

# ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Лектор Проскураков Константин Николаевич

- **Основная литература:**

- 1. Проскураков К.Н. Ядерные энергетические установки. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 446 с.
- 2. Проскураков К.Н., Использование виброакустических шумов для диагностики технологических процессов в АЭС. М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 68 с.
- 3. Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, Б.М. Финкель. Системы диагностирования ВВЭР. М.: Энергоатомиздат, 2010. 391 с.

- **Дополнительная литература:**

- 4. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. /Андрушечко С. А., Афров А. М., Васильев Б. Ю. и др.//Изд-во: Логос, 2010. 488 с.

# Балльно-Рейтинговая структура ДИСЦИПЛИНЫ

- Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:
- КМ-1 контрольная работа 1; Вес раздела 0,25
- КМ-2 контрольная работа 2; Вес раздела 0,25
- КМ-3 контрольная работа 3; Вес раздела 0,25
- КМ-4 контрольная работа 4. Вес раздела 0,25

## Темы контрольных работ и номер недели

- КР1: Состояние и перспективы развития ЯЭ. Ядерные реакции. Нейтронно-физические процессы в ядерном реакторе (ЯР). Управление реактором **3 - неделя; СРС 6 часов**
- КР2: . Особенности реактора как источника энергии. Топливный цикл ЯЭ. Классификация ЯЭУ. Функционирование АЭС, аварийные защиты, системы безопасности.
- Нормы радиационной безопасности. Вывод из эксплуатации.
- **7 - неделя; СРС 6 часов**
- КР3: Сравнительный анализ АЭС с реакторами ВВЭР, РБМК, БН и БРЕСТ. Проекты АЭС с ВВЭР. Судовая, космическая и малая ЯЭ. Примеры решения практических задач.
- **11 неделя; СРС 6 часов**
- КР4: Актуальные проблемы ЯЭ: продление срока службы, обеспечение замкнутого топливного цикла; повышение безопасности, сейсмостойкости; совершенствование методов и систем диагностики; управления технологическими процессами и тяжелыми авариями.
- **14 - неделя; СРС 4 часа**

# Лекция 1. Современное состояние атомной энергетики и перспективы развития в мире

- Обеспечение человечества энергией является одной из главнейших проблем, решение которой определяет его устойчивое развитие, т.е. развитие без истощения природных, экономических, экологических и социальных ресурсов.
- Энергетика, построенная на углеводородах, исторически себя исчерпала. Запасы ископаемого топлива сокращаются, а продолжение его использования в качестве энергоисточника ухудшает экологическую ситуацию.
- Огромным преимуществом АЭС является ее относительная экологическая чистота

- Из табл. 1.1 видно, сколь огромны выбросы вредных веществ ТЭС, работающих на различных органических топливах
- Сравнительные данные по топливу и отходам для АЭС мощностью 1000 МВт (тонн в год): топливо :27 (160 т. природного урана в год) , **отходы: 27 высокоактивные; 310 среднеактивные; 460 низкоактивные**
- Подобные выбросы на АЭС просто отсутствуют. Если ТЭС мощностью 1000 МВт потребляет в год 8 млн. т. кислорода для окисления топлива, то АЭС не потребляет кислорода вообще.

**Табл. 1.1 Выбросы вредных веществ ТЭС, работающих на различных органических топливах**

<b>Годовые выбросы от ТЭС мощностью 1000 МВт, т</b>			
<b>Таблица 5.3 Вид выбросов</b>	<b>Тип ТЭС</b>		
	<b>Пылеугольная</b>	<b>Мазутная</b>	<b>Газовая</b>
<b>Сернистые газы</b>	<b>138 000</b>	<b>98000</b>	<b>13</b>
<b>Оксиды азота</b>	<b>20900</b>	<b>21800</b>	<b>12200</b>
<b>Оксид углерода</b>	<b>500</b>	<b>9</b>	<b>—</b>
<b>Углеводороды</b>	<b>210</b>	<b>680</b>	<b>—</b>
<b>Альдегиды</b>	<b>50</b>	<b>120</b>	<b>30</b>
<b>Золовая пыль</b>	<b>4500</b>	<b>730</b>	<b>450</b>
<b>Суммарные выбросы</b>	<b>164 800</b>	<b>121 300</b>	<b>12700</b>

## Стоимости капитальных затрат на установленный kW

Технология	Капитальные затраты (\$/kW)	Эксплуатационные затраты (\$/kWh)
Турбоустановки со сжиганием угля	\$500 - \$1000	
Газотурбинный цикл	\$400 - \$800	0,02 – 0,04
Комбинированный цикл на газифицированном угле (IGCC)	\$1000 - \$1500	0,04 – 0,08
Парогазовый цикл	\$600 - \$1200	0,04 – 0,10
Ветряные энергоустановки (включая морские)	\$1200 - \$5000	<0,01
Ядерная	\$1200 - \$5000	0,02 – 0,05
Солнечная энергия	\$4500 и выше	<0,01
Гидроэнергетика	\$1200 - \$5000	<0,01

**Типы и количество ядерных реакторов, находящихся в эксплуатации и строительстве приведены в табл. 1.2**

- В 31 стране мира действуют 442 ядерных реактора, общей электрической мощностью 365 ГВт.
- Первая в мире атомная электростанция мощностью 5 МВт построена в городе Обнинске и пущена в эксплуатацию 27 июня 1954 года.

# Таблица 1.2

Типы и количество ядерных реакторов, находящихся в эксплуатации и строительстве

Тип реактора	Международное название	Страны размещения	Работающие реакторы		Строящиеся реакторы		Основные характеристики		
			Кол-во	ГВт (эл.)	Кол-во	ГВт (эл.)	Топливо	Охладитель	Замедлитель
Водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР)	Water Cooled Water Moderated Power Reactor (WER)	Россия, Украина, Финляндия, Болгария, Чехия, Армения, Словакия	53	35,87	10	9,5	обогащенный уран	вода	вода
Легководный реактор с водой под давлением	Pressurized Water Reactor (PWR)	США, Франция, Япония и др.	214	205,37	2	2,5	обогащенный уран	вода	вода
Легководный кипящий реактор	Boiled Water Reactor (BWR)	США, Япония, Швеция и др.	93	83	3	3,6	обогащенный уран	вода	вода
Реактор с газовым охлаждением; газографитовый реактор	Advanced Gas-cooled Reactor (AGR): Magnox	Великобритания	22	10,66	-	-	обогащенный уран	CO <sub>2</sub>	графит
Реактор с тяжеловодным замедлителем и теплоносителем под давлением (CANDU и др.)	Pressurized Heavy-Water (Moderated and Cooled) Reactor (PHWR) Canadian Deuterium Uranium (CANDU)	Канада, Индия и др.	40	20,477	7	2,6	естественный уран	тяжелая вода	тяжелая вода
Уран-графитовый реактор канального типа - РБМК	Light-Water-Cooled Graphite-Mode-Rated Reactor (LWGR)	Россия	16	11,4	1	0,9	обогащенный уран	вода	графит
Реактор на быстрых нейтронах	Fast Breeder Reactor	Япония, Франция, Россия	3	1	1	0,47	плутоний и уран	жидкий натрий	-
<b>ВСЕГО</b>			<b>441</b>	<b>368</b>	<b>24</b>	<b>20</b>			

Легководные реакторы трех типов (PWR, BWR, VVER) составляют 80% реакторного парка мира.

# Действующие АЭС России

На март 2018 года в России, на 10 действующих АЭС, эксплуатировалось 36 [энергоблоков](#) общей мощностью 29 000 МВт, из них 20 реакторов [с водой под давлением](#) —

- 13 [ВВЭР-1000](#) (12 блоков 1000 МВт и 1 блок 1100 МВт), 2 ВВЭР-1200 (1200 МВт), 5 [ВВЭР-440](#) (4 блока 440 МВт и 1 блок 417 МВт);
- 14 [канальных кипящих реакторов](#) — 10 [РБМК-1000](#) (1000 МВт каждый) и 4 [ЭГП-6](#) (12 МВт каждый);
- 2 [реактора на быстрых нейтронах](#) — [БН-600](#) (600 МВт) и [БН-800](#) (880 МВт).

# Действующие АЭС.

- 1. Балаковская АЭС
- 2. Белоярская АЭС
- 3. Билибинская АЭС
- 4. Калининская АЭС
- 5. Кольская АЭС
- 6. Курская АЭС
- 7. Ленинградская АЭС
- 8. Нововоронежская АЭС
- 9. Ростовская АЭС
- 10. Смоленская АЭС

# Построенные или строящиеся в России атомные электростанции

Энергоблок	Тип	Начало строительства	Подключение к сети	Ввод в эксплуатацию
Плавучая атомная электростанция	2 x КЛТ-40	19.05.2006	2019 (план)	2019 (план)
Белоярская АЭС-4	БН-800	18.07.2006	10.12.2015	31.10.2016
Калининская АЭС-4	ВВЭР-1000/320	12.11.2007	24.11.2011	25.12.2012
Нововоронежская АЭС-2-1	ВВЭР-1200/392М	24.06.2008	05.08.2016	27.02.2017
Ленинградская АЭС-2-1	ВВЭР-1200/491	25.10.2008	09.03.2018	29.10.2018
Нововоронежская АЭС-2-2	ВВЭР-1200/392М	12.07.2009	2019 (план)	
Ростовская АЭС-3	ВВЭР-1000/320	15.09.2009	27.12.2014	17.09.2015
Ленинградская АЭС-2-2	ВВЭР-1200/491	15.04.2010	2019 (план)	2020 (план)
Ростовская АЭС-4	ВВЭР-1000/320	16.06.2010	02.02.2018	28.09.2018
Балтийская АЭС-1	ВВЭР-1200/491	22.02.2012	приостановлено	
Курская АЭС-2-1	ВВЭР-1300/510	29.04.2018	2022 (план)	2023 (план)

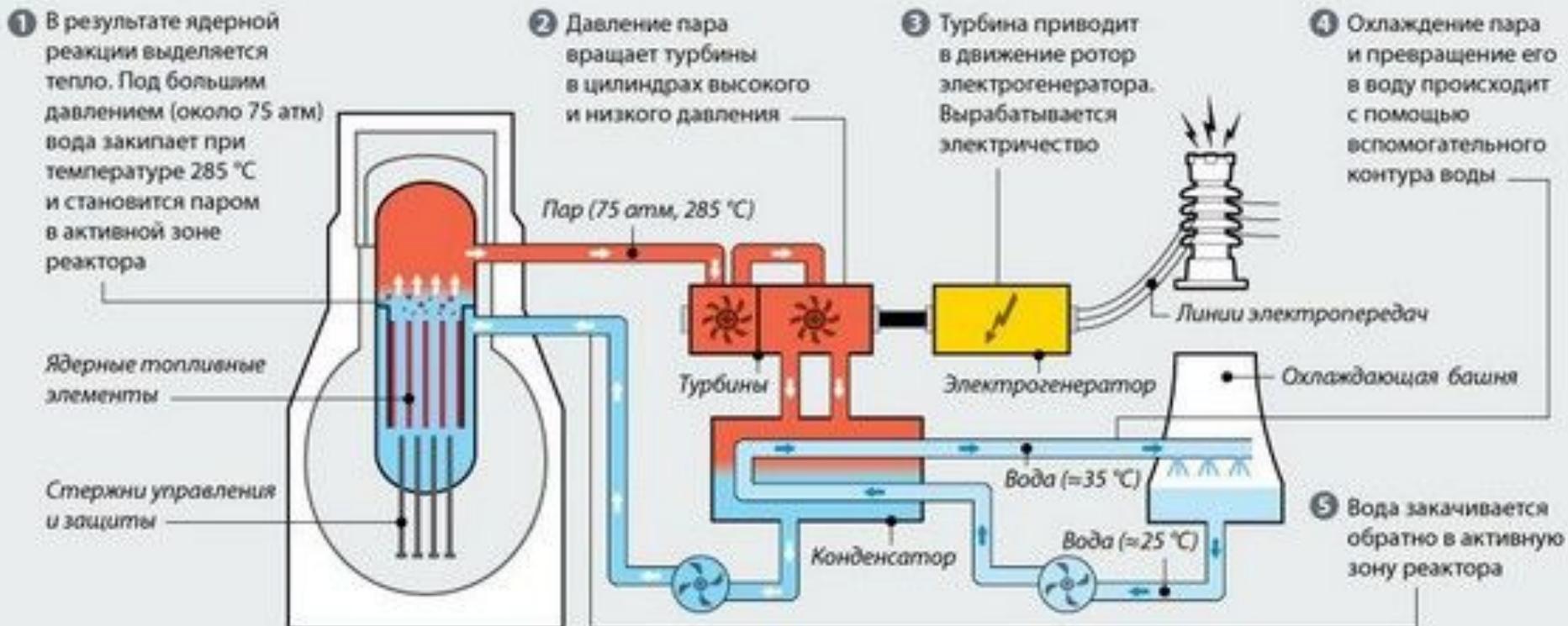
# БЕЗОПАСНОСТЬ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

- В 1979 г. на АЭС «Три Майл Айленд» (США) произошла авария с расплавлением активной зоны реактора.
- Принятые меры по увеличению безопасности АЭС привели к заметному удорожанию их электроэнергии.
- Еще более серьезный удар развитию атомной энергетики нанесла авария на Чернобыльской АЭС в 1986 г. и ее катастрофические последствия. В ряде стран был принят мораторий на строительство новых АЭС.
- **Авария на АЭС Фукусима-1 — крупная радиационная авария, произошедшая 11 марта 2011 года в результате сильнейшего землетрясения в Японии. Схема разрушений и повреждений на АЭС Фукусима-1 приведена на рис.1.3. Все это привело к мощному выбросу радиации, заразившей обширную зону вокруг станции. Агентство по атомной и промышленной безопасности относит аварию на АЭС "Фукусима-1" к высшему, седьмому, уровню опасности. Ранее он был присвоен только катастрофе на Чернобыльской АЭС.**

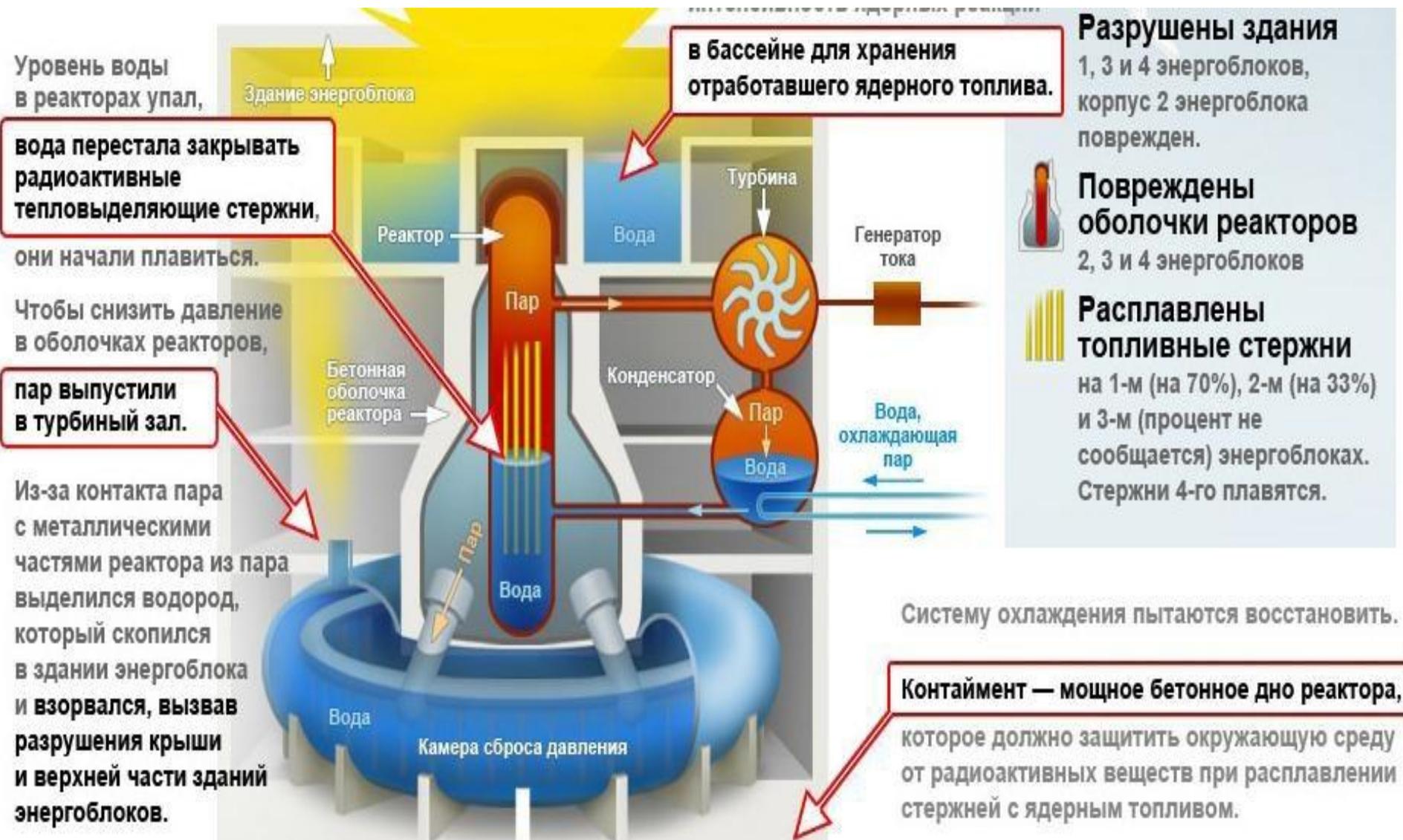
# Реактор типа ВВР

ВВР (англ. Boiling Water Reactor) — реактор с кипящей водой.

Реакторы такого типа используются во всех шести блоках АЭС «Фукусима-1»



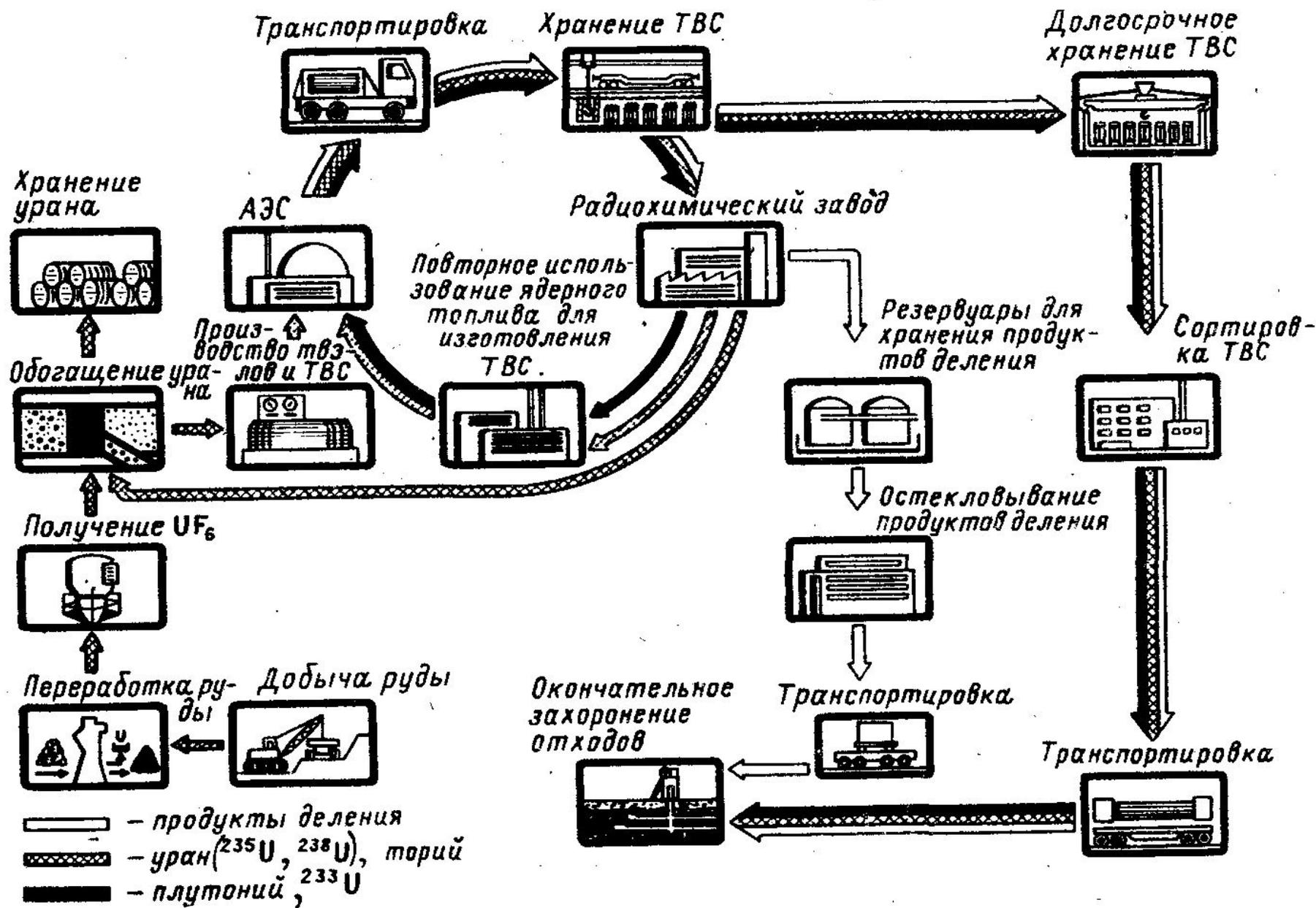
# Схема разрушений и повреждений на АЭС Фукусима-1



# Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века

- Современная ядерная энергетика базируется на тепловых реакторах. Это ограничивает возможности ядерной энергетики в будущем. При планируемой к 2030 г. суммарной мощности АЭС России 60 ГВт, они будут обеспечены дешевым ядерным топливом в течение 60 лет.
- Оценка мировых запасов природного урана показывает, что на них нельзя базировать долговременное устойчивое развитие ядерной энергетики на тепловых реакторах.
- Поэтому в будущем ядерная энергетика будет широко использовать технологию реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым топливным циклом. В России имеется в эксплуатации энергоблоки БН-600 и БН-800.

# ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ



# ОБОГАЩЕНИЕ ТОПЛИВА

- В АЭС с реакторами на тепловых нейтронах используется слабообогащенное (2—5%  $^{235}\text{U}$ ) урановое топливо.
- В реакторах на быстрых нейтронах содержание  $^{235}\text{U}$  (до 30%).
- Прежде чем изготавливать топливо, природный уран, содержащий только 0,72%  $^{235}\text{U}$ , необходимо обогатить — разделить изотопы  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ .
- Химические методы невозможны (так как изотопы имеют одинаковые химические свойства), поэтому необходимы физические методы разделения изотопов.
- Обогащение урана методом газовой диффузии основано на явлении молекулярной диффузии через пористую перегородку с мельчайшими отверстиями.
- Центрифужный метод обогащения основан на эффекте разделения изотопов в центробежном поле, усиливаемом противоточной циркуляцией газа в центрифуге. Под действием возникающей внутри высокоскоростной центрифуги центробежной силы более тяжелые молекулы  $^{238}\text{UF}_6$  движутся ближе к стенке центрифуги, чем более легкие молекулы  $^{235}\text{UF}_6$ . Таким образом, происходит частичное разделение изотопов в радиальном направлении.

## Преимущества и недостатки АЭС по сравнению с ТЭС

- **Главным преимуществом АЭС перед любыми другими электростанциями является их практическая независимость от удаленности месторождений урана и радиохимических заводов.**
- Энергетический эквивалент ядерного топлива в миллионы раз больше, чем органического топлива, и поэтому, расходы на его перевозку ничтожны. Это особенно важно для европейской части России, где доставка угля из Кузбасса и Сибири слишком дорога. Кроме того, замена выработки электроэнергии на газомазутных (фактически — газовых) ТЭС производством электроэнергии на АЭС — важный способ поддержания экспортных поставок газа в Европу.
- Это преимущество трансформируется в другое: для большинства стран, в том числе и России, производство электроэнергии на АЭС не дороже, чем на газомазутных и тем более пылеугольных ТЭС. Падение цен на нефть, конечно, автоматически снижает конкурентоспособность АЭС.
- Затраты на строительство АЭС находятся примерно на таком же уровне, как и на строительство пылеугольных ТЭС или несколько выше
- Огромным преимуществом АЭС является ее относительная экологическая чистота и отсутствие потребления кислорода.

Главный недостаток АЭС — тяжелые последствия аварий в реакторном отделении с его разгерметизацией и выбросом радиоактивных веществ в атмосферу с заражением громадных пространств.

Подобно тому, как ТЭС имеет отходы в виде золы и других выбросов, АЭС также имеет отходы, однако они особого вида. Это в первую очередь отработавшее ядерное топливо, а также другие радиоактивные остатки.

Эти отходы утилизируют: сначала их выдерживают в специальных бассейнах для уменьшения радиоактивности, а потом направляют на переработку на радиохимические заводы, где из них извлекают ценные компоненты, в том числе и несгоревшее в реакторе топливо.

- Для обеспечения радиационной безопасности АЭС оборудуют специальной приточно-вытяжной системой вентиляции, сложность которой не идет ни в какое сравнение с вентиляционной системой ТЭС  
Серьезной проблемой для АЭС является их ликвидация после выработки ресурса,  
которая по оценкам может составлять до 20 % стоимости их строительства.
- «Абсолютная величина нашей атомной генерации в пять раз меньше, чем в Соединенных Штатах, в три раза меньше, чем во Франции, в два раза меньше, чем в Японии. Доля производства атомного электричества у нас в 2,5 раза ниже, чем в Евросоюзе: там примерно 35-40% электроэнергии производят на АЭС, у нас — примерно 16 %

# Устойчивое развитие АЭС. IV поколение

Системы IV поколения обеспечат оптимальное использование природных ресурсов и надежность энергоснабжения.

Слабой стороной существующих ядерных технологий является их ограниченная способность к использованию энергетического потенциала уранового топлива. Тепловые реакторы I и II поколений используют изотоп урана, который составляет лишь менее 1% общего количества урана, встречающегося в природе.

Реакторы-размножители способны использовать значительную часть энергетического потенциала, недоступного тепловым легководным реакторам, в результате чего из того же исходного количества урана может быть произведено в 50 раз больше энергии.

Такие реакторы способны преобразовывать  $^{238}\text{U}$  в делящийся  $^{239}\text{Pu}$  даже интенсивнее, чем сами поглощают делящийся материал (свойство, называемое «размножением»). Кроме того, они могут использовать топливо с очень низким содержанием урана, соответствующим руде. Образование отходов будет минимальным.

# Недостатки открытого топливного цикла

Недостатком открытого топливного цикла, предусматривающего захоронение отработавшего ядерного топлива без переработки, является большой объем, уровень радиотоксичности и остаточное тепловыделение ОЯТ.

По прогнозным оценкам на ближайшие несколько десятилетий, к 2060 году накопится настолько значительное количество требующего захоронения ОЯТ, что это станет неприемлемым для человеческого общества.

Эта проблема, однако, была частично решена в странах, где принято решение о промышленной переработке ОЯТ с целью извлечения плутония (замкнутый ядерный цикл с частичным рециклированием), – Франции, Великобритании, России, Японии и Индии.

Передовые технологии деления и трансмутации являются предметом многочисленных исследовательских проектов, выполняемых в рамках развития систем IV поколения.

Ядерно-химические технологии  
позволяют выполнять

разделение отработавшего топлива на  
различные составляющие в  
зависимости от их дальнейшего  
использования или требований к  
захоронению.

# Конкурентоспособность АЭС

- Основная часть внешних издержек на производство электроэнергии на АЭС (например, страхование, обращение с РАО, вывод из эксплуатации) закладывается в стоимость электроэнергии, в отличие от станций, работающих на иных видах топлива.
- Постоянные затраты на производство ядерной энергии довольно высоки (значительные первоначальные капиталовложения), но переменные расходы небольшие ввиду низкой стоимости топлива.
- Цена самого урана мало влияет на итоговую стоимость электроэнергии, и общая стоимость выработки одного МВт/ч на АЭС существенно ниже, чем на станциях других типов, особенно если принять во внимание образование  $\text{CO}_2$ .