ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Лектор Проскуряков Константин Николаевич

- **Основная литература:**
- 1. Проскуряков К.Н. Ядерные энергетические установки. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 446 с.
- 2. Проскуряков 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-**Р**ейтинговая 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 технологически ми 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

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

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_2	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	-
ВСЕГО			**441**	**368**	**24**	**20**			

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 —

13ВВЭР-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 марта2011 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 BWR

BWR (англ. Boiling Water Reactor) — реактор с кипящей водой.
Реакторы такого типа используются во всех шести блоках АЭС «Фукусима-1»

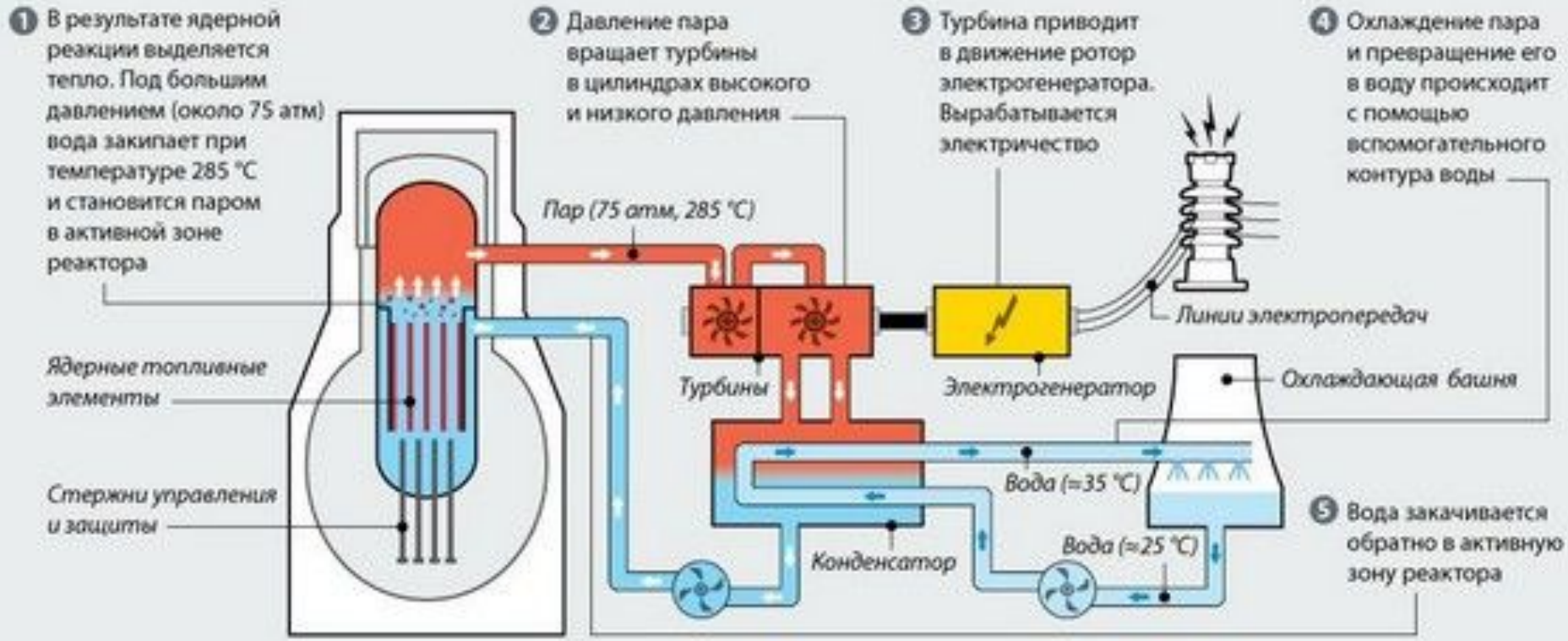
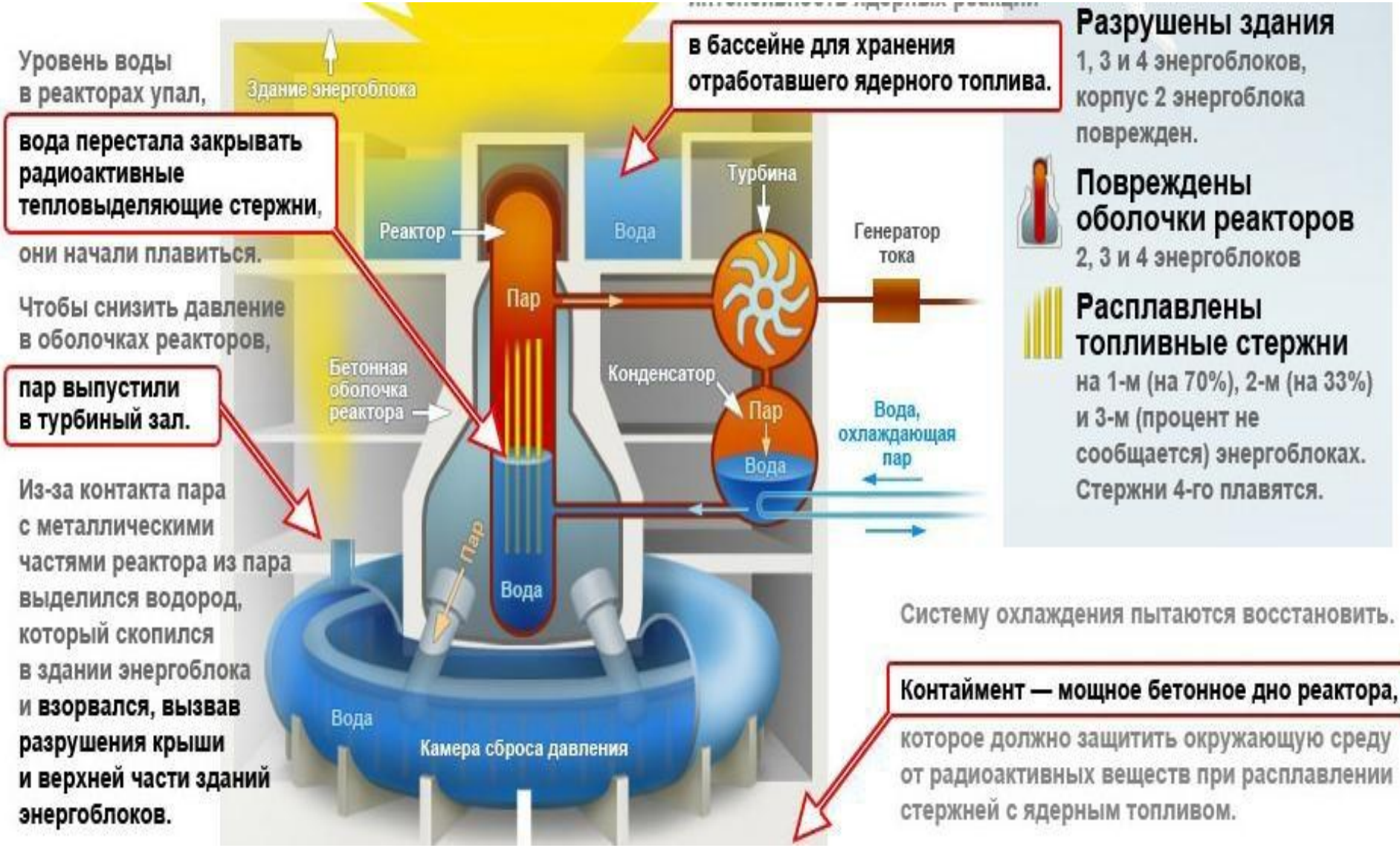


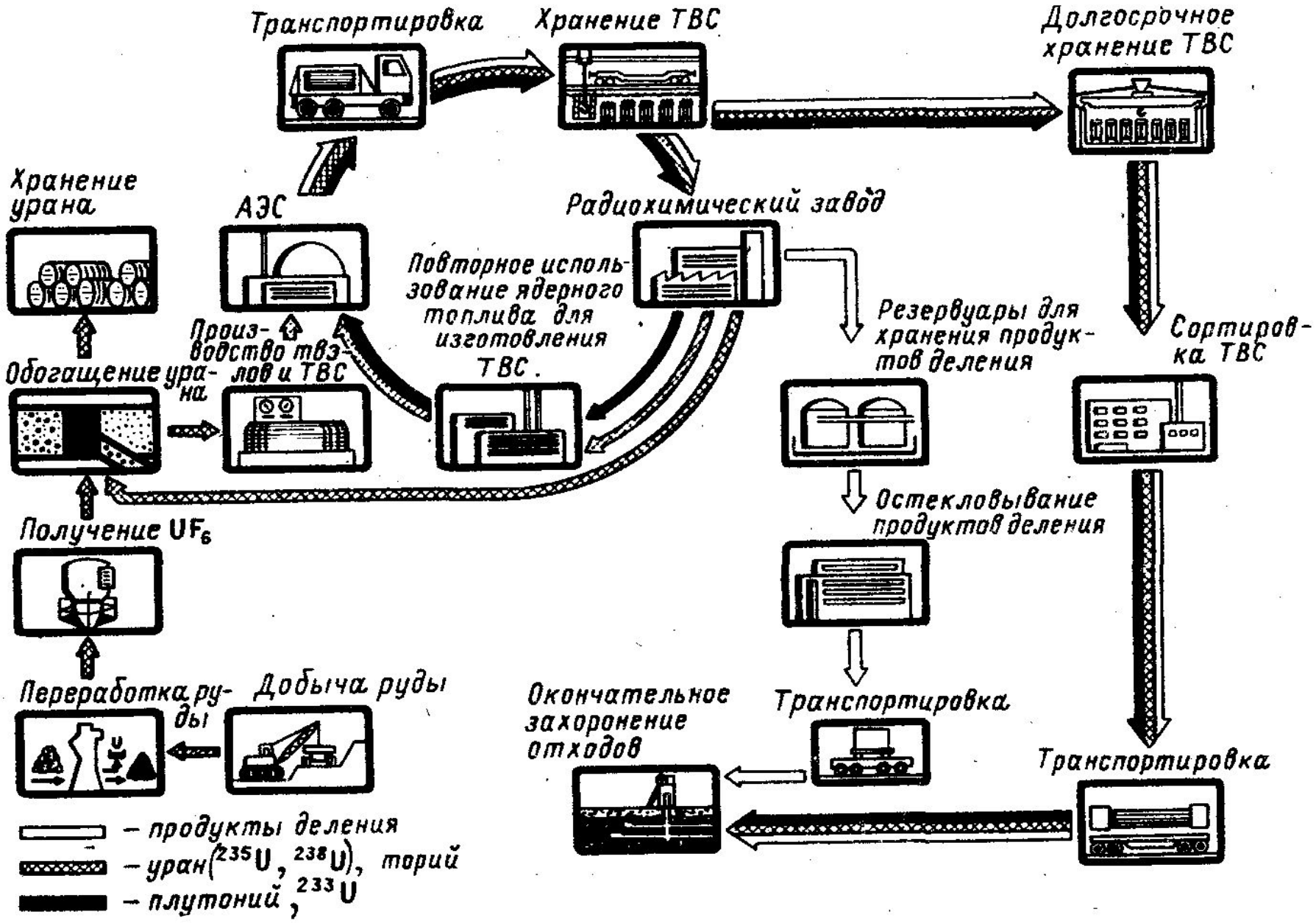
Схема разрушений и повреждений на АЭС Фукусима-1



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% 235U) урановое топливо.
- В реакторах на быстрых нейтронах содержание 235U (до 30%).
- Прежде чем изготавливать топливо, природный уран, содержащий только 0,72% 235U, необходимо обогатить — разделить изотопы 235U и 238U.
- 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, усиливающемся противоточной циркуляцией газа вцентрифуге. Под действием возникающей внутри высокоскоростной центрифуги центробежной силы более тяжелые молекулы 238UF6 движутся ближе к стенке центрифуги, чем более легкие молекулы 235UF6. 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}U в делящийся ^{239}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 CO_2.