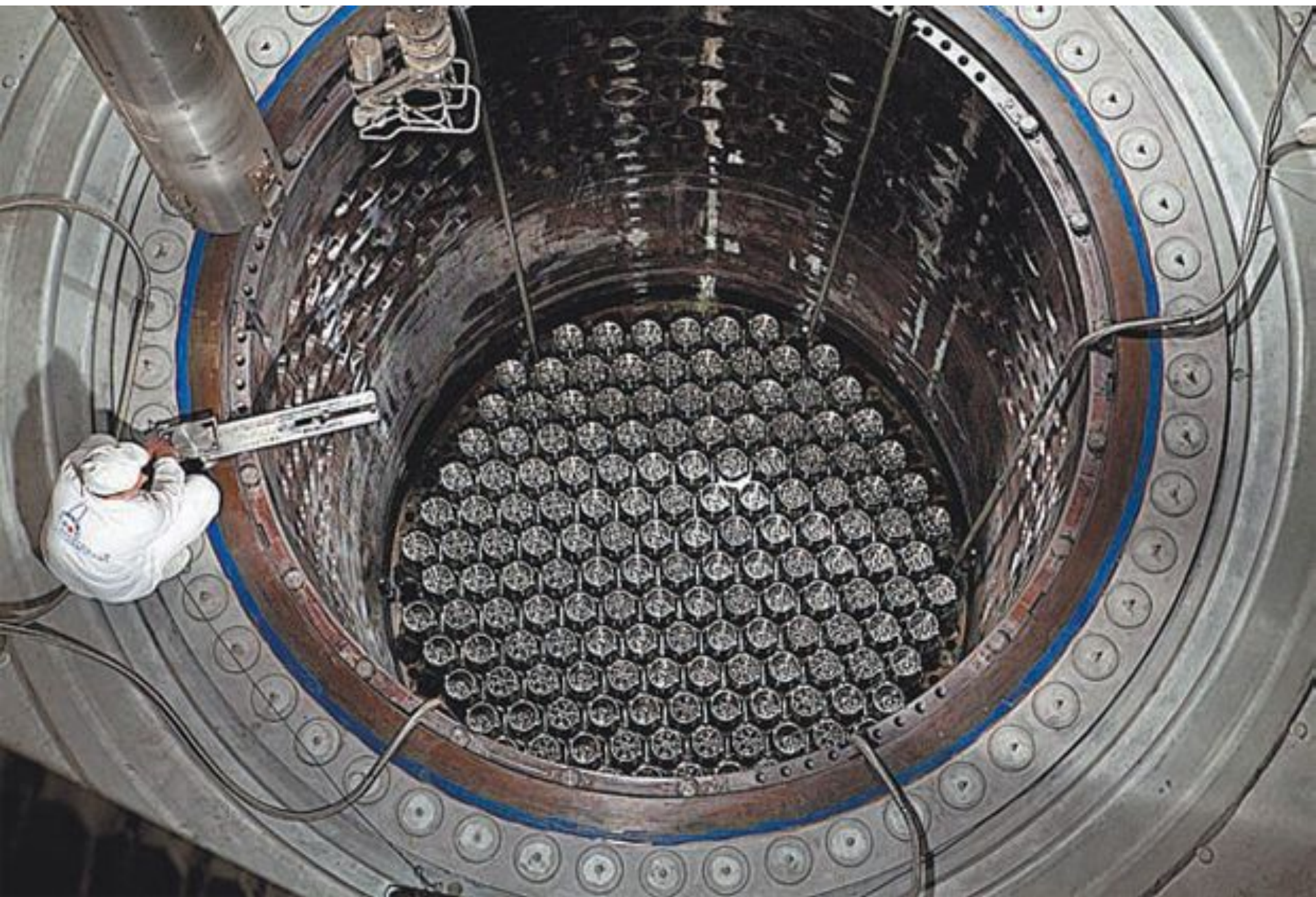




. Схема ядерного реактора на тепловых нейтронах

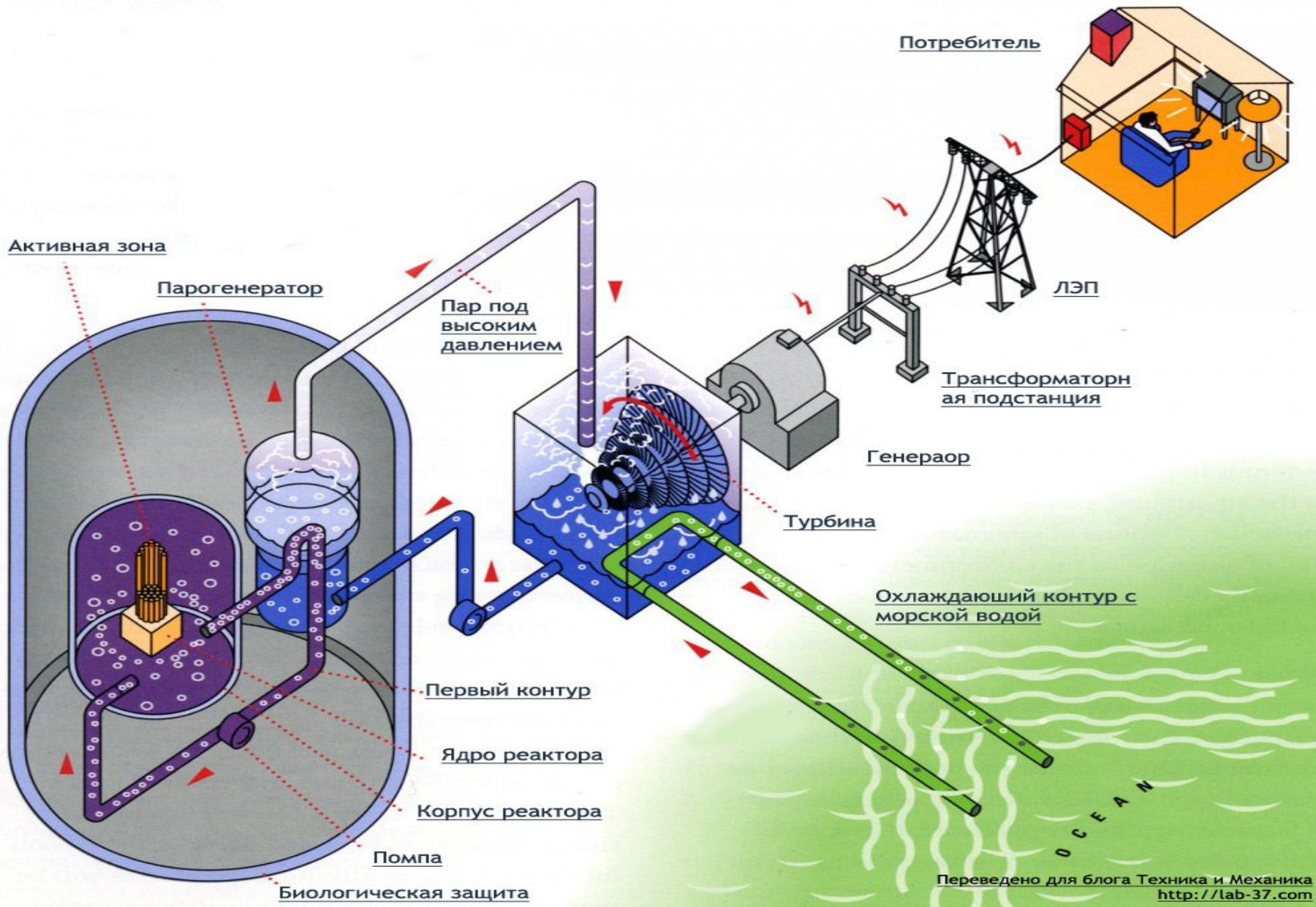


# ВНУТРИ АТОМНОГО РЕАКТОРА





# 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?