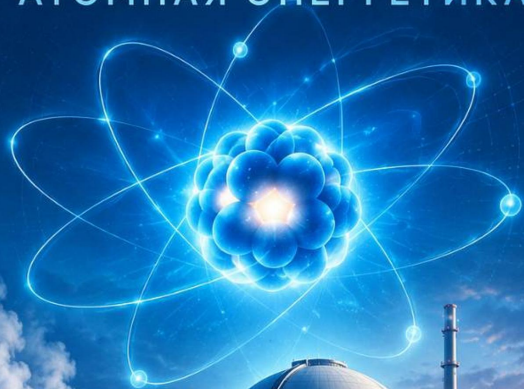


МИРНЫЙ АТОМ

КАК УСТРОЕНА
АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА



Викрам Сингх

Мирный атом. Как устроена атомная энергетика

<https://litres.ru/74024186>

SelfPub; 2026

Аннотация

«Мирный атом» — это понятное введение в атомную энергетику для широкого круга читателей. Книга объясняет, как работает атомная электростанция, что происходит внутри ядерного реактора, зачем нужны топливо, теплоноситель, замедлитель и системы безопасности.

В книге рассматриваются основные типы реакторов, история развития атомной энергетики, роль Росатома, ядерный топливный цикл, вопросы радиации, отходов и вывода станций из эксплуатации. Отдельное внимание уделено крупным авариям, международному контролю, перспективам новых реакторов, малых модульных АЭС и использованию ядерных технологий в космосе.

Это книга для тех, кто хочет разобраться в атомной энергетике без сложных формул, но с уважением к техническим деталям, истории отрасли и вопросам безопасности.

Содержание

Глава 1. Как работает атомная электростанция - от деления урана до электричества	6
Главное: АЭС — это тепловая электростанция	6
Что происходит внутри топлива	8
Реактивность: почему реактор разгоняется или затухает	10
Зачем нужен замедлитель	12
Топливо и ТВЭЛы	14
Стержни управления и аварийная защита	15
Остаточное тепло: почему реактор нельзя просто выключить	17
Как работает ВВЭР: два контура	19
Турбина и генератор	21
Почему нужны градирни	22
Чем кипящий реактор отличается от ВВЭР	23
Барьеры безопасности	25
Глубокоэшелонированная защита	27
Активные и пассивные системы безопасности	29
Почему АЭС работает почти постоянно	31
Что происходит с топливом после работы	33
Кратко: вся работа АЭС в одной цепочке	35
Главный вывод	37
Глава 2. История атомной энергетики - от	39

военного атома к гражданской энергии	
До электростанций: как открыли энергию ядра	39
Манхэттенский проект и первый реактор	41
СССР: атомный проект и переход к мирному атому	43
Обнинская АЭС: символический старт атомной энергетики	45
Атом для мира: мировая атомная мечта 1950–1960-х годов	47
Морской атом: подлодки и ледоколы	49
Коммерческий рывок: 1960–1980-е годы	51
Первое предупреждение: Три-Майл-Айленд	53
Чернобыль: перелом мировой атомной истории	54
Застой и осторожное выживание: 1990-е годы	55
Атомный ренессанс 2000-х	56
Фукусима: второй мировой шок	57
Китай, Россия, Корея: новые центры строительства	58
Малые модульные реакторы и новая волна ожиданий	59
Быстрые реакторы и замкнутый топливный цикл	60
Атом и климатическая повестка	61
Современная карта атомной энергетики	62
Главный вывод	63
Глава 3. Типы и поколения ядерных реакторов -	64

от первых опытов до реакторов будущего	
Зачем вообще делить реакторы на типы и поколения	64
Главные элементы реактора	66
Поколение I: первые атомные станции	68
Поколение II: массовая атомная энергетика XX века	69
PWR и ВВЭР: водо-водяные реакторы под давлением	71
BWR: кипящие водяные реакторы	73
РБМК: графитовый каналный реактор	74
CANDU и тяжеловодные реакторы	76
Газоохлаждаемые реакторы: Magnox, AGR и высокотемпературные проекты	77
Быстрые реакторы: путь к полному использованию урана	78
Реакторы поколения III и III+	80
Поколение IV: реакторы будущего	82
Малые модульные реакторы: размер, а не поколение	83
Отечественная линия развития	84
Конец ознакомительного фрагмента.	85

Мирный атом. Как устроена атомная энергетика

Глава 1. Как работает атомная электростанция - от деления урана до электричества

Главное: АЭС — это тепловая электростанция

Атомная электростанция часто предстает в нашем воображении чудом технологий, скрывающим в себе почти фантастические процессы. Однако по своему фундаментальному устройству она поразительно напоминает классическую тепловую электростанцию. Ее главная задача неизменна — получить тепло, превратить воду в пар и направить его мощный поток на турбину, которая, в свою очередь, заставляет вращаться электрический генератор.

Ключевая разница кроется лишь в источнике этого тепла.

— На угольной станции тепло высвобождается при сжигании угля.

— На газовой — в процессе горения природного газа.

— На атомной станции источником колоссальной энергии служит деление ядер урана.

Важно понимать, что АЭС не генерирует электричество «напрямую из радиации». В реакторе рождается лишь тепло, а все последующие этапы подчиняются законам классической энергетики:

ядерное деление → тепло → пар → турбина → генератор
→ электричество

Ядерный реактор — это отнюдь не «атомная бомба, поставленная на паузу». Это сложный и строго управляемый источник тепла, внутри которого цепная реакция протекает размеренно, а не высвобождается в одно мгновение разрушительной лавиной.

Что происходит внутри топлива

В качестве ядерного топлива традиционно используется уран, а главным «действующим лицом» выступает его делящийся изотоп — уран-235. Напомним, что изотопы — это вариации одного и того же химического элемента, отличающиеся лишь количеством нейтронов в ядре.

Сценарий реакции выглядит так: когда в ядро урана-235 попадает нейтрон, оно теряет стабильность и буквально раскалывается на два более легких осколка. Этот микроскопический катаклизм сопровождается выделением:

- огромного количества тепла;
- свободных нейтронов;
- радиоактивных продуктов деления.

Освободившиеся нейтроны, словно бильярдные шары, устремляются к соседним ядрам урана-235, провоцируя новые деления. Именно так зарождается цепная реакция.

В упрощенном виде это можно описать так:

нейтрон попадает в U-235 → ядро делится → выделяется тепло → рождаются новые нейтроны → они расщепляют новые ядра

Искусство управления реактором состоит в том, чтобы не позволить этой реакции перерасти в неконтролируемый шквал. Если каждое поколение нейтронов вызывает ровно такое же количество новых делений, что и предыдущее,

мощность реактора остается стабильной. Если делений становится больше — мощность послушно растет, если меньше — плавно падает.

Реактивность: почему реактор разгоняется или затухает

Для описания «настроения» реактора и динамики цепной реакции физики используют изящный термин — реактивность. Это фундаментальный показатель того, стремится ли установка нарастить мощность, снизить ее или продолжать работать в ровном ритме.

— Если реактивность нулевая, реактор работает в равновесии.

— Если реактивность положительная, мощность начинает расти.

— Если реактивность отрицательная, реакция затухает.

Укрощать реактивность можно целым арсеналом методов: погружением или извлечением стержней управления, изменением концентрации борной кислоты (поглотителя) в воде, а также варьированием температуры и плотности теплоносителя.

В безупречно спроектированном энергетическом реакторе критическую роль играют отрицательные обратные связи. Это встроенный механизм саморегуляции: если реактор начинает перегреваться, физические условия внутри активной зоны меняются так, что цепная реакция неизбежно замедляется, и система «успокаивается». Подобная физика процесса

делает установку внутренне устойчивой и безопасной.

Трагедия Чернобыля во многом была обусловлена тем, что у реакторов типа РБМК в специфических режимах возникла коварная положительная обратная связь: больше пара в каналах приводило к скачку реактивности, что вызывало рост мощности, а это, в свою очередь, порождало еще больше пара.

Зачем нужен замедлитель

Здесь кроется один из самых удивительных парадоксов ядерной физики: нейтроны, вылетающие из расколотого ядра, обладают колоссальной скоростью. Однако уран-235 куда охотнее захватывает не быстрые, а медленные (или так называемые тепловые) нейтроны.

Чтобы притормозить эти элементарные частицы до нужных скоростей, в конструкцию реактора вводят замедлитель.

В качестве такой «тормозной среды» могут выступать:

- обычная (легкая) вода;
- тяжелая вода;
- графит.

В отечественных реакторах ВВЭР обычная вода виртуозно исполняет сразу две партии: она и замедляет нейтроны, и эффективно отводит излишки тепла. Отсюда и пошло название — водо-водяной энергетический реактор.

В реакторах чернобыльского типа (РБМК) функцию замедлителя брал на себя графит, а вода выступала исключительно в роли теплоносителя. Именно этот симбиоз массивной графитовой кладки и кипящей воды подарил данному типу установок их уникальные достоинства и роковые уязвимости.

Стоит отметить, что существуют и так называемые реакторы на быстрых нейтронах. В них замедлитель наме-

ренно не используется: быстрые нейтроны сохраняют свою энергию, что позволяет эффективно вовлекать в реакцию уран-238 и плутоний. Это сложнейшие машины, открывающие путь к неисчерпаемой атомной энергетике будущего.

Топливо и ТВЭЛы

Ядерное топливо современного реактора отнюдь не выглядит как горсть металлических самородков. Как правило, это аккуратные керамические таблетки, спеченные из диоксида урана. Эти небольшие цилиндры методично упаковываются в длинные, герметичные металлические трубки.

Такая высокотехнологичная трубка носит название ТВЭЛ — тепловыделяющий элемент.

В свою очередь, десятки ТВЭЛов объединяются в прочные конструкции — топливные сборки (ТВС). А уже они формируют активную зону реактора.

Активная зона — это пульсирующее сердце ядерной установки. Именно здесь, в тесном соседстве топлива, замедлителя, теплоносителя и стержней управления, непрерывно вершится таинство цепной реакции.

Жизненный цикл топлива внутри реактора длится несколько лет. За это время часть изотопов урана-235 выгорает, внутри накапливаются радиоактивные «осколки» деления, а также синтезируется плутоний и другие элементы. По истечении срока отработавшие сборки бережно извлекают, уступая место свежему топливу.

Стержни управления и аварийная защита

Чтобы держать ядерного джинна в узде, реактор пронизан стержнями управления и защиты. Они изготавливаются из материалов, обладающих непревзойденной способностью жадно поглощать нейтроны — таких как бор, кадмий или гафний.

— Если стержни погружаются глубже в активную зону, они буквально высасывают из нее свободные нейтроны. Цепная реакция «голодает», и мощность реактора падает.

— Если же стержни аккуратно извлекают, количество доступных для деления нейтронов возрастает, и мощность стремится вверх.

На случай нештатных ситуаций предусмотрен механизм мгновенной остановки: по сигналу автоматики стержни под действием гравитации или мощных приводов стремительно падают в активную зону, надежно «глуша» реактор. В советской инженерной традиции этот механизм известен под аббревиатурой АЗ-5 (аварийная защита пятого рода). Важно понимать: в нормальной логике работы станции это спасительный стоп-кран, а вовсе не «кнопка самоуничтожения».

Однако здесь кроется важнейший нюанс: даже после полной остановки цепной реакции реактор продолжает излучать

тепло.

Остаточное тепло: почему реактор нельзя просто выключить

Если заглушить реактор, расщепление ядер урана прекращается практически мгновенно. Тем не менее, внутри керамических таблеток остаются накопленные радиоактивные продукты деления. Распадаясь, они продолжают выделять значительную энергию.

Этот физический феномен известен как остаточное тепловыделение.

В первые секунды и часы после остановки оно весьма велико, хотя со временем начинает экспоненциально падать. Тем не менее, реактор критически нуждается в непрерывном охлаждении. Если насосы остановятся и отвод тепла прекратится, тепловыделяющие элементы начнут перегреваться, их циркониевые оболочки разрушатся, что может привести к тяжелейшему сценарию — расплавлению активной зоны.

Именно этот неумолимый закон физики стал причиной катастрофы на японской АЭС «Фукусима-1». Реакторы штатно остановились при первых толчках землетрясения, однако пришедшее следом цунами уничтожило резервные дизель-генераторы. Цепная реакция уже давно угасла, но не отведенного остаточного тепла оказалось достаточно для того, чтобы расплавить ядерное топливо.

Вот почему атомную станцию невозможно «выключить как лампочку». Даже погрузившись в технологический сон, реактор требует непрерывной циркуляции воды, надежного электропитания и бдительности аварийных систем.

Как работает ВВЭР: два контура

Чтобы понять устройство современной АЭС, удобнее всего взглянуть на схему ВВЭР — флагманского российского реактора, концептуально схожего с западным типом PWR (реактор с водой под давлением).

Архитектура ВВЭР базируется на двух изолированных друг от друга водяных контурах.

Первый контур замкнут непосредственно на реактор. Вода в нем находится под колоссальным давлением (порядка 160 атмосфер), поэтому, даже раскаляясь до 300 градусов и выше, она не закипает. Ее задача — омывать активную зону и забирать у нее жар.

Второй контур полностью изолирован от ядерных процессов. В огромных теплообменниках — парогенераторах — раскаленная вода первого контура передает свою энергию воде второго контура. Именно здесь вода второго контура превращается в насыщенный пар, который с ревом устремляется к турбине.

Вся цепь выглядит так:

реактор → раскаленная вода первого контура → парогенератор → чистый пар второго контура → турбина → генератор

Главное изящество этой схемы — абсолютная сегрегация. Вода, непосредственно контактирующая с радиоактивным

топливом, никогда не покидает пределов реакторного зала и не достигает турбины. Радиация надежно заперта в первом контуре.

Турбина и генератор

Вырвавшись из парогенератора, пар второго контура наносит удар по лопаткам турбины. Турбина — это циклопическая вращающаяся машина, настоящий шедевр точной механики. Расширяясь, пар заставляет ее тяжелый ротор раскручиваться до огромных скоростей (обычно 1500 или 3000 оборотов в минуту).

Вал турбины жестко сцеплен с ротором генератора, который преобразует кинетическую энергию вращения в электрический ток.

Далее электричество поступает на трансформаторы, где его напряжение повышается до сотен тысяч вольт, и отправляется в единую энергосистему страны.

На этом этапе атомная станция ничем не отличается от классической ТЭЦ. Единственная разница заключается в происхождении пара: он рожден не в топке парового котла, а в ядерном пламени реактора.

Отдав свою энергию лопаткам турбины, отработавший пар поступает в конденсатор. Там он охлаждается, вновь становится жидкостью и с помощью мощных насосов отправляется обратно в парогенератор на новый круг. Второй контур замыкается.

Почему нужны градирни

Исполинские башни, из жерл которых непрерывно поднимаются густые белые облака, часто вызывают у обывателей безотчетный трепет и стойко ассоциируются с радиацией. В реальности же эти сооружения называются градирнями, и они являются не более чем гигантскими охладителями.

Облака над ними — это не радиоактивные выбросы, а абсолютно чистый водяной пар, образующийся при охлаждении технической воды.

Как мы помним, чтобы вернуть пар из турбины в жидкое состояние, его нужно охладить в конденсаторе. Конденсатор, в свою очередь, охлаждается огромными объемами воды, забираемой из реки, моря или искусственного пруда. Если естественного водоема недостаточно, на помощь приходят градирни: теплая вода разбрызгивается внутри башни и охлаждается восходящими потоками воздуха.

Градирня — это универсальный атрибут большой энергетики. Точно такие же башни можно увидеть на угольных заводах или газовых ТЭЦ. Радиоактивное «сердце» станции надежно скрыто в гермооболочке реакторного здания, а градирни лишь рассеивают излишки тепла в атмосферу.

Чем кипящий реактор отличается от ВВЭР

Существует и альтернативная инженерная концепция — так называемые кипящие реакторы (BWR, Boiling Water Reactor). В них вода закипает непосредственно в активной зоне, омывая топливные сборки.

Эта схема выглядит лаконичнее:

реактор → пар → турбина → конденсатор → реактор

В отличие от двухконтурных ВВЭР/PWR, в кипящих реакторах пар рождается прямо в «ядерной топке» и затем направляется напрямиком на лопатки турбины.

Оба подхода имеют свои сильные и слабые стороны. BWR технологически проще, так как избавляет станцию от громоздких парогенераторов. Однако платой за эту простоту становится то, что турбина и часть машинного зала работают с паром, имеющим слабую наведенную радиоактивность. ВВЭР сложнее в постройке, зато гарантирует кристальную чистоту турбинного оборудования.

Печально известные реакторы Фукусимы-1 принадлежали именно к типу BWR. Советский РБМК (Чернобыль) также был кипящим по принципу генерации пара, но конструктивно представлял собой совершенно иную машину — каналный реактор с графитовым замедлителем, а не кор-

пусной водо-водяной.

Барьеры безопасности

Фундаментальный закон атомной энергетики гласит: радиоактивные вещества ни при каких условиях не должны вырваться в биосферу. Для обеспечения этого правила инженеры выстраивают эшелонированную систему физических барьеров.

— Первый барьер — сама матрица ядерного топлива. Твердая керамика топливных таблеток надежно удерживает внутри себя большую часть продуктов деления.

— Второй барьер — циркониевая оболочка ТВЭЛа. Эта тонкая, но исключительно прочная металлическая трубка не позволяет газам и осколкам деления попасть в теплоноситель.

— Третий барьер — главный циркуляционный контур. Несокрушимый стальной корпус реактора, толстостенные трубопроводы и корпуса парогенераторов запирают радиоактивную воду внутри системы.

— Четвертый барьер — контайнмент, или гермооболочка. Это массивный купол из предварительно напряженного железобетона, накрывающий реакторный зал. Он способен выдержать внутренний взрыв парогазовой смеси, землетрясение и даже падение тяжелого самолета.

Современная доктрина ядерной безопасности исходит из презумпции недоверия: если один из барьеров по какой-то

причине сдастся, на пути угрозы непреступной стеной должен встать следующий.

Глубокоэшелонированная защита

Помимо физических стен, атомная отрасль опирается на философию глубокоэшелонированной защиты. Суть ее предельно ясна: безопасность колоссального объекта не должна зависеть от исправности одной-единственной детали или безупречности одного оператора.

Эта защита разворачивается на нескольких рубежах:

1. Предотвращение малейших отклонений от нормальной эксплуатации станции.
2. Своевременное обнаружение аномалий и автоматический возврат системы в стабильное русло.
3. Надежное глушение реактора при угрозе развития аварии.
4. Безусловное обеспечение охлаждения активной зоны после остановки.
5. Удержание радиоактивных выбросов внутри защитной оболочки, если расплавления топлива избежать не удалось.
6. Своевременная эвакуация и защита населения в самом худшем, гипотетическом сценарии, если радиация все же прорвется наружу.

Идеальная АЭС — это не та мифическая станция, на которой «никогда ничего не ломается». Техника есть техника. Идеальная АЭС — это та, где отказ любого механизма, обесточивание или ошибка человека просто физически не спо-

собны привести к катастрофе.

Активные и пассивные системы безопасности

Инженерные системы, стоящие на страже реактора, принято делить на два класса: активные и пассивные.

Активные системы напоминают мышцы станции. Они требуют внешнего импульса: электричества, работы насосов, автоматики, запуска резервных дизель-генераторов. Например, если давление падает, автоматика подает ток на аварийный насос, и тот начинает закачивать в реактор спасительную воду.

Пассивные системы действуют иначе: они подчиняются непреложным законам физики — гравитации, естественной конвекции жидкостей, давлению сжатого газа. Они не требуют нажатия кнопок, приказов электроники и внешнего питания. Вода сама польется в реактор под собственным весом из высоко расположенных гидроемкостей, как только давление в первом контуре упадет.

После уроков Фукусимы пассивные системы пережили настоящий ренессанс. Если станция ослепла и полностью обесточена, эти системы обязаны перехватить управление и гарантировать охлаждение реактора.

Современные реакторы поколения III+ виртуозно комбинируют оба подхода. Стопроцентно «пассивных» АЭС пока

не существует, но чем дольше станция способна самостоятельно, в режиме «глухой обороны», удерживать реактор в безопасном состоянии без вмешательства человека, тем совершеннее ее проект.

Почему АЭС работает почти постоянно

Если вы посмотрите на графики генерации, то заметите, что атомные станции работают монотонно, подобно пульсу марафонца. Это так называемый базовый режим, когда реактор круглосуточно и месяцами выдает в сеть свою номинальную мощность.

Этому есть несколько причин:

— Возведение АЭС требует колоссальных капиталовложений. Чтобы станция окупилась, она должна непрерывно производить продукт — электроэнергию.

— Само ядерное топливо стоит относительно недорого по сравнению с первоначальными затратами на строительство.

— Ядерный реактор — крайне инертная машина. Постоянно «газовать» и «тормозить», подстраиваясь под утренние и вечерние пики потребления, для него сложнее, чем для юркой газотурбинной установки (хотя современные АЭС это умеют).

— Технологически атом создавался как надежный, тяжеловесный фундамент энергосистемы.

Вот почему АЭС некорректно сравнивать с ветряками или солнечными панелями. Ее главная суперсила — способность генерировать гигантские объемы чистой, безуглерод-

ной энергии 24 часа в сутки, 7 дней в неделю, невзирая на погоду за окном.

Что происходит с топливом после работы

История ядерного топлива не заканчивается в тот момент, когда его извлекают из активной зоны. Отработавшие сборки представляют собой источники мощнейшего радиоактивного излучения и адского жара. На первом этапе их бережно перемещают в бассейн выдержки — глубокий резервуар с водой, расположенный прямо в реакторном зале. Вода служит идеальным щитом от радиации и одновременно охлаждает раскаленные тепловыделяющие элементы.

Спустя несколько лет, когда самые агрессивные изотопы распадутся, а тепловыделение упадет до приемлемых значений, сборки можно переместить в массивные бетонные контейнеры на сухое хранение или отправить на перерабатывающий завод.

Важно понимать: отработавшее ядерное топливо — это не бесполезный мусор. В нем остается колоссальный запас несгоревшего урана, ценный плутоний и множество редких изотопов. В мировой практике пока нет единого пути: одни страны (например, США) склоняются к прямому захоронению, другие (включая Россию и Францию) делают ставку на переработку и создание замкнутого ядерного топливного цикла.

Эта многогранная тема настолько обширна и значима, что мы посвятим ей отдельную главу.

Кратко: вся работа АЭС в одной цепочке

Если свести весь этот грандиозный инженерный оркестр к простой и элегантной партитуре, мы получим следующую последовательность:

1. В активной зоне расщепляются тяжелые ядра урана-235.
2. Этот микроскопический взрыв высвобождает тепло и порождает новые нейтроны.
3. Замедлитель мягко гасит скорость нейтронов, делая их пригодными для продолжения цепной реакции.
4. Стержни управления, словно дирижерская палочка, контролируют мощность этого процесса.
5. Вода (теплоноситель) безостановочно омывает топливо, унося раскаленный жар.
6. В реакторах ВВЭР горячая вода первого контура отдает свою энергию чистому второму контуру внутри парогенератора.
7. Во втором контуре вскипает вода и рождается мощный пар.
8. Пар обрушивается на лопатки турбины, заставляя ее ротор бешено вращаться.
9. Турбина крутит вал генератора.

10. Генератор преобразует кинетическую энергию в электрический ток.

11. Уставший пар охлаждается в конденсаторе, становится жидкостью и отправляется на новый цикл.

12. Реактор, даже будучи заглушенным, продолжает требовать охлаждения из-за распада радиоактивных осколков.

Главный вывод

Атомная электростанция — это не магический артефакт, дарующий электричество из пустоты. Это вершина теплотехнической эволюции, грандиозная машина, где вместо сжигания ископаемых углеводородов используется управляемое расщепление материи на субатомном уровне. Ее абсолютное преимущество — невысказанная плотность энергии. Горсть ядерных таблеток эквивалентна эшелонам угля. Благодаря этому АЭС способна годами питать целые мегаполисы без оглядки на логистику топлива и выбросы парниковых газов.

Ее главная слабость — своенравный характер источника тепла. Ядерный огонь нельзя просто «задуть». Реактор требует к себе почтительного, неусыпного внимания: его нужно непрерывно охлаждать, бережно обслуживать и заковывать в непробиваемую броню физических барьеров. Отработавшее топливо требует сложнейших технологий переработки и хранения.

Поэтому фундамент всей атомной энергетики держится на трех титанических китах:

- цепная реакция должна быть строго управляема;
- тепло должно гарантированно отводиться от активной зоны;
- радиация должна быть надежно заперта внутри барьеров безопасности.

Пока эти три постулата незыблемы, АЭС остается одним из самых мощных, чистых и надежных источников энергии на планете. Но малейшее пренебрежение любым из них открывает путь к катастрофе.

Глава 2. История атомной энергетики - от военного атома к гражданской энергии

До электростанций: как открыли энергию ядра

История атомной энергетики берет свое начало не в гулких машинных залах электростанций, а в тихих физических лабораториях. На рубеже девятнадцатого и двадцатого веков ученые с удивлением осознали, что атом — это вовсе не неделимый кирпичик мироздания. Открытия радиоактивности, электрона, атомного ядра и нейтрона полностью перевернули привычную картину материального мира.

Ключевой акт этой научной драмы разыгрался в 1938 году, когда немецкие химики Отто Хан и Фриц Штрассман зафиксировали невероятное: деление ядра урана. Вскоре физики Лиза Мейтнер и Отто Фриш объяснили истинный масштаб этого явления. Оказалось, что ядро урана, поглотив нейтрон, способно буквально расколоться надвое, высвобождая при этом колоссальную энергию и выстреливая новыми нейтронами.

Именно эти новые, свободные нейтроны стали главным подарком для будущей энергетики. Физики поняли: если одно разделенное ядро рождает частицы, способные расщепить соседние ядра, значит, возможна самоподдерживающаяся цепная реакция. Если эту лавину удастся укротить — человечество получит неисчерпаемый реактор. Если отпустить на свободу — получится оружие невиданной разрушительной силы.

Так с самого первого дня своего существования атомная физика оказалась на распутье между светом и тенью, между мирными городами и военной угрозой.

Манхэттенский проект и первый реактор

Первый в истории рукотворный ядерный реактор появился на свет в разгар Второй мировой войны в США, в рамках секретного Манхэттенского проекта. Зимой 1942 года в Чикаго, прямо под трибунами университетского стадиона, команда под руководством выдающегося физика Энрико Ферми запустила установку под названием Чикагская поленица. Это была не электростанция, а скорее громоздкая физическая модель: горы графитовых блоков, куски урана, стержни из поглощающего кадмия и ровное, контролируемое дыхание цепной реакции.

Однако цель Манхэттенского проекта была исключительно военной — создание атомной бомбы. Реакторы требовались не для того, чтобы зажигать лампочки, а для того, чтобы нарабатывать оружейный плутоний. Вскоре в Хэнфорде выросли огромные промышленные реакторы, которые безостановочно производили начинку для будущих бомб.

Важно понимать этот исторический парадокс: гражданская атомная энергетика выросла не из мечты о дешевом электричестве, а из колоссальной инфраструктуры, созданной дляковки оружия. После трагедий Хиросимы и Нагасаки атом стал глобальным символом абсолютного разруше-

ния. Но почти сразу в умах ученых зародилась спасительная идея: неужели эту невероятную силу нельзя заставить крутить турбины, двигать корабли и созидать?

СССР: атомный проект и переход к мирному атому

Советский атомный проект развивался в условиях жесточайшего прессинга холодной войны. После 1945 года перед страной стояла экзистенциальная задача — в кратчайшие сроки ликвидировать ядерную монополию США. У истоков этого грандиозного научно-промышленного подвига стояли такие исполины науки и инженерии, как Игорь Курчатов, Юлий Харитон, Николай Доллежалъ и Анатолий Александров.

К концу 1946 года в Москве был запущен первый евразийский исследовательский реактор Ф-1. Следом на Урале выросли секретные промышленные гиганты для наработки оружейного плутония, и уже в 1949 году Советский Союз успешно испытал свою первую бомбу. Баланс сил был восстановлен.

Именно тогда, на рубеже сороковых и пятидесятих годов, Курчатов и его соратники начали активно продвигать концепцию мирного атома. В отличие от скоротечного взрыва, энергетический реактор должен был стать шедевром стабильности — работать годами, надежно укрощая ядерное пламя и превращая его в банальный водяной пар. Советские инженеры приняли этот вызов, и именно СССР суждено бы-

ло первым пустить ядерное электричество в общую сеть.

Обнинская АЭС: символический старт атомной энергетики

Летом 1954 года неприметный городок Обнинск навсегда вошел в мировую историю. Там заработала первая на планете атомная электростанция. Ее мощность по нынешним меркам была смехотворной — всего 5 мегаватт электричества, чего хватило бы разве что на освещение небольшого поселка. Но историческое значение этого события переоценить невозможно. Обнинск доказал: ядерный реактор способен быть не только фабрикой смерти или лабораторной игрушкой, но и надежной электростанцией.

Сердцем Обнинской АЭС был уран-графитовый канальный реактор. Технически это была скорее опытная установка, призванная обкатать технологии для будущих гигантов. Но символически она стала мостом из эпохи страха в эпоху созидания.

Советская пресса с гордостью рапортовала о триумфе социалистической науки, но за парадными фасадами скрывался титанический труд инженеров. Им пришлось с нуля решать проблемы, о которых раньше никто не задумывался: как надежно отводить тепло, как защитить персонал от радиации, как увязать капризную ядерную физику с тяжелыми турбинами. Обнинск открыл дверь в эру промышленного

атома.

Атом для мира: мировая атомная мечта 1950–1960-х годов

В 1953 году с трибуны ООН президент США Дуайт Эйзенхауэр произнес историческую речь Атом для мира. Это был блестящий политический и технологический манифест. Миру предложили новую парадигму: расщепленное ядро должно ассоциироваться не с грибовидными облаками, а с прогрессом, медициной, наукой и светом.

Наступили пятидесятые и шестидесятые годы — золотая эпоха атомного оптимизма. Человечеству казалось, что найден универсальный ключ к изобилию. Инженеры на полном серьезе проектировали атомные самолеты, ядерные локомотивы, гигантские опреснительные комплексы и двигатели для межпланетных перелетов. И пусть многие из этих идей разбились о суровую реальность физики и экономики, атмосфера того времени была пропитана искренней верой в ядерное чудо.

Параллельно начался старт коммерческой энергетики. В США запустили первую крупную станцию Шиппингпорт. Британцы сделали ставку на свои газоохлаждаемые реакторы. Канада, Франция, СССР и ФРГ разрабатывали собственные национальные проекты. Это было время смелых проб и ошибок: единого стандарта не существовало, и страны со-

ревновались, выбирая в качестве замедлителей и теплоносителей воду, графит, тяжелую воду или газ.

Морской атом: подлодки и ледоколы

В то время как на суше росли бетонные купола станций, в океанах разворачивалась своя атомная революция. Для военно-морского флота ядерный реактор стал настоящим спасением. Классическая дизельная подлодка была заложницей кислорода — ей приходилось регулярно всплывать для зарядки батарей, демаскируя себя. Атомная же субмарина могла скрываться в глубинах месяцами, ограниченная лишь запасами еды для экипажа.

В 1954 году американцы спустили на воду первую в мире атомную подлодку Наutilus. Советский Союз не заставил себя долго ждать и ответил созданием собственного ядерного флота. Корабельные реакторы выделились в отдельную, элитную ветвь инженерии: они должны были быть невероятно компактными, сверхнадежными и способными выдерживать штормы и глубоководное давление.

Уникальным достижением СССР стало создание гражданского атомного флота для покорения Арктики. В 1959 году льды взломал Ленин — первый в мире атомный ледокол. Ядерное сердце оказалось идеальным для сурового севера: колоссальная мощность позволяла крошить многометровые льды, а отсутствие нужды в дозаправке мазутом делало судно

абсолютно автономным. Наследники тех первых ледокольных реакторов сегодня ложатся в основу перспективных плавающих и наземных мини-АЭС.

Коммерческий рывок: 1960–1980-е годы

Настоящий промышленный бум разразился в шестидесятые и семидесятые. Мировая экономика росла, фабрикам требовалось море энергии, а внезапные нефтяные кризисы семидесятых жестко напомнили развитым странам о том, как опасно зависеть от импортного топлива.

В США началось массовое возведение водо-водяных и кипящих реакторов. Франция, осознав свою уязвимость перед нефтяными эмбарго, приняла беспрецедентную национальную программу и за считанные десятилетия перевела почти всю свою энергетику на атом. Французский опыт до сих пор считается эталоном того, как политическая воля и стандартизация проектов могут совершить энергетическое чудо.

Канада успешно развивала свой уникальный тяжеловодный реактор, способный работать на необогащенном природном уране.

Советский Союз в этот период сделал ставку на двух технологических гигантов. Первыми были ВВЭР — водо-водяные реакторы, концептуально схожие с западными образцами. Именно они со временем станут главным экспортным хитом страны. Вторыми были РБМК — исполинские гра-

фитовые каналные реакторы. Они не требовали создания огромных и сложных стальных корпусов, позволяли менять топливо прямо на ходу и выдавали огромную мощность. Но именно в их конструкции, как выяснится позже, таились смертельно опасные изъяны.

Первое предупреждение: Три-Майл-Айленд

Весной 1979 года иллюзия абсолютной безопасности дала глубокую трещину. В США на станции Три-Майл-Айленд произошла тяжелая авария. Реактор не взорвался, бетонный купол удержал радиацию внутри, и никто не погиб, но значительная часть активной зоны расплавилась, превратившись в раскаленную массу.

Это был ледяной душ для всей отрасли. Расследование показало, что главными виновниками были не законы физики, а человеческий фактор, негодные инструкции и запутанный интерфейс пультов управления. Операторы просто не понимали, что происходит в слепой зоне реактора, а сотни мигающих лампочек только сеяли панику.

Три-Майл-Айленд стал концом эпохи американского ядерного романтизма. Формально строительство АЭС никто не запрещал, но требования регуляторов стали настолько жесткими, а протесты общественности настолько громкими, что новые проекты в США были фактически заморожены на десятилетия.

Чернобыль: перелом мировой атомной истории

26 апреля 1986 года произошла катастрофа, разделившая историю атомной энергетики на до и после. В ходе неудачного ночного эксперимента на четвертом энергоблоке Чернобыльской АЭС реактор РБМК-1000 вышел из-под контроля. Мощность рванула вверх, пар разорвал трубы, и последовавшие за этим взрывы полностью уничтожили активную зону, выбросив в небо над Европой тонны радиоактивного пепла.

Чернобыль нанес сокрушительный удар по репутации атома во всем мире. В СССР трагедия обнажила не только инженерные просчеты, но и пороки самой системы: избыточную секретность, ведомственную закрытость и страх перед начальством. Для планеты это стало суровым напоминанием о том, что радиация не признает государственных границ.

Урок был выучен невероятно высокой ценой. Отрасль осознала, что реактор должен быть безопасен на уровне фундаментальной физики, а не только на бумаге инструкций. Появился термин культура безопасности. Оставшиеся РБМК были глубоко модернизированы, но их строительство навсегда прекратили. Мировая атомная энергетика стала гораздо более открытой и прозрачной, понимая, что скрывать ошибки в этой сфере сродни самоубийству.

Застой и осторожное выживание: 1990-е годы

На фоне чернобыльского шока и окончания холодной войны атомная отрасль погрузилась в глубокие сумерки.

В Европе и Америке прокатилась волна мощных анти-ядерных протестов. Германия взяла курс на постепенный отказ от мирного атома, Италия закрыла свои станции после всенародного референдума. Во многих развитых странах инженеры-ядерщики годами не видели новых строек.

На постсоветском пространстве ситуация была парадоксальной. Экономика лежала в руинах, стройки новых блоков замерли, но работающие АЭС оставались спасательным кругом, не давая энергосистеме рухнуть. Несмотря на жесточайший кризис, Россия сумела сберечь главное — людей и школы. Сохранились институты, заводы, опыт эксплуатации сложнейших реакторов и ледокольный флот.

Именно этот запас прочности сыграет решающую роль в будущем. Пока Запад на долгие годы ставил свои атомные амбиции на паузу, рискуя потерять компетенции, Россия и набирающие силу страны Азии продолжали проектировать и учить новых специалистов.

Атомный ренессанс 2000-х

В начале нового тысячелетия по миру пронесся слух о грядущем атомном ренессансе. Для этого были веские причины. Планета требовала все больше энергии, а цены на нефть и газ лихорадило. Но главное — на политическую сцену вышла проблема глобального потепления. Внезапно мир вспомнил, что атомные станции не коптят небо углекислым газом.

Инженеры предложили рынку реакторы нового поколения, обещавшие беспрецедентный уровень безопасности за счет систем, способных работать даже без вмешательства человека. Франция, США и Финляндия с энтузиазмом взялись за закладку новых сверхмощных блоков. Россия вывела на рынок свой флагманский проект ВВЭР-1200, а Китай запустил самую масштабную в истории программу строительства.

Однако на Западе ренессанс быстро увяз в проблемах. Оказалось, что за годы простоя строители разучились возводить такие сложные объекты. Сроки сдачи срывались на годы, а сметы раздувались в несколько раз. Новый атом оказался безупречным с точки зрения технологий, но неподъемно тяжелым экономически.

Фукусима: второй мировой шок

11 марта 2011 года природа нанесла отрасли удар, которого никто не ждал. У берегов Японии произошло колоссальное землетрясение. Реакторы АЭС Фукусима-1 сработали безупречно и штатно заглушили цепную реакцию. Но пришедшее следом гигантское цунами смыло резервные дизель-генераторы. Станция ослепла и обесточилась. Насосы встали, и неотведенное остаточное тепло расплавало топливо, что привело к взрывам водорода и выбросу радиации.

Фукусима доказала страшную истину: ядерный реактор смертельно опасен даже в выключенном состоянии, если лишить его охлаждения. В отличие от Чернобыля, это была катастрофа не из-за разгона мощности, а из-за беспомощности перед стихией.

Последствия снова прокатились по всему миру. Япония остановила свои станции, Германия окончательно добила свою ядерную программу. Инженеры бросились проводить стресс-тесты, проверяя АЭС на устойчивость к землетрясениям, наводнениям и полному блэкауту. На станциях появились мобильные насосы и дизели, способные в любой момент прийти на помощь обесточенному блоку.

Китай, Россия, Корея: новые центры строительства

Сегодня геополитическая карта атомной энергетики кардинально изменилась: ее гравитационный центр сместился на восток.

Безоговорочным лидером по темпам строительства стал Китай. Поднебесная возводит станции десятками, комбинируя российские, французские и американские технологии с собственными разработками, методично превращая атом в хребет своей промышленности.

Россия, в лице Росатома, заняла кресло главного мирового экспортера. Российские энергоблоки растут в Турции, Египте, Бангладеш, Индии и Китае. Успех этой модели кроется в том, что заказчику предлагают не просто чертежи и железо, а решение под ключ: от льготного кредита и поставок топлива до обучения студентов и помощи в эксплуатации.

Южная Корея также ворвалась в высшую лигу, блестяще реализовав мегапроект в Объединенных Арабских Эмиратах, доказав, что строить станции можно в срок и в рамках бюджета. В то же время Европа и США отчаянно пытаются вернуть утраченные навыки, утопая в бюрократии и финансовых перерасходах.

Малые модульные реакторы и новая волна ожиданий

Пытаясь обойти главную беду больших АЭС — их колоссальную стоимость и сроки окупаемости, — инженеры XXI века возродили идею малых модульных реакторов. Задумка изящна: вместо того чтобы десять лет строить бетонного левиафана на месте, можно собирать компактные реакторы на заводе, как автомобили, и привозить их на площадку готовыми к работе.

Малые станции обещают стать идеальным решением для изолированных городов, добывающих комбинатов в Арктике, дата-центров и энергоемких производств. Россия уже эксплуатирует плавучую станцию на базе проверенных ледокольных реакторов. Свои элегантные проекты разрабатывают инженеры в США, Британии, Китае и Канаде.

Однако пока малый атом находится на этапе болезненного столкновения с рыночной реальностью. Физику обмануть сложно: киловатт энергии от маленького реактора пока обходится заметно дороже, чем от большого. Будущее покажет, смогут ли фабричные конвейеры сделать эти установки по-настоящему массовыми.

Быстрые реакторы и замкнутый топливный цикл

Скрытая, но невероятно важная магистраль ядерной истории — это реакторы на быстрых нейтронах. Физики мечтали о них с самых первых дней. Дело в том, что обычные станции сжигают лишь ничтожную долю урана, оставляя горы отработавшего топлива. Быстрые же реакторы способны вовлечь в работу весь уран, параллельно нарабатывая новое топливо для самих себя.

Это открывает путь к святому Граалю атомной энергетики — замкнутому топливному циклу, когда отходы превращаются в ценное сырье, а запасов энергии человечеству хватит на тысячелетия.

Россия является безусловным мировым лидером в этой сложнейшей технологии, успешно эксплуатируя промышленные быстрые реакторы на Урале. Свои масштабные программы развивают Китай и Индия. И хотя сегодня эти высокотехнологичные машины сложны в управлении и дороги в постройке, именно они служат надежным мостом в неисчерпаемое энергетическое будущее.

Атом и климатическая повестка

Если в конце прошлого века слово радиация вызывало у политиков лишь головную боль, то сегодня атомная энергетика стала мощнейшим козырем в борьбе за спасение климата.

Современный мир отчаянно ищет способы отказаться от сжигания угля и газа. Солнечные панели и ветряки стремительно дешевеют, но они капризны и полностью зависят от погоды. В этих условиях атомный реактор оказывается практически идеальным генератором базовой нагрузки: он выдаст стабильный океан энергии круглые сутки, не выбрасывая при этом ни грамма парниковых газов.

Тем не менее, климатический бонус не перечеркивает застарелых болезней отрасли. Атомные станции по-прежнему пугают людей, они требуют космических бюджетов на старте и оставляют после себя радиоактивное наследие, требующее философского подхода к хранению на века вперед. Современный атом — это необходимый, но очень тяжелый компромисс.

Современная карта атомной энергетики

Оглядываясь на мир сегодня, мы видим сложнейшую энергетическую мозаику.

Франция остается главным бастионом атома в Европе. США обладают крупнейшим парком стареющих реакторов, робко пытаясь начать новые стройки. Китай совершает беспрецедентный ядерный рывок. Россия удерживает статус главного технологического донора для развивающихся стран. Арабские монархии, Турция и Бангладеш впервые вступают в ядерный клуб, в то время как Германия навсегда закрывает двери своих станций.

Это больше не черно-белый мир шестидесятых, где ядерный реактор был витриной могущества двух-трех сверхдержав. Сегодня это прагматичный рынок, где каждое государство ищет свой собственный баланс между экологией, энергетической независимостью, страхами общества и стоимостью киловатт-часа.

Главный вывод

История атомной энергетики — это захватывающий, полный драматизма путь от засекреченных оружейных лабораторий к фундаментальной гражданской инфраструктуре. Это путь от наивного оптимизма пятидесятых к суровым урокам Чернобыля и Фукусимы, а затем — к современному, взвешенному прагматизму.

Когда-то атом казался магическим артефактом, способным в одиночку решить все проблемы человечества. Отрезвление было жестким. Оказалось, что расщепленное ядро не прощает халатности, слепой веры в технику и управленческой гордыни.

Сегодня атомная энергетика повзрослела. Она превратилась в тяжелую, невероятно строгую и требовательную индустрию. Она не обещает чудес, но предлагает нечто большее — реальный шанс обеспечить растущее человечество надежной и чистой энергией в эпоху климатических потрясений.

Главный урок минувших десятилетий прост: успех мирного атома зависит не только от нейтронной физики. Его будущее пишется инженерами, экономистами и политиками, и зависит от того, насколько хорошо человечество научилось усваивать свои самые страшные исторические ошибки.

Глава 3. Типы и поколения ядерных реакторов - от первых опытов до реакторов будущего

Зачем вообще делить реакторы на типы и поколения

В массовом сознании словосочетание атомный реактор часто рисует универсальную картину: уран, вода, гудящая турбина и провода, уходящие за горизонт. Кажется, что внутри все устроено примерно одинаково. На деле же мир ядерных установок так же разнообразен, как мир автомобильных двигателей: от надежных бензиновых атмосферников до футуристичных водородных ячеек.

Один реактор может яростно кипятить воду прямо в своем раскаленном сердце. Другой, словно скороварка, держит воду под колоссальным давлением, не давая ей закипеть. Третий вместо обычной воды предпочитает экзотическую тяжелую. Четвертый доверяет замедление нейтронов массивному графиту. Пятый вообще отказывается замедлять частицы, охлаждаясь расплавленным металлом, а шестой и вовсе использует топливо в виде булькающей радиоактивной

соли.

Чтобы не запутаться в этом инженерном зоопарке, реакторы принято оценивать в двух координатах.

Первое измерение — это тип реактора. По сути, это его анатомия. Водо-водяной, кипящий, графитовый, газоохлаждаемый. Это ответ на вопрос: из чего он сделан и как именно превращает тепло в электричество?

Второе измерение — поколение. Это уже историческая и технологическая ступень развития. Ранние опытные машины, массовые гиганты двадцатого века, современные сверхнадежные установки и, наконец, смелые концепты будущего. Это ответ на вопрос: какие уроки прошлого учли инженеры при его создании?

Важно не путать эти вещи. Например, советский ВВЭР-1000 и современный ВВЭР-1200 относятся к одной большой семье реакторов с водой под давлением. У них одинаковая физика. Но тысячник — это дитя прошлого века, а тысяча двухсотый — современная высокотехнологичная крепость, напичканная новейшими системами безопасности. Они одного типа, но разных поколений.

Главные элементы реактора

Прежде чем погружаться в детали, давайте разберем любой реактор на базовые элементы. Их всего четыре. Именно из их комбинаций, как из деталей конструктора, инженеры собирают все существующие типы станций.

Топливо. Это вещество, в котором происходит то самое заветное деление ядер. Чаще всего это уран, иногда с добавлением плутония. Топливо не насыпают в реактор лопатой — его бережно упаковывают в герметичные металлические трубки, называемые тепловыделяющими элементами, или ТВЭЛами.

Замедлитель. Невидимый тормоз для быстрых нейтронов. Парадокс урана в том, что он лучше делится, когда бьющие в него нейтроны летят медленно. Чтобы их притормозить, используют обычную воду, тяжелую воду или графит.

Теплоноситель. Это рабочая лошадка станции, вещество, которое безостановочно циркулирует через раскаленную активную зону и уносит оттуда тепло. Теплоносителем может быть вода, газ, жидкий натрий или даже расплавленный свинец.

Система управления и защиты. Это нервная система станции: поглощающие стержни, датчики, аварийные насосы и толстостенная бетонная оболочка. Это всё то, что не дает реактору превратиться в бомбу и защищает внешний мир от

радиации.

Именно изящный выбор комбинации топлива, замедлителя и теплоносителя определяет, какой тип реактора получится на выходе.

Поколение I: первые атомные станции

Первое поколение — это романтическая и немного наивная заря атомной эры пятидесятых и шестидесятых годов. Эпоха, когда ядерная физика только-только снимала военную форму, робко примеряя гражданский костюм.

Это были первые опытно-промышленные установки в СССР, США, Великобритании и Франции. Символическим стартом этой эпохи стала Обнинская АЭС, запущенная в 1954 году. Ее крошечной мощности хватило бы лишь на пару современных торговых центров, но исторический масштаб этого события был грандиозным. Обнинск доказал: прирученный атом может не только разрушать города, но и зажигать в них свет.

Вслед за ней последовали американская станция Шиппингпорт и британские газоохлаждаемые графитовые реакторы Магнокс, где тепло от урана уносил углекислый газ.

Реакторы первого поколения стали бесценной школой. Но с высоты сегодняшнего дня это были скорее лабораторные прототипы: дорогие, технологически сырые, уникальные в каждой детали и обладающие весьма скромными системами безопасности.

Поколение II: массовая атомная энергетика XX века

Если первое поколение было пробой пера, то второе стало настоящей рабочей лошадкой двадцатого века. Именно реакторы второго поколения, массово строившиеся с семидесятых по девяностые годы, сегодня производят львиную долю мирового ядерного электричества.

К этому золотому фонду относятся западные водо-водяные и кипящие реакторы, канадские тяжеловодные установки, а также советские ВВЭР и гигантские графитовые РБМК.

Главным прорывом второго поколения стал переход к конвейеру. Мощности блоков выросли в десятки раз, достигнув тысяч мегаватт. Станции начали строить серийно, появились строгие национальные регламенты, школы подготовки операторов и независимые надзорные органы. Атом стал индустрией.

Однако в философии безопасности этих гигантов крылась уязвимость: они слишком сильно зависели от активных систем. Чтобы спасти реактор в случае беды, обязательно должны были включиться насосы, запуститься дизель-генераторы и безошибочно сработать люди. Позже, когда по миру ударят аварии на Три-Майл-Айленд, в Чернобыле и на Фукусиме, отрасль жестоко поплатится за эту самоуверен-

НОСТЬ.

PWR и ВВЭР: водо-водяные реакторы под давлением

Познакомьтесь с абсолютным бестселлером мировой атомной энергетики. На Западе этот тип называют PWR, а в нашей стране он известен под аббревиатурой ВВЭР — водо-водяной энергетический реактор.

Двойное водо-водяной в названии не случайность. Оно означает, что самая обычная, хорошо очищенная вода здесь работает за двоих: она и замедляет юркие нейтроны, и отводит испепеляющий жар от топлива.

Конструкция напоминает матрешку из двух контуров. В первом контуре, намертво запертом внутри гермооболочки, вода циркулирует под колоссальным давлением. Она раскаляется до трехсот градусов, но физически не может закипеть. Эта радиоактивная вода бежит в огромный теплообменник — парогенератор, где отдает свою энергию воде второго контура. И уже чистая вода второго контура превращается в пар, который с ревом крутит турбину.

Главный козырь этой схемы — изоляция. Радиоактивная грязь навсегда заперта в первом контуре и никогда не добивается до турбинного зала.

Советская школа методично развивала эту линию: от ранних установок до надежного середнячка ВВЭР-440, ко-

торый массово застраивал Восточную Европу, и могучего ВВЭР-1000, ставшего основой поздней советской энергетики. Сегодня этот путь продолжает ВВЭР-1200 — флагман поколения III+, укрытый двойным бетонным куполом и оснащенный ловушкой расплава.

BWR: кипящие водяные реакторы

Инженерная мысль всегда ищет пути к упрощению. И однажды конструкторы задались вопросом: зачем городить сложную систему с двумя контурами и громоздкими парогенераторами, если воду можно кипятить прямо внутри реактора? Так на свет появились кипящие реакторы — BWR.

Их схема изящна в своей прямолинейности. Вода омывает ядерное топливо, тут же вскипает, превращается в пар и летит напрямик на турбину, после чего охлаждается и возвращается обратно в активную зону.

Меньше труб, меньше металла, проще строительство. Но за простоту приходится платить. Пар, покидающий реактор, несет в себе наведенную радиоактивность. А значит, огромная турбина и весь машинный зал становятся зоной радиационного контроля.

Именно такие кипящие реакторы стояли на японской АЭС Фукусима-1. Трагедия 2011 года вскрыла их уязвимость: когда цунами смыло дизель-генераторы, реакторы, хоть и были заглушены, остались без отвода тепла. Вода выкипела, топливо обнажилось и расплавилось. Это заставило мир пересмотреть отношение не только к кипящим реакторам, но и к системам безопасности вообще.

РБМК: графитовый канальный реактор

Реактор большой мощности канальный — это уникальный, сугубо отечественный инженерный путь, подаривший стране колоссальные объемы энергии и величайшую технологическую катастрофу.

В отличие от ВВЭР, у РБМК нет единого стального корпуса-бочонка, способного выдержать чудовищное давление. Вместо него — циклопическая кладка из графитовых блоков, пронизанная сотнями вертикальных труб-каналов. В каналах находится топливо, и прямо там же, омывая его, кипит вода. Пар отправляется на турбину по одноконтурной схеме.

Для плановой советской экономики РБМК казался чудом. Его можно было строить огромным, не дожидаясь, пока заводы отольют гигантские стальные корпуса. Более того, выгоревшее топливо можно было менять поштучно, прямо на ходу, не останавливая станцию.

Но в этой архитектуре скрывался смертельный изъян — положительная обратная связь. В определенных режимах работы, если в каналах образовывалось слишком много пара, реактор начинал не затухать, а стремительно наращивать мощность. Добавьте к этому неудачную конструкцию аварийных стержней, которые при введении в активную зону в

первые секунды лишь подливали масла в огонь, — и вы получите рецепт чернобыльской катастрофы.

После 1986 года оставшиеся РБМК были радикально переделаны. Инженеры изменили физику активной зоны, переписали регламенты и ужесточили контроль. Модернизированные блоки работают надежно до сих пор, но новые станции такого типа больше никогда не строились.

CANDU и тяжеловодные реакторы

Канадские инженеры пошли совершенно особым путем и создали реакторы типа CANDU. Их главная гордость скрыта в названии, где фигурирует дейтерий — тяжелый изотоп водорода.

Суть в том, что тяжелая вода выступает здесь в роли идеального замедлителя. Она настолько неохотно поглощает свободные нейтроны, что позволяет использовать в качестве топлива самый обычный, природный уран, не тратя колоссальные деньги на его обогащение.

Конструктивно это тоже канальный реактор: топливо лежит в трубах, проходящих сквозь огромный бак с тяжелой водой, и перегружать его можно без остановки станции.

Преимущества очевидны: независимость от заводов по обогащению урана и потрясающая топливная гибкость. Недостатки тоже весомы: сама тяжелая вода стоит астрономических денег, а конструкция станции сложна в обслуживании. Тем не менее, канадский подход нашел своих поклонников в Индии, Южной Корее, Румынии и Китае.

Газоохлаждаемые реакторы: Magnox, AGR и высокотемпературные проекты

А что, если охлаждать раскаленный уран не водой, а газом? Эту элегантную идею активно развивали британцы, создав поколения реакторов Магнокс и AGR. В них графит замедлял нейтроны, а мощные потоки углекислого газа выдували жар из активной зоны.

Газ хорош тем, что позволяет разогреть станцию до куда больших температур, чем вода. А в теплоэнергетике действует железное правило: чем выше температура, тем выше КПД турбины.

Современные наследники этой идеи — высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы. В них циркулирует инертный гелий, а топливо спрятано внутри крошечных многослойных шариков, способных выдерживать адские температуры без расплавления. Пока такие установки — удел экспериментаторов, например в Китае. Но в будущем именно они могут стать идеальными источниками промышленного жара для химических заводов и производства чистого водорода.

Быстрые реакторы: путь к полному использованию урана

Практически все реакторы, о которых мы говорили до сих пор, работают на медленных, заботливо приторможенных нейтронах. Но существует и высшая лига ядерной физики — реакторы на быстрых нейтронах.

Их главная философия — бережливость. Обычные АЭС сжигают в основном редкий изотоп уран-235, которого в природе меньше одного процента. Огромные горы урана-238 отправляются в отходы. Быстрый реактор устроен так, что мощный поток незамедленных нейтронов бьет по урану-238, превращая этот бесполезный балласт в ценнейший плутоний-239. Который тут же сгорает, давая энергию.

Если такая машина нарабатывает больше нового топлива, чем сжигает старого, ее называют реактором-размножителем.

Чтобы не тормозить нейтроны, воду использовать нельзя. Поэтому тепло из быстрого реактора выносит расплавленный жидкий металл — чаще всего натрий. Он великолепно передает жар, но обладает скверным характером: при малейшем контакте с воздухом или водой натрий мгновенно вспыхивает. Это делает такие станции невероятно сложными в постройке и эксплуатации.

Именно Россия сегодня держит мировое первенство в этой технологии. На Урале успешно трудятся мощные промышленные блоки БН-600 и БН-800, доказывая, что человечество может обеспечить себя энергией на тысячелетия вперед, запустив замкнутый топливный цикл.

Реакторы поколения III и III+

Третье поколение и его улучшенная версия с плюсом — это детища суровых уроков. Три-Майл-Айленд, Чернобыль и Фукусима заставили инженеров спуститься с небес на землю и переписать правила игры.

Реакторы поколения III+ не предлагают новой физики, это все те же проверенные водо-водяные концепции. Но их броня стала непробиваемой. Современная станция должна выживать в условиях абсолютного апокалипсиса: при потере всего электричества, обрыве труб, землетрясении, наводнении и даже прямом падении тяжелого пассажирского лайнера.

Для этого блоки укрывают двойными бетонными куполами. Под реактором устанавливают гигантскую пепельницу — ловушку расплава, которая поймает и остудит радиоактивную магму, если топливо все же расплавится. А главное — станция ошетибилась пассивными системами безопасности. Вода зальет активную зону под действием обычной гравитации, без единого насоса и приказа человека.

К этой элитной когорте относятся российский ВВЭР-1200, европейский исполин EPR, американский AP1000 и южнокорейский APR1400. Их безопасность беспрецедентна, но цена строительства взлетела до небес, превращая каждую новую станцию в испытание для националь-

НЫХ ЭКОНОМИК.

Поколение IV: реакторы будущего

Четвертое поколение — это смелый взгляд за горизонт. Это не какой-то конкретный чертеж, а международный клуб из шести перспективных направлений. Их общая цель — сделать атом не только чистым, но и безотходным.

Сюда входят быстрые реакторы с натриевым и тяжелым свинцовым теплоносителем. Здесь же сверхкритические водяные установки, пытающиеся выжать максимум КПД из воды под невероятным давлением. Здесь газоохлаждаемые машины для химической промышленности. И, наконец, экзотические жидкосолевые реакторы, где топливо не упаковано в металлические трубки, а растворено в булькающей ванне из раскаленной соли.

Поколение IV часто рекламируют как панацею от всех болезней. Но законы физики суровы: избавляясь от одних проблем, мы получаем другие. Свинец вызывает тяжелейшую коррозию металла. Соли разъедают трубы. Натрий горит.

Но именно эти футуристичные машины могут дать то, чего лишена современная энергетика: способность подчистую сжигать радиоактивный мусор, безопасно вырабатывать промышленный водород и навсегда закрыть вопрос о том, где брать уран для будущих поколений.

Малые модульные реакторы: размер, а не поколение

В последние годы мир захлестнула мода на аббревиатуру SMR — малые модульные реакторы. Важно понимать: это не новая физика и не отдельное поколение. Это революция в логистике и финансах.

Малый реактор может быть и классическим водяным, и перспективным солевым. Его главная идея в том, чтобы не строить десятилетиями циклопическую бетонную пирамиду в чистом поле, а штамповать небольшие энергоблоки на заводе. Собрали, привезли на грузовике или барже, подключили — и свет горит.

Это спасение для изолированных арктических поселков, удаленных рудников и небогатых стран, не способных потянуть стройку гигантской АЭС. Россия уже доказала работоспособность этой концепции, запустив плавучую станцию с реакторами ледокольного типа РИТМ.

Но экономическое будущее SMR пока туманно. Физика неумолима: построить один большой реактор всегда дешевле в пересчете на киловатт, чем десять маленьких. Спасти идею малого атома сможет только настоящий фабричный конвейер.

Отечественная линия развития

Если взглянуть на историю советской и российской атомной школы, мы увидим несколько мощных течений.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «Литрес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на Литрес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.