

Всероссийский конкурс
научно-исследовательских, изобретательских и творческих работ обучающихся
«НАУКА, ТВОРЧЕСТВО, ДУХОВНОСТЬ»

Направление: «История»
«История мирного атома: от первой АЭС к термоядерному синтезу»

Работу выполнил: Петренко Егор Алексеевич, ученик 11 класса, МБОУ Бобровский образовательный центр «Лидер» имени А. В. Гордеева

Научный руководитель: Симоненко Дарья Степановна, учитель физики ИКК, МБОУ Бобровский образовательный центр «Лидер» имени А. В. Гордеева

Место выполнения работы: Воронежская область, город Бобров

Оглавление

1. Введение	3
2. Основная часть	
2.1 Способы получения энергии	4
2.2 Зарождение атомной промышленности	4
2.3 Первая АЭС	5
2.4 Расширение географии мирного атома	5
2.5 Атом в судостроении	6
2.6 Атом в космосе	6
2.7 Атомные взрывы для народного хозяйства	7
2.8 Аварии на АЭС	
2.8.1. АЭС Three Mile Island	7
2.8.2. Чернобыльская АЭС	9
2.8.3 АЭС Фукусима – 1	10
2.9 Причины привлекательности атомной энергетики	12
2.10 Современная география АЭС	13
2.11 Термоядерный синтез	13
2.12 Росатом: история успеха	14
3. Заключение	15
4. Список литературы	16
5. Приложение	18

Введение

В истории человечества немало случаев, когда военные технологии находили своё применение в мирной жизни. К таким относится и изобретение консервных банок для нужд наполеоновской армии, и разработка системы GPS по указанию Министерства обороны США. Или вот ещё один яркий пример: в 1942 году в Америке была запущена программа разработки ядерного оружия под названием проект «Манхэттен». Тогда Вашингтон стремился сыграть на опережение и получить преимущество у нацистской Германии. Как только о программе стало известно в СССР, там возобновили работы по изучению атома, приостановленные из-за войны. Руководителем советского атомного проекта был назначен Игорь Курчатов. Это именно ему приписывают фразу: «Атом должен быть не солдатом, а рабочим». Те события можно считать началом пути от ядерного оружия к мирному атому. К концу десятилетия учёные и США, и Советского Союза стали задумываться о том, как использовать энергию атома в созидательных, а не разрушительных целях.

Цель данного проекта - выявить ключевые закономерности и направления развития ядерных технологий в исторической ретроспективе.

Рассматриваемые задачи:

сравнить основные принципы работы современных ядерных реакторов и их виды;

оценить рациональность эксплуатации АЭС;

оценить риски эксплуатации АЭС, изучить историю аварий на АЭС;

изучить методы, основанные на ядерных технологиях, которые применяются в медицине, науке, промышленности и сельском хозяйстве;

оценить перспективы развития ядерных технологий и их возможное влияние на окружающую среду и здоровье людей;

на основе проведённых исследований предложить рекомендации по совершенствованию ядерных технологий, направленных на повышение их безопасности и устойчивости в экологическом и экономическом аспектах.

Попробуем ответить на ряд вопросов. Как человечество пришло к использованию энергии атома? Насколько эта отрасль безопасна для людей и экологии? Каковы её перспективы? Правда ли, что учёные уже близки к получению энергии из термоядерного синтеза? И что такое маленькое солнце на земле?

Примечание: в тексте применяются ссылки двух типов, в квадратных скобках и без. Первые указывают на источник литературы, вторые – ссылки на иллюстрации в приложении.

Основная часть

2.1 Способы получения энергии

Вообще человеческая цивилизация на протяжении практически всей своей истории учится извлечению энергии из окружающего мира и совершенствуется в этом. Ещё в четвёртом тысячелетии до нашей эры наши предки сумели подчинить себе воду. Водяные мельницы использовались для ремёсел, изготовления напитков и бумаги. Энергию ветра применяли на своих парусных судах мореплаватели, а мельники мололи зерно при помощи ветряных мельниц ещё в начале первого тысячелетия нашей эры. Что касается освещения, то для этого издавна использовалось открытое пламя в многообразных его формах: от стационарного костра и лучины на заре времён, до керосиновой лампы и газового фонаря. Горючие материалы для поддержания огня тоже претерпели эволюцию. Растительный и животный жир, воск, а затем парафин. Когда наша цивилизация сделала шаг в сторону эксплуатации паровой энергии, это стало толчком к развитию промышленности и транспортной инфраструктуры, но паровая энергетика ушла на второй план уже через 200 лет после её возникновения. Активно развиваясь лишь в «стимпанк» вселенных и другой научной фантастике. Это благодаря ей начались разработки полезных ископаемых, в том числе каменного угля, универсального и недорогого топлива. Уголь стал источником природного газа, первоначально используемого для освещения улиц. Затем на энергетическую арену вышла нефть. А в эпоху электричества стало возможным передавать энергию на большие расстояния, что в корне меняло ситуацию. В середине XX столетия электроэнергия стала повсеместной. Теперь она применялась не только в промышленных целях, но и для отопления, и освещения помещений, а также для приготовления пищи и использования бытовых приборов, став частью жизни простых людей. Однако, затем произошёл энергетический кризис 1970 года. Мировое потребление электроэнергии начало активно увеличиваться, и существующие ресурсы большинства развитых стран были не в силах удовлетворить растущий спрос. В итоге, начали резко расти цены на основные виды топлива, и тут как нельзя кстати оказались разработки по развитию атомной энергетики.

2.2 Зарождение атомной промышленности

Ещё в начале XX века в научных кругах зарождались дискуссии по поводу перспектив атомной энергии. Исследования в этой сфере начались на рубеже столетия с ряда успешных экспериментов всеми известной Марии Склодовской-Кюри. Именно открытие радиоактивности стало первым шагом на пути к становлению ядерной энергетики. Гораздо реже на слуху имя другой выдающейся женщины 20 века Лизы Мейтнер. Но её роль в истории науки ничуть не меньше. Исследования этого немецко-австрийского учёного открыли ядерную эру и позволили освоить неисчерпаемые запасы энергии, скрытые в атомах. Работы Мейтнер привели к созданию атомной бомбы, а в дальнейшем и атомной энергетике. Работая с Отто Ханном она выяснила, что деление ядер урана способно породить цепную реакцию, которая приводит к высвобождению огромного объёма энергии. Тогда, в 1939 году, был впервые введён термин ядерное деление. Исследования Ханна и Мейтнер навсегда изменили мир. Они стали первым этапом в создании американского проекта Манхэттен. Будучи убеждённой пацифисткой, Мейтнер отказалась участвовать в нём из этических соображений и была по-настоящему шокирована, когда узнала об атомных бомбардировках Хиросимы и Нагасаки¹. Но американцы недолго держали первенство на ядерном пьедестале. Первое испытание их атомной бомбы в 1945 году послужило началом гонки вооружений между двумя сверхдержавами (США и СССР). Но параллельно с созданием смертоносного ядерного оружия учёным СССР и США удалось придумать, как направить энергию атома в мирное русло. Путь этот был непростым. В конце 1940-х годов американские и советские исследователи приступили к испытаниям по выработке атомной энергии. Во главе коллектива

разработчиков в СССР стоял Игорь Курчатов. Этот учёный занимался ядерной физикой ещё в начале тридцатых годов, работая в Ленинградском радиовом институте. Там он вместе со своими сотрудниками создал первый в Европе циклотрон³ – ускоритель тяжелых заряженных частиц, который активно использовался для научных исследований до конца 1950 годов. В начале Великой Отечественной войны его работа была поставлена на паузу, однако проект американской ядерной бомбы вернул Курчатова в ядерную физику. После того, как США провели бомбардировку японских городов, Советское руководство в разы увеличило финансирование исследований Курчатова и его команды. Спустя 4 года в СССР была испытана атомная бомба², почти в два раза более мощная, чем та, что была сброшена на Хиросиму. Масштабы разрушений убедили учёных обеих стран, что потенциал атомной энергии огромен, и она может пригодиться не только для устрашения врага. И пусть исследования в области атомной энергетики в Америке начались на несколько лет раньше, чем в Советском Союзе, победу в мирной ядерной гонке всё же одержал СССР.

2.3 Первая АЭС

Именно Обнинской АЭС, созданной под руководством Курчатова, было суждено стать первой на планете атомной электростанцией, подключённой к энергосистеме. 26 июня 1954 года – дата, когда Обнинская АЭС была запущена в эксплуатацию. Присутствовавшие на запуске академик Дмитрий Блохинцев так описывал этот торжественный момент: «Постепенно мощность реактора увеличивалась, и, наконец, где-то около здания ТЭЦ, куда подавался пар от реактора, мы увидели струю, со звонким шипением вырывающуюся из клапана. Белое облачко обыкновенного пара, и к тому же ещё недостаточно горячего, чтобы вращать турбину, показалось нам чудом: ведь это первый пар, полученный на атомной энергии. Его появление послужило поводом для объятий, поздравлений с лёгким паром и даже для слёз радости...»^[1]. Атомный реактор, построенный командой Курчатова, грубо говоря был огромным паровым двигателем, с той лишь разницей, что работал он благодаря энергии радиоактивного распада. В общих чертах принцип работы реактора заключается в следующем: в его активную зону, где идет процесс деления урановых ядер, загружается топливо, чаще всего оксид урана. Проходящие через эту зону каналы с водой под действием энергии распада нагреваются, и вода преобразуется в пар. Пар приводит в движение турбины, производящие электричество, а затем снова превращается в воду, и возвращается в реактор. Обнинская АЭС стала масштабным экспериментальным проектом для испытания новых технологий. Большинство из этих исследований легли в основу строительства других энергетических объектов: Белоярской, Билибинской и Ленинградской АЭС. Многие принципы и механизмы, апробированные в Обнинске, позже применялись при создании атомных ледоколов и подводных лодок. И, разумеется, станция стала центром подготовки новых специалистов. Её запуск стал самой настоящей мировой сенсацией, новость появилась в ведущих изданиях планеты, а зарубежные учёные признали, что их советские коллеги добились больших успехов, обеспечив своей стране первенство в атомной отрасли. В 1955 году в Швейцарии состоялась первая международная научно-техническая конференция по мирному использованию атомной энергии, где ядерная энергетика была официально признана новым направлением в промышленности^[2].

2.4 Расширение географии мирного атома

С каждым годом география распространения мирного атома становилась всё обширнее. Так, в 1956 году в Великобритании заработала АЭС Calder Hall. Спустя год запущена американская АЭС Shippingport Atomic Power Station. А в 1959 году собственной станцией Site nucléaire de Marcoule обзавелась и Франция. После запуска первой, Обнинской, АЭС, Курчатов продолжил изучать деление атома и принципы работы ядерных электростанций. А тем временем атомная энергетика во

всю шагала по Союзу. Так, к 1985 году в стране энергию вырабатывали уже 13 ядерных электростанций, в том числе и в суровых условиях: Кольская АЭС в Заполярье, Билибинская станция в зоне вечной мерзлоты. Специалисты из СССР построили более 30-ти энергоблоков и за рубежом: в Чехословакии, Финляндии, Венгрии, Болгарии, ГДР.

2.5 Атом в судостроении

Успехи ядерной физики произвели настоящую революцию на Советском флоте. Теперь подлодки могли месяцами находиться под толщей воды, обгоняя надводные корабли и перемещаясь на огромные расстояния. Первая Отечественная атомная подводная лодка «Ленинский комсомол»⁴ была спущена на воду в 1957 году. Над её созданием работало 35 институтов, более двадцати конструкторских бюро, и около 100 промышленных предприятий. К середине девяностых годов были построены уже 245 атомных субмарин. За этот период было создано пять поколений подводных лодок с ядерной силовой установкой. Конец пятидесятых стал точкой отчёта и для истории атомного надводного флота. Первый в мире атомный ледокол «Ленин»⁵ вошел в строй в 1959 году. Его возможности позволили в разы продлить сроки навигации в Арктике и увеличить объёмы грузооборота на Северном морском пути. В течение 30 лет он был и атомным университетом, где отрабатывались навыки круглогодичного арктического мореплавания, улучшали технологии и готовились новые кадры для атомного флота. В 1977 году экипаж атомохода Арктика совершил самое выдающееся достижение в истории атомного ледокольного флота: впервые в мире достигнув географической точки Северного полюса в свободном Ледовом плавании. А ещё атомные технологии стали успешно применяться для электропитания космических летательных аппаратов.

2.6 Атом в космосе

Разработка ядерных ракетных двигателей началась ещё в 1951 году. Кульминацией ядерной космической программы СССР был пуск уникального реактора ИВГ – 16 в Семипалатинске в 1972 году для исследования различных характеристик будущих космических аппаратов. Он стал основой для экспериментов, способствовавших развитию этого направления. Обеспечение работы спутниковой связи, экологического мониторинга, межорбитальные транспортировки грузов, полёты к кометам – всё это становится проще благодаря использованию атомных энергоустановок.

Атомные двигатели функционируют за счет ядерных реакций, использующих больше количества энергии для создания тяги. Эти двигатели могут работать как на основе термоядерного синтеза, так и используя деление ядерных атомов. Ключевым преимуществом ядерных двигателей является высокая удельная энергия, что означает, что они могут генерировать огромное количество энергии при меньшем количестве топлива по сравнению с химическими двигателями. Также они обладают долговечностью и способны функционировать в течение длительного времени без необходимости в перезаправке, что делает их привлекательными для длительных космических миссий. Однако, сложность разработки ядерных технологий и высокая стоимость таких систем могут стать серьезными преградами для их внедрения. Кроме того, следует учитывать возможные проблемы безопасности, связанные с радиационными рисками и необходимостью защиты окружающей среды.

Рассмотрим подробнее ключевые преимущества атомных двигателей.

1. Высокая энергетическая плотность.

Ядерное топливо, такое как уран или плутоний, содержит огромное количество энергии в сравнении с химическими топливами. Это позволяет атомным двигателям производить значительное количество энергии при относительно малом объеме и массе топлива. Благодаря этому, космические корабли могут утилизировать меньше ресурсов для достижения нужной скорости, что существенно увеличивает их полезную нагрузку.

2. Долговечность и продолжительность работы.

Атомные двигатели могут работать в течение длительного времени без необходимости в дозаправке. В отличие от химических двигателей, которые используют топливо, быстро исчерпывающееся во время запуска, атомные двигатели способны функционировать на протяжении многих месяцев, а иногда и лет, благодаря постоянному распаду ядерного топлива. Эта долговечность делает атомные двигатели идеальными для долгосрочных миссий, таких как исследования дальних планет или межзвездные поездки, где регулярная перезарядка невозможна.

3. Эффективность на больших дистанциях.

Атомные двигатели предлагают отличные показатели эффективности, особенно на больших космических расстояниях. Их способность поддерживать постоянную тягу в течение продолжительного времени позволяет кораблям достигать высоких скоростей. На больших дистанциях традиционные химические двигатели становятся менее эффективными, так как они не могут поддерживать необходимую мощность на протяжении долгих периодов полета. Атомные двигатели обеспечивают стабильную тягу, что существенно сокращает время, необходимое для достижения удаленных целей.

4. Возможность маневрирования в космосе.

Атомные двигатели обеспечивают не только высокую тягу, но и возможность точного маневрирования. Это становится важным на этапе навигации, особенно при подходе к целям, где необходимо учитывать различные параметры, такие как гравитация, существующие астероиды и другие космические объекты. Возможно использование малой мощности для выполнения тонких маневров, что увеличивает точность навигации и снижает риски аварий.

5. Энергообеспечение космических миссий.

Ядерные двигатели могут предоставлять не только тягу, но также электрическую энергию для различных систем космического аппарата. Это означает, что они могут обеспечивать жизнедеятельность заблокированных экипажей на борту, поддерживать работу научных приборов и систем связи. В условиях глубокого космоса, где солнечные панели могут быть неэффективными, атомные двигатели становятся надежным источником энергии.

2.7 Атомные взрывы для народного хозяйства

Где ещё нашла своё применение атомная энергетика? В медицине, сельском хозяйстве, химической промышленности, гидрогеологии, научных исследованиях в области биологии, физики и химии. Есть ещё одна сфера, где не обошлось без мирного атома. В период с 1965 по 1980-е годы в Советском Союзе произведено 124 подземных ядерных взрыва^[3], целью которых были, к примеру, разведка полезных ископаемых, создание подземных ёмкостей, перемещения грунта или дробление руды.

2.8 Аварии на АЭС.

Пожалуй, самое худшее что может случиться на АЭС, это когда что-то начинает идти не так, и оперативный персонал не понимает, что происходит и не знает, что делать, и ситуация полностью становится неконтролируемой. В качестве примера мы рассмотрим аварии на АЭС Three Mile Island в США и Чернобыльской АЭС в СССР.

2.8.1 АЭС Three Mile Island.

АЭС Three Mile Island^{8,9}, возведенная в 1968 году на небольшом острове посреди реки, неподалеку от густонаселенного Гаррисберга, штат Пенсильвания, США, изначально задумывалась как источник доступной электроэнергии для региона. Выбор места был обусловлен необходимостью огромного количества воды для охлаждения реакторов.

Однако, 28 марта 1979 года второй энергоблок станции стал эпицентром самого серьезного инцидента в истории атомной энергетики США. Авария привела к частичному расплавлению

активной зоны реактора и утечке радиоактивных веществ в окружающую среду, получив 5-й уровень опасности по международной шкале ядерных событий (INES), максимальный уровень которой – 7.

Реакторы на Three Mile Island относились к типу водо-водяных, с активной зоной, содержащей 170 топливных сборок (ТВЭЛов), каждая из которых состояла из 200 топливных элементов с оксидом урана. Вся реакторная установка была надежно защищена бетонной оболочкой.

Причины аварии до сих пор являются предметом споров, но основными факторами стали: нарушение протоколов эксплуатации, технические неполадки и человеческие ошибки.

Хронология событий началась в 4 часа утра 28 марта, когда операторы зафиксировали внезапную остановку насосов, обеспечивающих подачу воды во второй контур. Это привело к повышению давления в первом контуре. Автоматически включились аварийные насосы и система защиты реактора, заглушив его. Однако, аварийные насосы оказались неработоспособными, так как запорная арматура была перекрыта. Операторы не заметили этого, поскольку сигнальные лампы были закрыты табличками, предупреждающими о ремонтных работах.

Предполагается, что за день до аварии, во время попыток прочистить забитую ионообменной смолой трубу второго контура с помощью сжатого воздуха, произошла поломка обратного клапана. Интенсивное использование клапана, вероятно, привело к его неисправности и попаданию воды в пневматическую систему. Поскольку эта система использовалась для привода арматуры, вода вызвала сбой в ее работе, что считается одной из ключевых причин аварии.

Невозможно мгновенно остановить выделение остаточного тепла из активной зоны реактора. Поэтому температура и давление в первом контуре продолжали расти. Сработал предохранительный клапан у компенсатора давления, и избыток воды начал сбрасываться в специальный бак-барботер. Клапан должен был автоматически закрыться после нормализации давления, но из-за неисправности остался открытым, что привело к дальнейшему сбросу кипящей воды. Бак-барботер переполнился, его защитная мембрана лопнула, и радиоактивная вода и пар начали поступать в герметичную оболочку.

Через две минуты после остановки реактора сработала система аварийного охлаждения активной зоны, но из-за неисправности клапана она также сливала воду в герметичное помещение. Через восемь минут операторы обнаружили закрытые задвижки второго контура, но их открытие не помогло. В результате потери теплоносителя образовался пар, который вытеснил воду в компенсатор давления.

Операторы, ошибочно полагая, что система наполнена водой и стабильна, отключили один из аварийных насосов и циркуляционные насосы из-за сильной вибрации. К 6 часам утра вода в корпусе реактора полностью испарилась, и ТВЭЛы начали нагреваться до температуры, превышающей 2000 °С. Началось плавление топливных элементов, а пароциркониевая реакция привела к выделению водорода. Персонал станции не осознавал масштабов катастрофы и потери контроля над реактором.

В 6:20 персонал первой смены обнаружил утечку теплоносителя и перекрыл отсечной клапан, предотвратив дальнейшую потерю воды. Примерно через час были вновь запущены аварийные и циркуляционные насосы. Контакт воды с расплавленным топливом образовал корку, блокирующую доступ воды в центр активной зоны. Вода заполнила лишь часть окружающего пространства, частично снизив температуру. Из-за образования парогазовых полостей вода не могла полностью заполнить активную зону, раскаленную до 2500 °С. Радиоактивная лава начала прожигать себе путь к основанию реактора.

28 марта был обычным весенним днем для жителей Гаррисберга, не подозревавших о разворачивающейся в нескольких километрах от них трагедии, которая могла обернуться крупнейшей техногенной катастрофой в истории США с потенциальными сотнями тысяч жертв.

В худшем сценарии развития событий, 50 тонн урана могли прожечь корпус реактора и бетонное основание, попав в землю и заразив грунтовые воды.

Утром того же дня информация об аварии попала к журналистам и была немедленно распространена местными радиостанциями. К полудню радиоактивность была зафиксирована на щите управления и над вентиляционной трубой машинного зала.

29 марта Роджер Мадсон, председатель комиссии по ядерному регулированию, сообщил об огромном скоплении водорода под крышкой реактора и в гермооболочке, который мог взорваться в любой момент. Взрыв мог привести к выбросу радиоактивного пара и ядерного топлива в атмосферу, вызвав гибель десятков тысяч человек.

Возникла настоятельная необходимость в эвакуации около полумиллиона жителей Пенсильвании из 16-километровой зоны. Губернатор Ричард Торнберг был потрясен. Радиационная разведка с вертолета показала, что уровень ионизирующего излучения над трубой машинного зала достигает 3 рентген в час, а внутри гермооболочки уровни могли оказаться смертельными за считанные минуты. Правительство пыталось убедить население в отсутствии серьезной опасности.

В ночь с 29 на 30 марта губернатор принял решение об эвакуации 500 тысяч человек. 30 марта Торнберг объявил на пресс-конференции: «По настоянию федерального совета по ядерному регулированию, я настоятельно рекомендую беременным женщинам и детям дошкольного возраста покинуть 8-километровую зону, прилегающую к атомной станции».

1 апреля президент США Джимми Картер¹⁰ лично посетил станцию, чтобы успокоить общественность и продемонстрировать, что ситуация под контролем. Работы по контролируемому удалению водорода были успешно завершены во время визита президента. В этот же день ситуация на станции была стабилизирована.

Согласно официальным данным, в результате аварии никто не погиб и не получил значительной дозы облучения. Радиоактивные частицы, в основном ксенон-133 и йод-131, попали во вспомогательное здание реактора через протечки, а затем в окружающую среду. Благодаря использованию фильтров-адсорберов, выбросы были относительно незначительными. Активность выброшенного йода составила не более 15 кюри, а ксенона – 2,5 миллиона кюри. Наиболее ощутимые негативные последствия были связаны с паникой и стрессом среди населения.

Авария на Three Mile Island вызвала широкий общественный резонанс и привела к массовым антиядерным протестам по всей стране. К 1981 году температура реактора была снижена, что позволило отключить циркуляционные насосы^[4].

2.8.2 Чернобыльская АЭС

Говоря об авариях на АЭС первой на ум приходит авария на Чернобыльской АЭС. Но, прежде чем говорить о причинах аварии, стоит рассмотреть устройство реакторов типа РБМК^{11, 12}.

Реакторы большой мощности канальные (РБМК) – это гетерогенные ядерные реакторы, разработанные и построенные в Советском Союзе. Они получили широкое распространение благодаря своей высокой мощности и относительно простой конструкции. Однако, авария на Чернобыльской АЭС в 1986 году выявила серьезные недостатки в конструкции и эксплуатации этих реакторов, что привело к пересмотру их безопасности и модернизации.

Конструктивные особенности^[5, 6]:

- **Тип:** Ядерный реактор с графитовым замедлителем и водяным теплоносителем.
- **Теплоноситель:** Обычная вода, циркулирующая через каналы в активной зоне.
- **Замедлитель:** Графитовые блоки, окружающие топливные каналы, замедляющие нейтроны для повышения вероятности деления ядер урана.
- **Топливо:** Низкообогащенный диоксид урана (UO_2), размещенный в тепловыделяющих элементах (ТВЭЛх), которые, в свою очередь, собраны в тепловыделяющие сборки (ТВС).
- **Активная зона:** Цилиндрическая структура, состоящая из графитовой кладки с каналами для топлива и регулирующих стержней.
- **Регулирующие стержни:** Используются для управления мощностью реактора и его остановки.
- **Контур охлаждения:** Вода, нагретая в активной зоне, поступает в барабан-сепаратор, где образуется пар, направляемый на турбины для производства электроэнергии.

Достоинства РБМК:

- **Высокая мощность:** РБМК были одними из самых мощных реакторов своего времени, обеспечивая значительную выработку электроэнергии.
- **Возможность перегрузки топлива на работающем реакторе:** Конструкция позволяла заменять топливо без остановки реактора, что повышало коэффициент использования установленной мощности.
- **Относительно простая конструкция:** По сравнению с другими типами реакторов, РБМК имели относительно простую конструкцию, что упрощало их строительство и обслуживание.
- **Использование природного или низкообогащенного урана:** Это снижало зависимость от поставок высокообогащенного урана.

Недостатки РБМК:

- **Положительный паровой коэффициент реактивности:** При образовании пара в теплоносителе (кипении воды) реактивность реактора увеличивается, что может привести к неконтролируемому росту мощности. Это было одной из основных причин Чернобыльской аварии.
- **Положительный выбег реактивности при введении стержней аварийной защиты (АЗ):** В ранних конструкциях РБМК конструкция стержней АЗ приводила к кратковременному увеличению реактивности при их введении, что также способствовало развитию аварийной ситуации в Чернобыле.
- **Отсутствие прочного защитного контейнента:** РБМК не имели герметичного контейнента, способного удержать выброс радиоактивных веществ в случае серьезной аварии.
- **Зависимость от человеческого фактора:** Безопасность РБМК в значительной степени зависела от квалификации и действий операторов. Ошибки персонала могли привести к серьезным последствиям.
- **Трудности с контролем и управлением при низких уровнях мощности:** При работе на низких уровнях мощности реактор становился нестабильным и трудно управляемым. Основной причиной аварии на ЧАЭС принято считать стечение ряда факторов^[7, 8]:
 1. Технические недостатки реакторной установки (в частности концевой эффект и низкий оперативный запас реактивности(ОЗР))
 2. Недостаточная квалификация смены БЩУ (блочного щита управления)
 3. Недоработки системы контроля мощности, не позволившие вовремя заметить рост мощности в нижней части реактора.

2.8.3 АЭС Фукусима – 1

АЭС Фукусима-1, расположенная в 220 километрах к северу от Токио на территории одноименной префектуры, стала символом как прогресса, так и трагедии. Она была построена на границе поселков Футаба и Окума и стала одной из первых атомных станций в Японии. Созданная по заказу Токийской электроэнергетической компании (ТЕРСО), Фукусима-1 стала важной частью энергетической инфраструктуры страны. В составе АЭС работали шесть энергоблоков с кипящими реакторами¹³.

На станции работали шесть энергоблоков, использующих кипящие реакторы, которые обеспечивали огромные объемы электроэнергии. Реакторные установки на Фукусиме-1 были возведены разными компаниями: американская корпорация General Electric осуществила создание установок для первого, второго и шестого энергоблоков, в то время как для третьего и пятого блоков работу выполнила компания Toshiba, а четвертый был построен Hitachi.

Однако 11 марта 2011 года трагически изменило ход ее истории. Землетрясение магнитудой 9,0 и последующее цунами вызвали катастрофу на Фукусиме-1, которая в один миг разрушила все достижения и привела к аварии, заполнившей страницы истории ужасом и скорбью. В 14:46 по местному времени произошло Великое восточно-японское землетрясение магнитудой 9,0 с эпицентром в 180 километрах от АЭС Фукусима-1. В момент подземных толчков энергоблоки № 1–

3 функционировали на полную мощность, а блоки № 4–6 находились в состоянии ремонта и перегрузки топлива.

Землетрясение привело к автоматическому отключению работающих реакторов, однако, несмотря на разрушение высоковольтного оборудования и выход линий электропередачи из строя, станция в целом справилась с сейсмическими ударами. Однако это было лишь начало катастрофы. Смещение горных пород вызвало деформацию морского дна, что, в свою очередь, привело к возникновению нескольких разрушительных волн цунами. Первая волна высотой 4 метра достигла станции через 40 минут, но именно вторая волна, высотой 14–15 метров, пришла в 15:35 и превысила защитную дамбу, рассчитанную на максимум в 5,5 метров.

Из-за отсутствия защиты от такой стихии критически важное оборудование, необходимое для безопасного охлаждения реакторов, оказалось под угрозой. Береговые насосы, использовавшиеся для заборной морской воды, вышли из строя, а наводнение затопило подвалы, где располагались дизель-генераторы и распределительные устройства. Хотя некоторые резервные генераторы не пострадали, их электрооборудование было повреждено, что сделало восстановление электроснабжения крайне сложной задачей.^[9]

В хаосе на станции погасло освещение, и управление резко затормозилось — информация о состоянии реакторов перестала отображаться на экранах, а средства связи внезапно вышли из строя. Персоналу пришлось прибегать к карманным фонарям, читая аварийные инструкции, да вот только в них ничего на случай подобных аварий предусмотрено не было. За неимением указаний и необходимых инструментов, они были вынуждены действовать исходя из собственного восприятия происходящего.

В 00:55 управляющий Масао Есида, ощущая груз ответственности, уведомил кризисный центр ТЕРСО в Токио о критической ситуации и призвал к срочному сбросу давления. Этот момент стал историческим для компании — осознавая серьезность положения, руководство поняло, что без вмешательства правительства не обойтись. Премьер-министр Наото Кан и министр экономики, торговли и промышленности Банри Кайэда решились на рискованный шаг, понимая, какие последствия могут возникнуть от выброса радиоактивных веществ в воздух.

К 9:00 поступили новости об эвакуации населения. Первая группа сотрудников, освещая путь фонарями, поднялась на второй этаж реакторного здания и к 09:15 смогла вручную открыть один из клапанов. Однако другая группа, направившаяся к клапану в подвале, столкнулась с высокими уровнями радиации и вынуждена была отступить, опасаясь превышения допустимой дозы. К 12:30 они отыскали компрессор у одной из подрядных организаций, и к 14:00 его удалось подключить. Мобильный генератор обеспечивал питание управляющего соленоида, который приводил в действие клапан вентиляции.

Пока спасатели неустанно сражались с кризисом на первом энергоблоке Фукусимы, второй и третий блоки оставались относительно спокойными благодаря системе охлаждения. Она работала с помощью паровой турбины и насоса Reactor Core Isolation Cooling (RCIC), который подавал охлаждающую воду в реактор. Удивительно, но даже когда второй блок остался без электроэнергии, система продолжала функционировать — ее удалось активировать всего за несколько минут до отключения. К сожалению, на третьем блоке вскоре произошла неприятность: система RCIC отключилась, несмотря на наличие питания. Падение уровня теплоносителя активировало систему аварийной подпитки (HPCI), но, несмотря на свою мощность, она не была рассчитана на длительную работу. В 02:42 13 марта систему HPCI остановили вручную. Однако попытки открыть предохранительные клапаны потерпели неудачу — нехватка тока от батарей не позволила этого сделать. Давление в реакторе возросло до критических 4,1 МПа, что превышало возможности насосов.

Когда Есида узнал о критической ситуации на третьем блоке, его охватила тревога и решимость. Он решил подключить пожарные машины для охлаждения. Сначала команда планировала использовать морскую воду, и в начале седьмого утра люди начали протягивать рукава. Но вскоре пришло новое указание — использовать обессоленную воду. Это требовало срочной работы, и сотрудники спешно расчищали путь к резервуарам с пресной водой. К 09:08 работники ТЕРСО подключили десять аккумуляторов от частных автомобилей к панели управления, создав напряжение в 120 В. Это дало возможность открыть клапаны на третьем блоке. Давление снизилось до 0,46 МПа, и в 09:25, спустя более семи часов после остановки НРСІ, вода наконец начала поступать в реактор.

14 марта 2011 года у инженеров АЭС Фукусима-1, закрались мысли о возможном взрыве водорода на третьем энергоблоке. К 07:30 удалось возобновить ликвидационные работы, и пожарные машины начали забор воды из океана. Однако вскоре, в 11:01, всю тишину нарушил оглушительный взрыв. Этот произошедший инцидент унес несколько жизней сотрудников ТЕРСО и Сил самообороны Японии, заставив прервать работы. Надежды на слаженную работу уходили в никуда, как и запасы охлаждающей воды.

К 13:25 система RCIC второго энергоблока стала демонстрировать явное снижение эффективности из-за критически низкого уровня теплоносителя. На фоне этого кризиса продолжалась упорная борьба: к вечеру давление в реакторе удалось снизить до 0,63 МПа. К 19:57 вновь заработали пожарные машины, и, казалось, на горизонте появилось светлое будущее, но к 22:50 давление в гермооболочке вновь превысило допустимые значения, и предохранительная мембрана не выдержала нагрузки.

На станции к 06:10 новая смена столкнулась с нарушением спокойствия, когда раздался очередной взрыв. Быстро направленные в защищенный пункт, сотрудники увидели разрушения четвертого энергоблока. Позже выяснилось, что взрыв был вызван водородом, который поступал из третьего блока. Хотя взрыв на втором блоке не произошел, но пароциркониевая реакция в расплавленной активной зоне продолжалась. Водород выходил через вышибную панель реакторного здания. Панель оказалась сорвана со своего места и упала на крышу примыкающего здания после взрыва на одном из соседних блоков. По мнению экспертов, именно второй энергоблок стал основным источником радиоактивного загрязнения.

Только после доставки передвижных распределительных устройств и трансформаторов, а также прокладки временных кабелей внешнее электропитание 1-го и 2-го энергоблоков было восстановлено 20 марта, через 9 суток после начала аварии, а питание 3-го и 4-го блоков было налажено 26 марта, через 14 дней после обесточивания. 16 декабря 2011 года стадия аварии была официально завершена. По Международной шкале ядерных событий (INES) аварии был присвоен максимальный, 7-й уровень — «Крупная авария», который ранее присваивался лишь однажды при аварии на Чернобыльской АЭС, хотя последствия данной аварии несравнимо меньше Чернобыльских.

2.9 Причины привлекательности атомной энергетики

Если задаться вопросом, почему ядерная энергетика настолько привлекательна для современной цивилизации, несмотря на возможные последствия в случае аварии, то, ответ будет банальным, но, тем не менее, интересным. Основная причина в её колоссальной энергоёмкость. Так, обогащённый до 4% килограмм урана при полном выгорании выделяет энергию, равную энергии, полученной при сжигании 100 тонн каменного угля, или 60 тонн нефти. Ещё одно преимущество, по сравнению с органическим топливом, - экологический фактор. При сжигании топлива атомные станции не потребляют кислород, не выбрасывают в атмосферу вредные химические вещества и не способствуют созданию парникового эффекта. Установлено, что европейские АЭС помогают

избежать выбросов 700 млн тонн углекислого газа в год. В России этот показатель более скромный: всего около 210 млн тонн в год. Кроме того, атомная энергетика довольно выгодна. Топливо можно использовать по второму кругу после регенерации, а в настоящее время ведутся работы над переходом к замкнутому, безотходному топливному циклу с использованием реакторов на быстрых нейтронах. Эта технология позволит вырабатывать электроэнергию с использованием отработанного ядерного топлива, а ещё исключить катастрофы на АЭС и избежать эвакуации населения при возможных сбоях.

2.10 Современная география АЭС

Сейчас в мире функционирует более 400 АЭС в 34 странах мира¹⁴, из них 11 на территории России. Около 70% мировой атомной генерации приходится на пять государств: Россию, США, Францию, Китай и Южную Корею. Сегодня в России в общем энергобалансе страны доля атомной генерации достигла 20%, а к 2050 году планируется увеличить этот показатель до 35%^[10]. Вместе с разработкой мощных реакторных установок ведутся работы и по развитию малой энергетики, которая особенно важна для дальнего севера. В этих труднодоступных регионах целесообразнее устанавливать источники ядерной энергии малой мощности, с минимумом сложного оборудования и упрощённой технологической схемой. Одной из таких стала ПТЭС «Академик Ломоносов»¹⁵.

2.11 Термоядерный синтез

Ещё одно наиболее перспективное и обсуждаемое направление атомной энергетики - термоядерный синтез. А что вообще такое этот термоядерный синтез? Изначально это реакция, которая помогает Солнцу и другим видимым звёздам непрерывно вырабатывать энергию. Отличие синтеза от реакции распада, где из тяжёлых ядер получаются более лёгкие, заключается в объединении двух лёгких атомных ядер в одно более тяжёлое с высвобождением громадного количества энергии. Так в Солнечном ядре под влиянием высокой температуры водород превращается в гелий с выделением большого количества тепла, потому оно, собственно, светит и греет. Условия для термоядерного синтеза, в состоянии которого находится 99,8% массы солнца, создаются в результате огромнейшего давления, создаваемого мощной гравитацией звезды. С этим явлением учёные знакомы уже более 100 лет. Причины сияния солнца и мерцания звёзд оставались для человечества непостижимой тайной, пока в 1920 году британский астрофизик Артур Эддингтон не предположил, что звёзды наделены бесконечной энергией за счёт синтеза водорода в гелий. Его труд «Внутреннее строение звёзд» стал основой современной теоретической астрофизики. 1934 год стал стартовой точкой современных исследований в сфере термоядерного синтеза, когда Эрнест Резерфорд смог осуществить синтез открытого за пару лет до этого дейтерия, тяжёлого изотопа водорода, в гелий.

Тогда же был открыт третий тяжелый изотоп водорода: тритий. Его изучал и пытался сталкивать его ядра с ядрами дейтерия австрийский физик Марк Олифант. Как раз он и обнаружил, что при слиянии этих ядер и образовании ядра гелия высвобождается один нейтрон, и в совокупности 17,56 МэВ энергии, то есть гораздо больше энергии, чем при реакции распада. Первым устройством, в котором термоядерный синтез применили на практике, стала водородная бомба. Её дебютные испытания прошли в Советском Союзе в 1953 году под руководством того же Курчатова. Однако использовать выделившуюся при взрыве энергию было делом невозможным, поэтому ещё с середины прошлого века в России, США и некоторых других странах пытаются решить проблему управляемого термоядерного синтеза, создавая различные экспериментальные установки. Позже Игорь Курчатов обосновал важность финансирования исследований по созданию условий для управляемого термоядерного синтеза. Так в 1956 году на двадцатом съезде КПСС Курчатов убеждал научное сообщество развернуть масштабную деятельность для работы над новыми технологиями. Всю оставшуюся жизнь он посвятил попыткам добиться управляемой реакции, а затем его исследования продолжили другие советские учёные.

В 1958 году, в Женеве, на второй международной конференции ООН по использованию атомной энергии в мирных целях впервые сделан доклад об исследованиях в области термоядерного синтеза, а начиная с 1974 каждые 2 года МАГАТЭ проводит такую конференцию с целью развития отрасли и мотивации новых достижений. Термоядерная реакция - самый мощный и впечатляющий источник энергии, когда-либо испытанный человечеством. Количество энергии, выделяемой при таком синтезе, в четыре раза больше, чем при реакциях деления ядер, поэтому термоядерные электростанции были бы намного эффективнее атомных, а главное, ещё и безопаснее для человека и окружающей среды. Термоядерное топливо в избытке, и его несложно получить. Дейтерий добывается из морской воды, а тритий из широко распространённого в природе лития.

Но почему же так сложно подчинить термоядерную энергию, ведь все слышали историю о том, как в 2018 году подросток сумел провести термоядерный эксперимент в домашних условиях? К сожалению подобные опыты давали эффект, который удерживался лишь доли секунды. Поэтому одной из главных задач учёных ядерщиков было создание управляемого термоядерного синтеза. Дело в том, что когда ядра положительно заряжены, они испытывают электростатическое отталкивание. Чтобы заставить ядра дейтерия и трития слиться, нужно приложить огромную энергию. Внутри звёзд с этим справляется сильнейшая гравитация, которую невозможно воссоздать на земле. Альтернативой может стать температура в сотни миллионов градусов, при которой вещество перейдёт в четвёртое агрегатное состояние, то есть в плазму. Кроме того нужно создать замкнутое пространство для удержания плазмы, чтобы полученное количество термоядерной энергии было больше количество энергии, затраченной для повышения температуры. Основная проблема заключается даже не в получении сверх горячей плазмы, а в том, чтобы удержать её от соприкосновения с любой поверхностью, ведь никакой материал не способен выдержать таких температур.

Ещё в 1950 годах советскими физиками было предложено решение: кольцевая тороидальная камера с магнитными катушками, или токамак, где плазма удерживается за счёт магнитного поля. Первый в истории токамак¹⁶ появился в Советском Союзе в 1954 году. После этого в СССР, а затем и в мире были построены сотни таких установок.

Одновременно с разработкой токамака развивалось направление инерциального управляемого синтеза. Это менее проработанный, но довольно перспективный способ удержания плазмы. Его принцип заключается в стремительном нагреве термоядерного топлива, к примеру, с помощью мощных лазеров. В результате этого образовавшаяся плазма удерживается в сжатом состоянии под действием собственной инерции. Это называется инерциальным удержанием. Так, на короткое время в реакторе создаётся температура и давление нужное для слияния ядер. Сейчас эти два подхода, магнитный и инерциальный, основные в исследованиях термоядерного синтеза с точки зрения выработки энергии. Учёными многих стран наиболее перспективными признаны именно токамаки.

Долгое время после запуска первого токамака эти установки существовали только в СССР, тогда как в остальном мире почти никто не верил, что внутри камеры может быть настолько высокая температура. Однако, после того как в Советском Союзе побывали английские учёные, всё изменилось. Это случилось в 1968 году. Тогда на токамаке ТЗ, построенном в институте атомной энергии имени Курчатова, была достигнута температура плазмы в 11,6 млн градусов. Ещё одно достижение создателей ТЗ – удержание плазмы в состоянии равновесия в течение 10 миллисекунд, так как отклонение термоядерной плазмы считалось большой проблемой, ведь оно сразу приводило к повреждению установки. За всю историю на нашей планете создано более 300 токамаков, однако все важные открытия и достижения на начальном этапе развития термоядерного синтеза были сделаны именно в Курчатовском институте.

2.12 Росатом – история успеха

После развала СССР в России всё больше нарастала необходимость создания организации, которая объединила бы все направления атомной отрасли. Так в 2007 году была образована государственная корпорация по атомной энергии: Росатом. Её создание обеспечивало новые

условия для отечественной ядерной энергетики и усиления преимущества страны на мировой атомной арене. Росатом сегодня - это многопрофильный холдинг, объединяющий активы не только в энергетике, но и в машиностроении и строительстве. Эта госкорпорация - национальный лидер по выработке электроэнергии: около 20% от общего объема, и занимает первое место в мире по количеству заказов на сооружение АЭС. В холдинг входит более 450 предприятий и организаций, где работают около 350 тыс человек. Самый современный российский токамак создан специалистами Курчатовского института в сотрудничестве с Росатом. Установка Т-15МД^[11, 12] была запущена в мае 2021 года, а энергетический пуск токамак состоялся в марте 2023 года. Тогда была получена первая высокотемпературная плазма, а уже в конце 2023 года температура плазмы составила около 40 млн градусов, что в два раза выше температуры в центре Солнца. Эти показатели стали рекордными для отечественных токамаков. Журналисты окрестили проект маленьким солнцем на земле. Т-15 МД¹⁷ важен ещё и как прототип термоядерного источника нейтронов, и элемент технологического цикла будущего зелёной ядерной энергетики атомного проекта 2.0, цель которого решение проблемы энергообеспечения без вреда для экологии.

Заключение

Развитие атомной промышленности имеет огромное значение для современного общества и будущего человечества. Значимость атомной промышленности заключается в потенциале для дальнейшего прогресса в технологическом и научном развитии.

Пока ещё имеется достаточное количество исчерпаемых природных ресурсов, но со временем потребность в атомной энергии будет только расти, и к 2050 году общая мощность ядерных реакторов в мире, по расчетам экспертов, увеличится более чем в два раза. Будущее российской и мировой атомной промышленности связано и с развитием водородной энергетики, и массовым производством атомных станций малой мощности для удалённых регионов, таких как «Академик Ломоносов». Реакторы РБМК, несмотря на свои недостатки, сыграли важную роль в развитии атомной энергетики. После Чернобыльской аварии были предприняты значительные усилия по повышению их безопасности. Модернизированные РБМК продолжают работать в России и обеспечивают значительную долю электроэнергии. Однако, вопрос о долгосрочной перспективе эксплуатации этих реакторов остается открытым и требует дальнейших исследований и оценок. Что касается термоядерного синтеза, то экспертное мнение таково: когда человечество его освоит, то сможет заменить им другие виды энергетики во многих сферах.

Мы же по итогам нашего исследования сделали следующие выводы: инвестирование усилий, времени и капитала в развитие атомной промышленности – это стратегическое решение, продиктованное стремлением к энергетической независимости и технологическому прогрессу. Атомная энергетика, как локомотив инноваций, требует значительных вложений, но обещает масштабные дивиденды в виде стабильного энергоснабжения, снижения выбросов парниковых газов и создания высокотехнологичных рабочих мест. Развитие атомной промышленности – это не только строительство новых электростанций, но и модернизация существующих, разработка новых типов реакторов, более безопасных и эффективных, а также развитие сопутствующих отраслей, таких как производство ядерного топлива и оборудования. Это сложный и многогранный процесс, требующий консолидации усилий государства, бизнеса и науки. Вложение в атомную промышленность – это инвестиция в будущее, в устойчивое развитие, в экологическую безопасность и в технологическое лидерство страны. Это путь к созданию мощной и современной экономики, способной конкурировать на мировом рынке.

Список литературы

1. Девять лет одного века: как создавали реактор первой в мире АЭС - <https://strana-rosatom.ru/2024/07/13/devyat-let-odnogo-veka-kak-sozdavali-r/>
2. История мирного атома: От первой АЭС к Термоядерному синтезу - <https://youtu.be/vyPcE7g7Hvk?si=C1tv8NgqnFHj2XWc>
3. Мирные взрывы - <https://vniitf.ru/article/mirnie-vzrivi>
4. Three Mile Island: отчет для уполномоченных и общественности. Том I - III - Роговин, Митчелл, 1980
5. История атомной энергетики Советского Союза и России. Вып. 3. История РБМК. - В.А.Сидоренко, 2003
6. Канальный ядерный энергетический реактор - Н.А. Доллежал, И.Я. Емельянов, 1980
7. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и её последствиях, подготовленная для МАГАТЭ - А.А. Абагян, 1986
8. Подвиг войск РХБ защиты: (К 23-й годовщине подвига участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС) - В. Аксёнов, 2009
9. Арутюнян Р. В., Большов Л. А., Боровой А. А., Велихов Е. П. Системный анализ причин и последствий аварии на АЭС «Фукусима-1», ИБРАЭ РАН, 2018
10. Сценарий развития мировой энергетики до 2050 года: Минэнерго России; 24.24.2024 г. - <https://rosenergo.gov.ru/press-center/news/rea-minenergo-rossii-opublikovalo-rasshirennyu-versiyu-stsenarijev-razvitiya-mirovoy-energetiki-do-2/>
11. Токамак Т-15МД. Новые возможности для российской и мировой науки - <https://topwar.ru/183141-tokamak-t-15md-novye-vozmozhnosti-dlja-rossijskoj-i-mirovoj-nauki.html>
12. Уникальная научная установка "Экспериментальная термоядерная установка токамак Т-15МД - <http://nrcki.ru/catalog/nauka/issledovatel'sko-tehnologicheskaya-baza/unu-tokamak-t-15md/?ysclid=m87tmrz3ie217896999>
13. Атомная энергетика - <https://myatom.ru/wp-content/uploads/2017/04/113.-Атомная-энергетика.-Спрашивали-Отвечаем.pdf>
14. Атомные электростанции - В.М. Зорин, 2012 - https://elib.biblioatom.ru/text/zorin_atomnye_elektrstantsii_2012/p0/
15. Атомное сердце России - В.Н. Новоселов, 2014 - https://elib.biblioatom.ru/text/novoselov_atomnoe-serdtse-rossii_2014/p0/
16. Двигатель: ядерный против химического - <http://u2.lege.net/cetinbal/HTMLdosya1/PropulsionChemical.htm>
17. Основные принципы работы атомных электростанций - <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=135856#text>
18. Космическая ядерная энергетика - Н.Е. Кухаркин, 2012 - https://elib.biblioatom.ru/text/kosmicheskaya-yadernaya-energetika_2012/p199/
19. Опыт есть только у России. Кто еще строит ядерные космические буксиры? - <https://ria.ru/20231029/kosmos-1905710016.html>
20. Программы по технологии ионных двигателей в Исследовательском центре Гленна НАСА - <https://ntrs.nasa.gov/citations/20010041267>
21. Развитие ракетно-космических систем выведения: учебное пособие - Б.К. Ковалев - <https://djvu.online/file/nGyXXV6DyNuJ4>
22. Революции космических путешествий: Увлекательная эволюция ракетных двигателей - <https://spacemesmerise.com/en-us/blogs/space-technology/revolutionizing-space-travel-the-fascinating-evolution-of-rocket-engines>
23. Являются ли Солнечные паруса будущим космических путешествий? - <https://www.space.com/26011-solar-sail-tech-space-exploration.html>
24. Ядерная энергетика для применения в космосе - <http://www.ato.ru/content/nuclear-power-space-applications>
25. Ядерный тепловой двигатель: технология, меняющая правила игры для исследования дальнего космоса - <https://www.nasa.gov/directorates/stmd/tech-demo-missions-program/nuclear-thermal->

[propulsion-game-changing-technology-for-deep-space-exploration/](#)

26. DRACO в космосе: зачем в NASA создают ядерный двигатель -

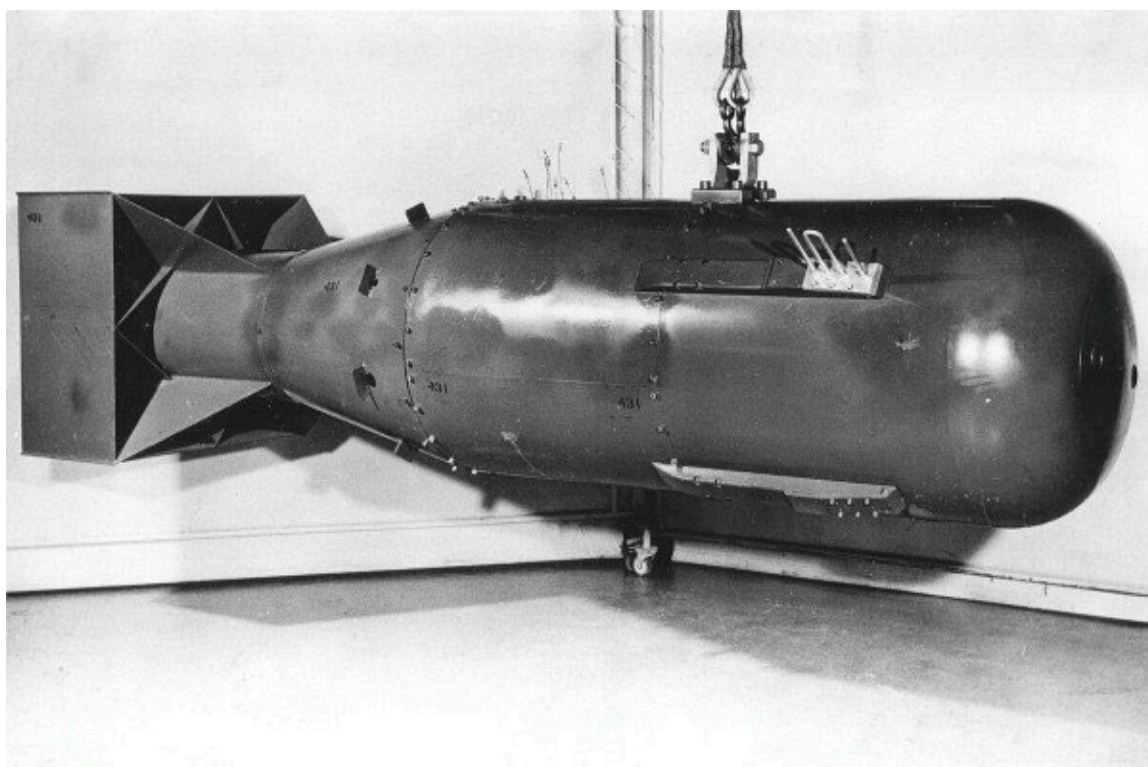
<https://www.forbes.ru/mneniya/493679-draco-v-kosmose-zacem-v-nasa-sozdaut-adernyj-dvigatel>

27. Основные физико-технические характеристики реакторных установок ВВЭР. МАГАТЭ - В.В. Семёнов, 1979

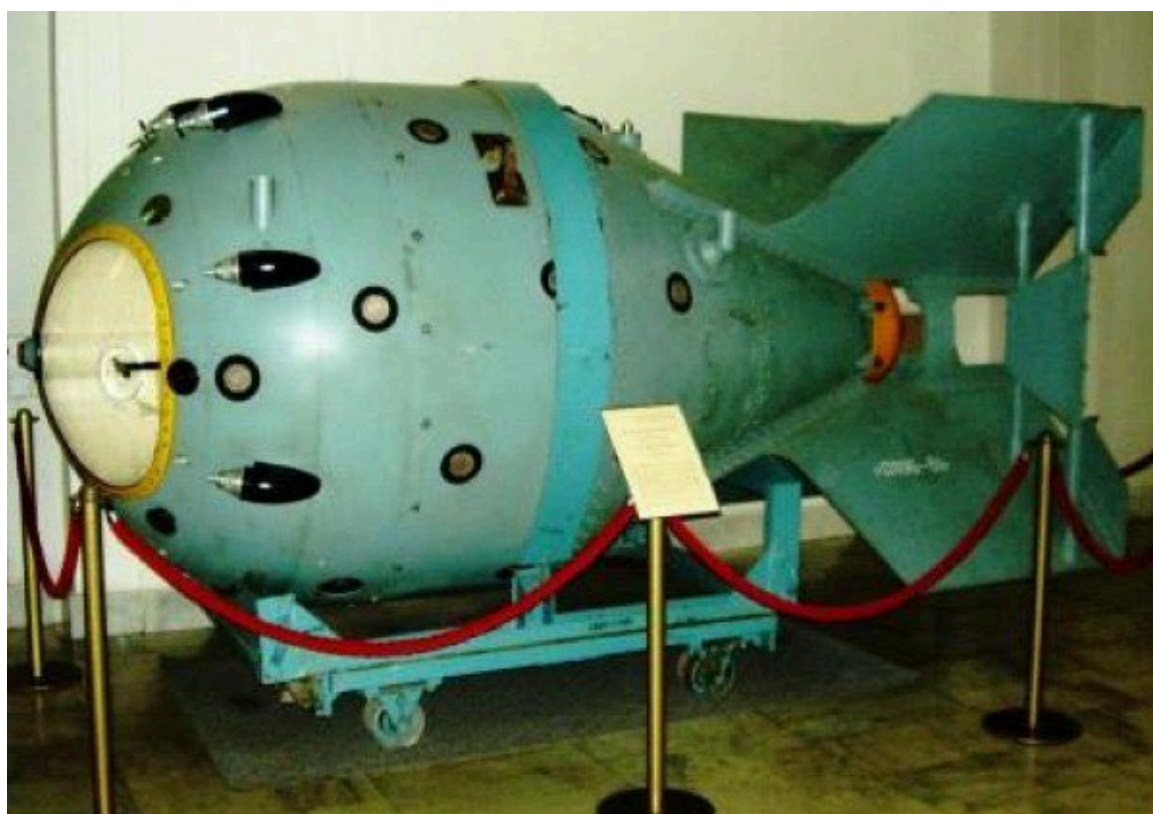
28. Перспективные проекты реакторных установок ВВЭР - В.Я. Беркович, Ю.М. Семченков, 2012

29. Росатом: история успеха - И.И. Шульга, 2017 - https://elib.biblioatom.ru/text/shulga_rosatom-istoriya-uspeha_2017/p0/

Приложение Иллюстрации к тексту



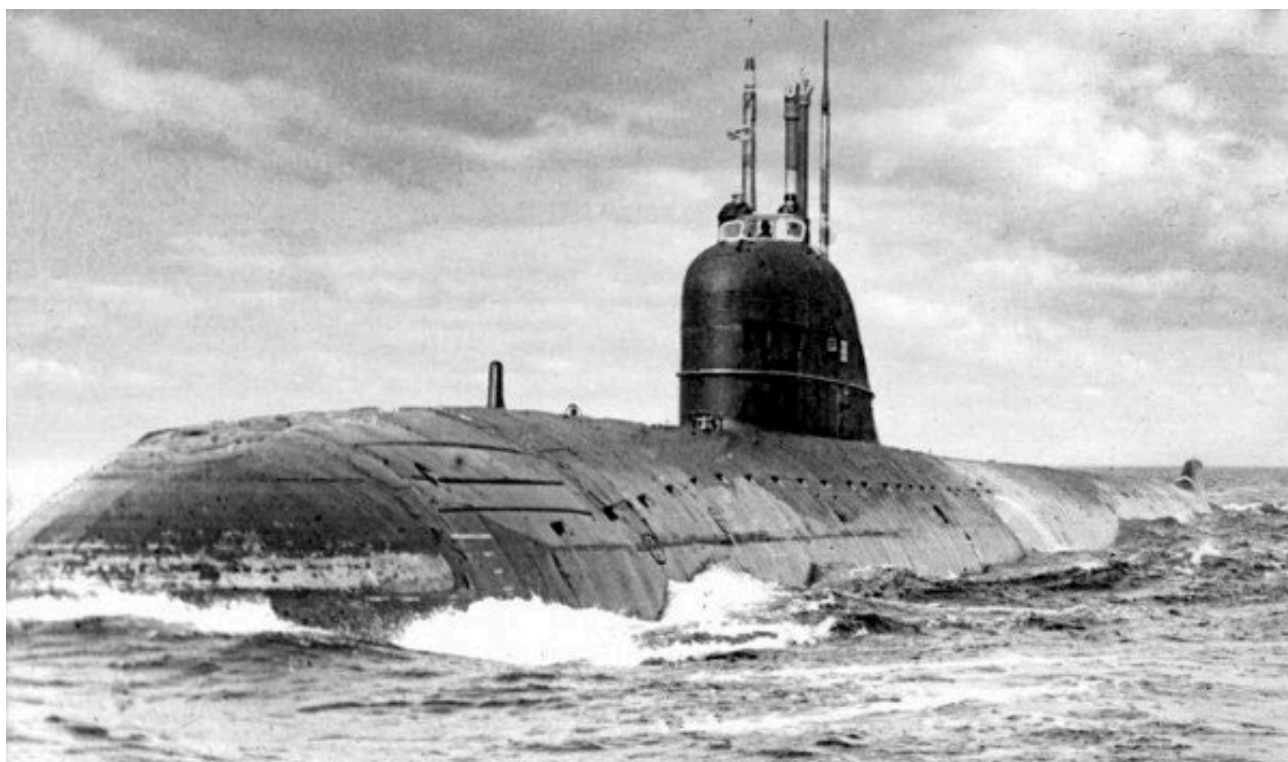
1. Атомная бомба «Малыш»



2. Атомная бомба РДС-1



3. Первый в Европе циклотрон построенный командой Курчатова



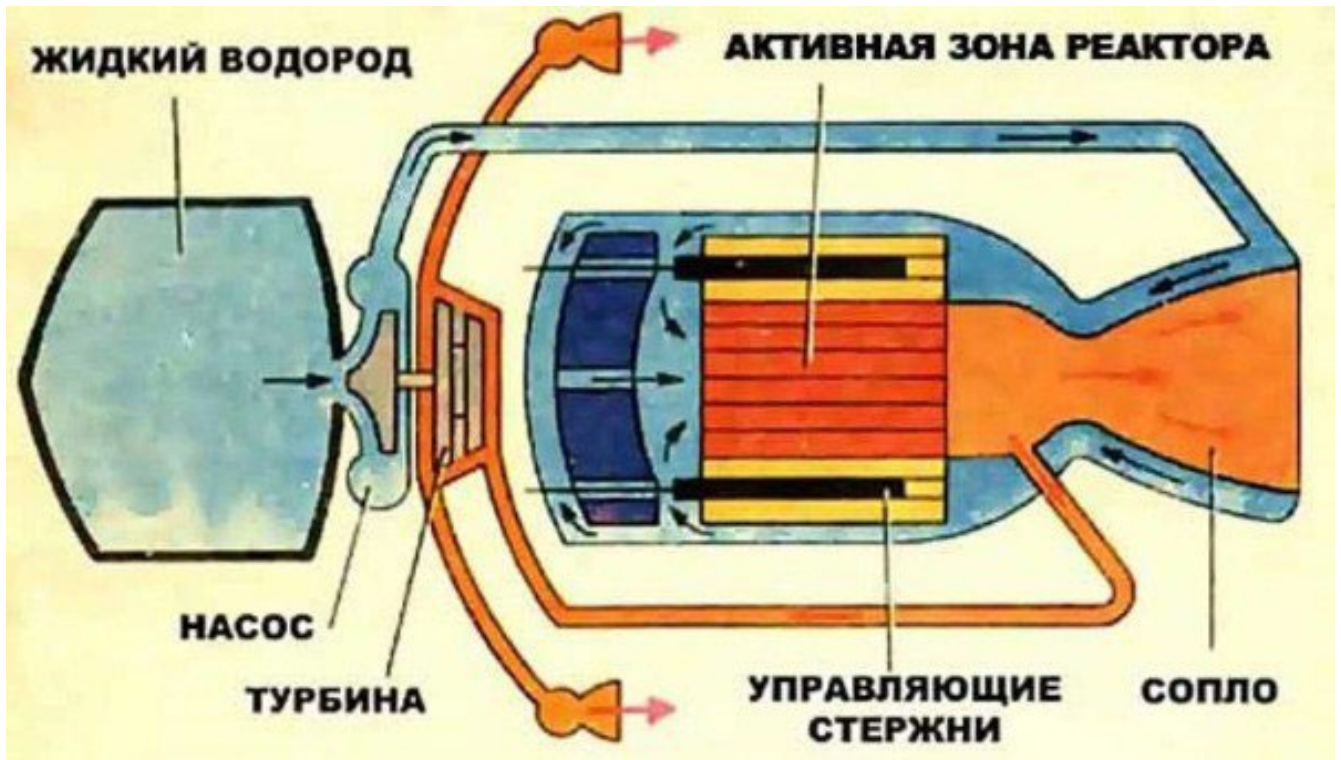
4. АПЛ «Ленинский Комсомол»



5. Атомный ледокол «Ленин»



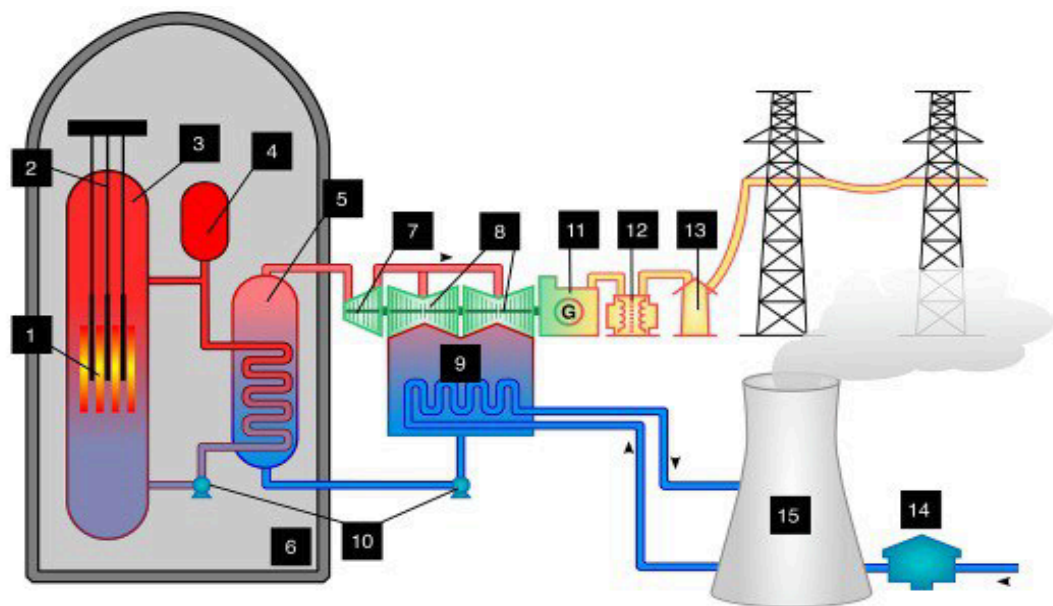
6. ИВГ-1



7. Устройства атомного двигателя



8. АЭС Three Mile Island

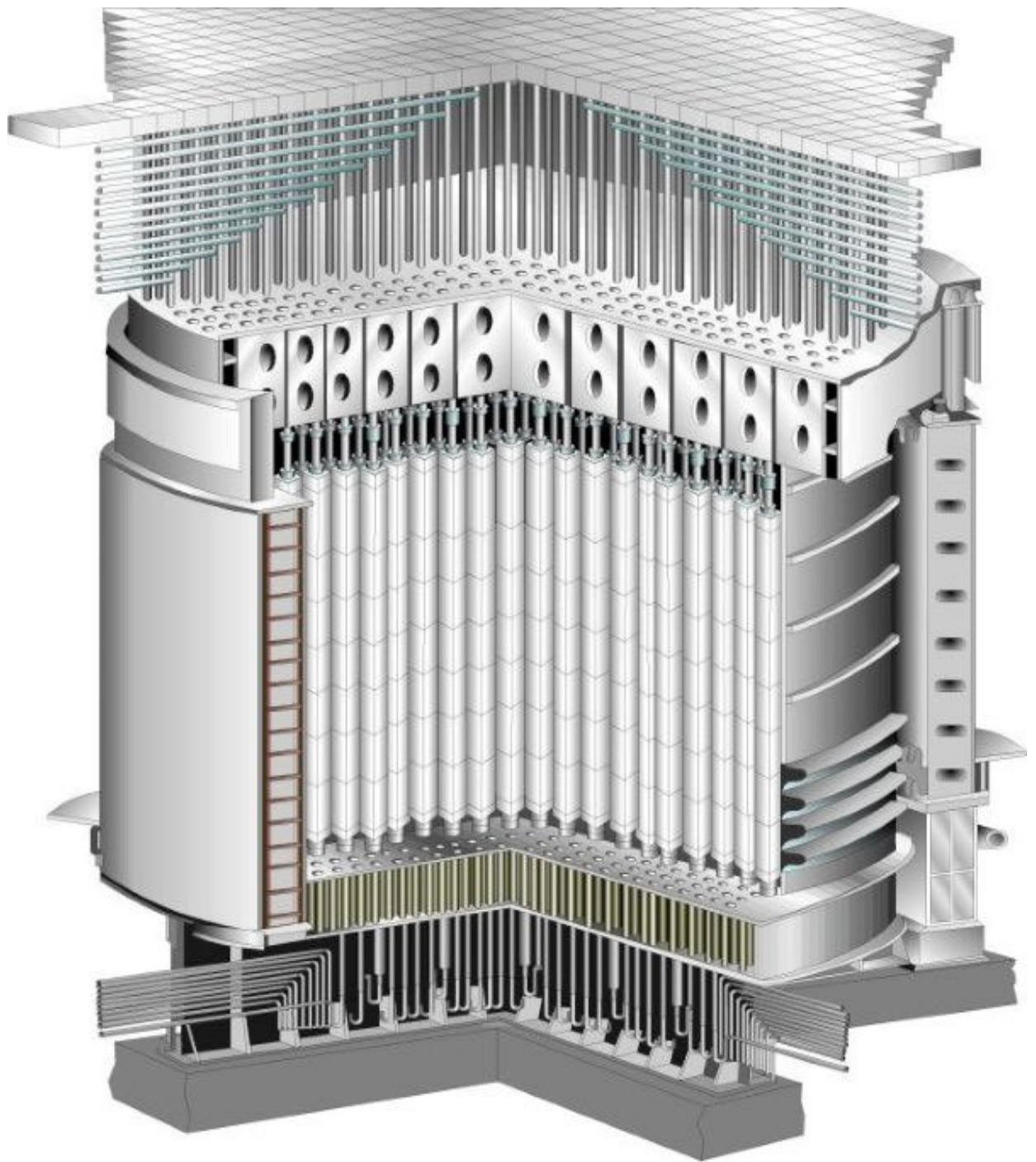


- | | | | |
|---------------------------|-------------------------|------------------------|--|
| 1 Fuel Elements | 6 Containment Structure | 11 Generator | |
| 2 Control Rods | 7 Intermediate Turbine | 12 Transformer | |
| 3 Reactor Pressure Vessel | 8 Low Pressure Turbine | 13 Open Air Switchyard | |
| 4 Pressurizer | 9 Condenser | 14 Water Treatment | |
| 5 Steam Generator | 10 Return/Feed Pumps | 15 Cooling Tower | |

9. Устройства реактора, установленного на АЭС Three Mile Island

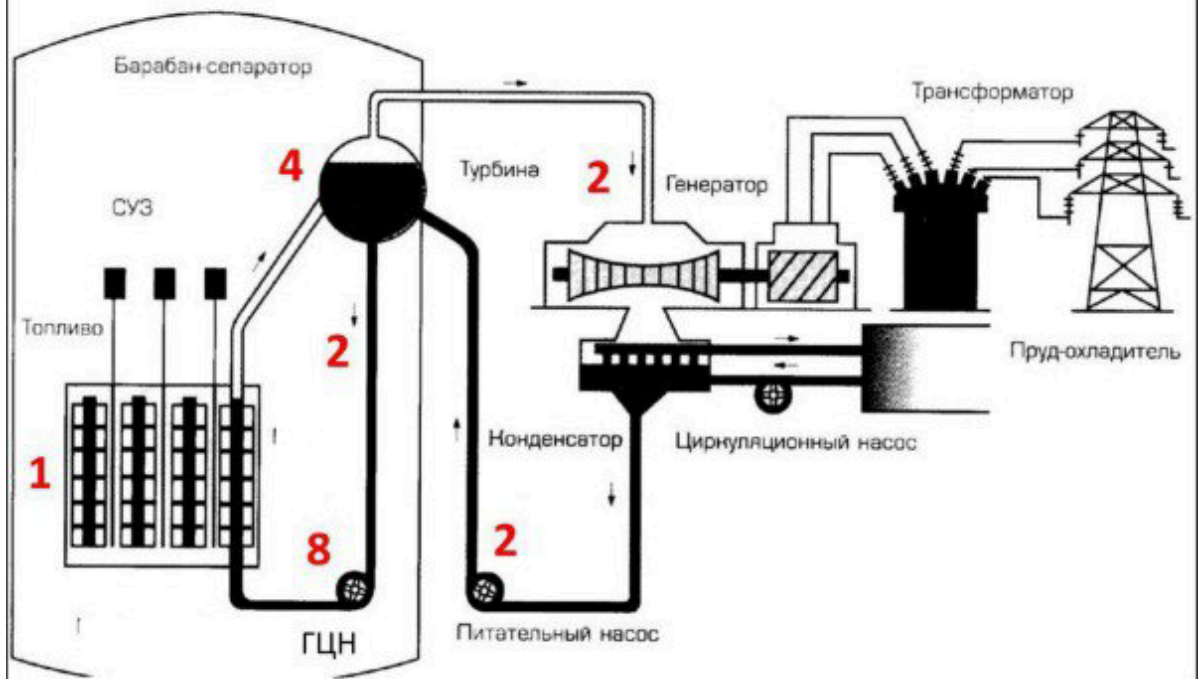


10. Президент США Картер в помещении БЩУ аварийного реактора

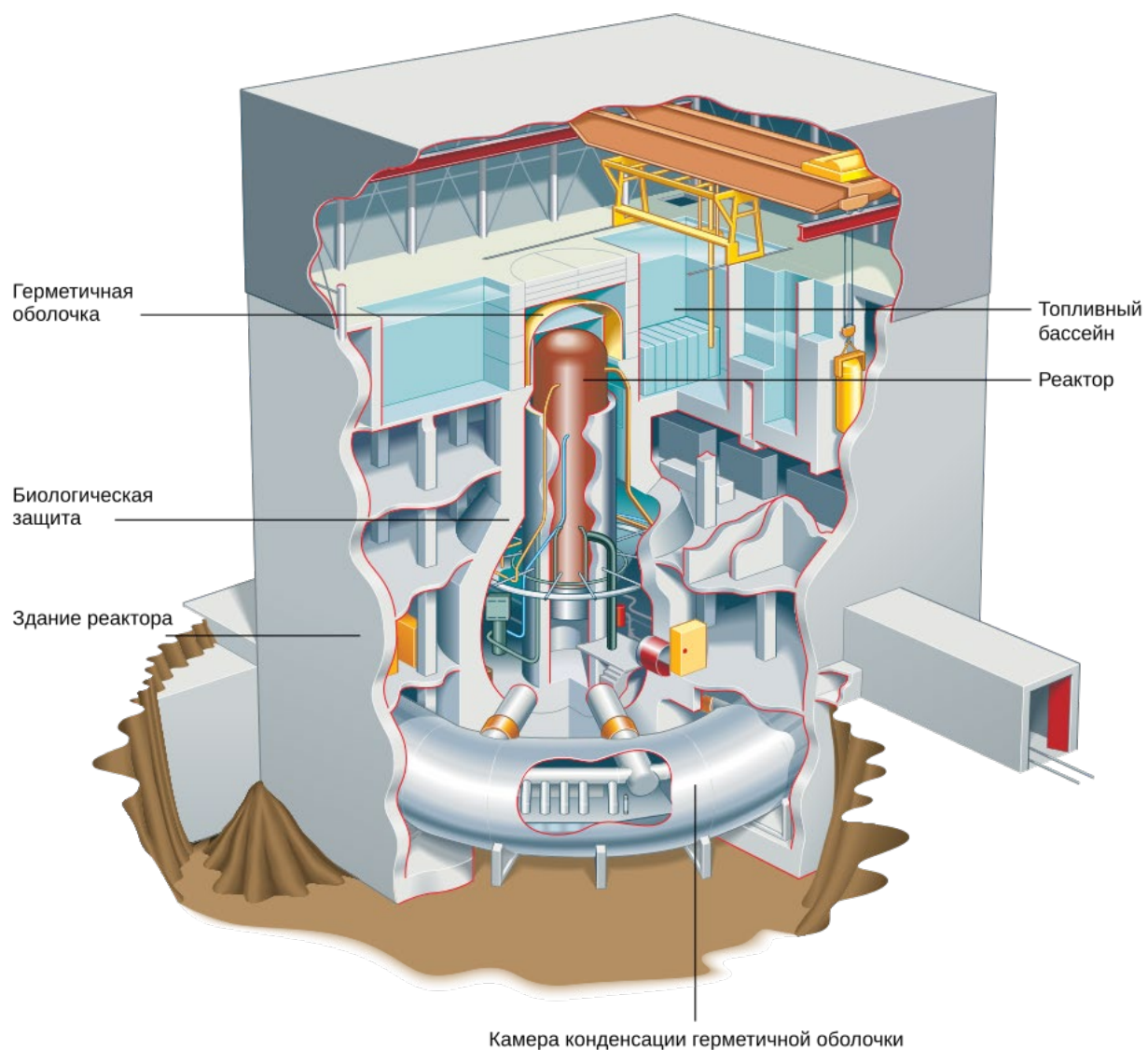


11. Устройство ректора типа РБМК

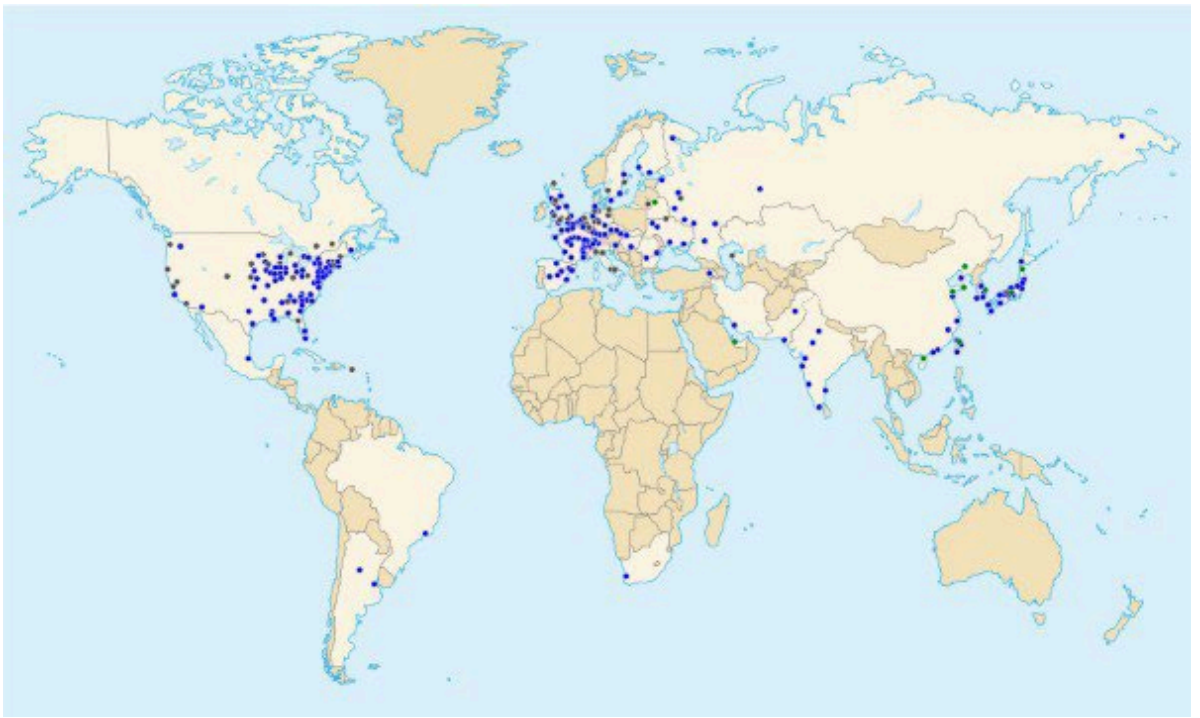
АЭС (реактор РБМК)



12. Устройство реактора типа РБМК.



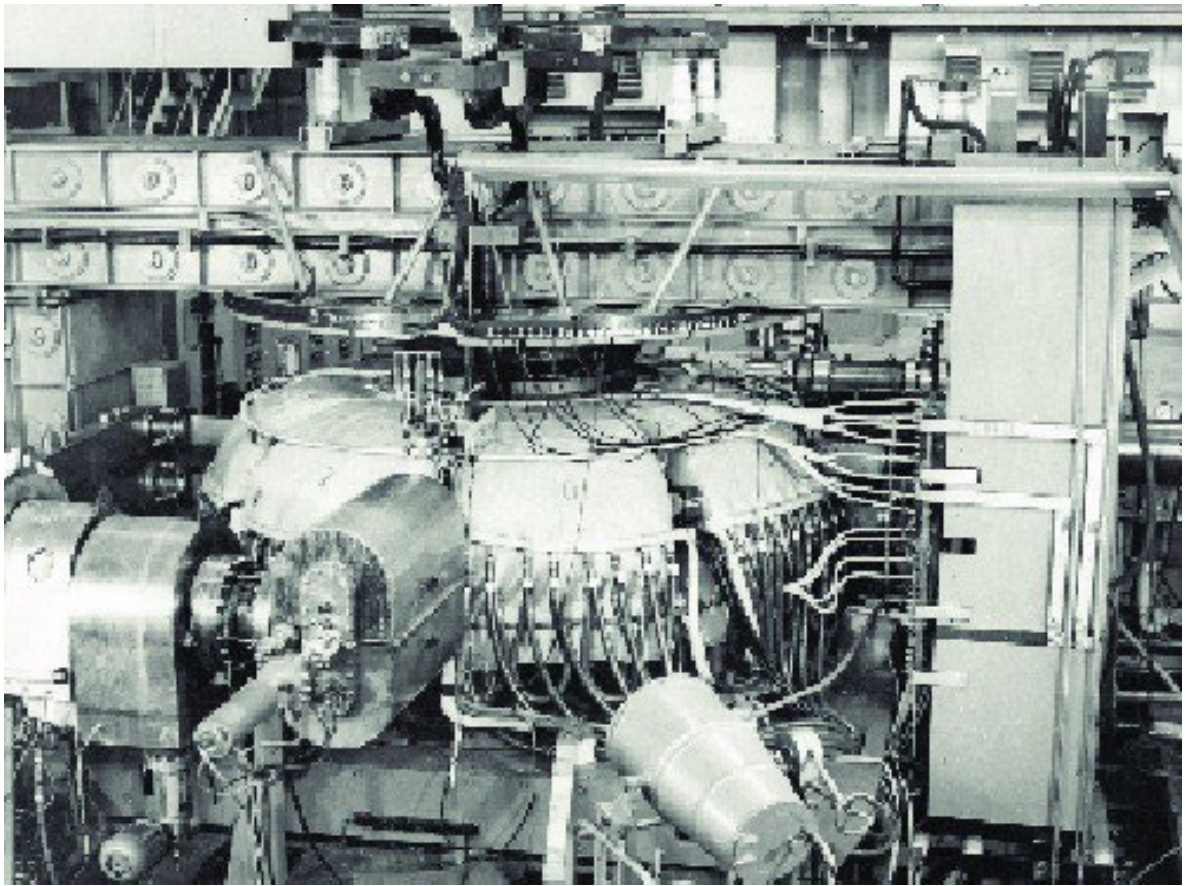
13. Реактор типа BWR



14. Карта расположения АЭС



15. ПАТЭС «Академик Ломоносов»



16. Токмак Т3



17. Токомак Т15-МД