

Книга 2

ПОДЗЕМНЫЕ АТОМНЫЕ СТАНЦИИ

Реакторы в скважинах, шахтах и под водой



— Новые горизонты атомной энергетики —

Викрам Сингх

Мирный атом. Подземные атомные станции

<https://litres.ru/74341603>

SelfPub; 2026

Аннотация

Можно ли заменить часть бетонной защиты атомной станции километрами горных пород? Способен ли столб воды создавать давление, необходимое реактору? И станет ли электроэнергия дешевле, если опустить ядерную установку в глубокую скважину?

Вторая книга серии «Мирный атом» посвящена подземным и необычно размещённым атомным станциям. В ней рассматривается история реакторов, построенных внутри гор и скальных массивов, устройство современной скважинной установки, работа первого и второго контуров, гидростатическое давление, охлаждение и радиационная защита.

Особое внимание уделено проекту Deep Fission, предполагающему размещение компактного водо-водяного реактора на глубине около полутора километров.

Отдельные главы посвящены экономике подобных станций и сравнению международных проектов: российского РИТМ-200Н и «Шельф-М», плавучего энергоблока «Академик Ломоносов»,

китайского Linglong One, канадского BWRX-300, аргентинского CAREM и британского Rolls-Royce SMR.

Содержание

Глава	5
Железногорск: огромный атомный комплекс внутри горы	8
Хальден: исследовательский реактор в скале	10
Агеста: атомное отопление пригорода	11
Стокгольма	
Промышленный водо-водяной реактор в скальной камере во Франции	12
Авария внутри швейцарского подземного реактора	14
Почему подземные АЭС не стали массовыми	16
Чем проект в скважине отличается от предшественников	17
Главный урок прошлого	19
Глава 2. Реактор под километром воды - может ли скважина заменить защитную оболочку АЭС	20
Что происходит в Канзасе	22
Как должен работать подземный реактор	24
Что останется на поверхности	26
Какова мощность установки	27
Конец ознакомительного фрагмента.	28

Викрам Сингх

Мирный атом. Подземные атомные станции

Глава

Глава 1. Подземные реакторы появились задолго до
Deep
Fission

Прежде чем погружаться в технические детали амбициозного проекта скважинной атомной электростанции, важно понять, откуда вообще взялась сама идея прятать реакторы под землю.

Наш дальнейший рассказ будет построен поэтапно. Сначала мы заглянем в историю и посмотрим на уже реализованные подземные атомные объекты. Затем разберем схемы первого и второго контуров обычной АЭС, чтобы понять, чем они отличаются от скважинного проекта. Обязательно сделаем небольшую физическую паузу, чтобы поговорить о гидростатическом давлении. После этого обсудим самые болезненные вопросы: как обслуживать, перегружать топливо и выводить из эксплуатации реактор, застрявший в узкой трубе на километровой глубине. В финале мы посчи-

таем экономику и сравним эту задумку с другими международными проектами малых модульных реакторов.

Но начнем мы именно с истории.

Идея использовать многометровые слои горной породы в качестве естественного саркофага для ядерного реактора родилась почти одновременно с самой атомной энергетикой. Еще в пятидесятые и шестидесятые годы прошлого века в разных уголках планеты инженеры активно строили установки, укрытые внутри скальных массивов, глубоких тоннелей и специально вырубленных искусственных пещер.

Однако между этими историческими объектами и современным концептом скважинной АЭС от стартапа Deep Fission пролегает огромная технологическая пропасть.

Ранние подземные станции, по сути, представляли собой классические реакторные залы, просто перенесенные внутрь горы. В скале выдалбливали гигантскую пещеру, строили внутри площадки, монтировали тяжелые мостовые краны, прокладывали широкие транспортные тоннели и оборудовали комфортные проходы для персонала.

Новый американский проект предлагает совершенно иной, куда более радикальный подход. Инженеры предлагают отказаться от подземных дворцов. Вместо этого компактный реакторный модуль в виде длинного цилиндра должен быть просто опущен в узкую вертикальную скважину на глубину около полутора километров. Никаких кранов, никаких тоннелей и никакого доступа для человека во время работы

реактора там не предусмотрено.

Именно поэтому старые подземные АЭС нельзя назвать точными прототипами новой технологии. Но их уникальный опыт позволяет нам увидеть как неоспоримые плюсы, так и скрытые, болезненные проблемы размещения ядерного огня глубоко под землей.

Железногорск: огромный атомный комплекс внутри горы

Самый масштабный и впечатляющий пример подземного атома находится в России. В начале пятидесятых годов в глухом сибирском тайге, прямо внутри гранитного массива возле Красноярска, началось грандиозное строительство Горно-химического комбината. Это было сверхсекретное подземное предприятие, обеспечивающее ядерный топливный цикл Советского Союза.

Первый промышленный уран-графитовый реактор под кодовым названием АД заработал в этих подземных выработках в 1958 году. Спустя несколько лет рядом запустили еще две машины — АДЭ-1 и АДЭ-2. В толще скалы расположились не только сами реакторы, но и заводы по переработке радиоактивной химии, целая атомная теплоэлектротеплоцентраль, насосные станции и исполинские системы вентиляции.

Главной задачей этого подземного города изначально былаковка ядерного щита — наработка оружейного плутония. Поэтому сравнивать Железногорск с обычными гражданскими АЭС не совсем корректно. Тем не менее, реактор АДЭ-2 не только производил плутоний, но и попутно снабжал теплом и электричеством сам комбинат и закрытый город на по-

верхности. Как отмечают эксперты Всемирной ядерной ассоциации, в последние годы эксплуатации именно эта, энергетическая функция стала для машины основной.

Железногорский комбинат убедительно доказал: огромный, невероятно сложный ядерный комплекс действительно можно успешно эксплуатировать внутри горы на протяжении многих десятилетий. Но это был не глухой, необслуживаемый цилиндр в скважине. Внутри гранита пульсировал целый город с километрами тоннелей, рабочими залами и армией персонала. Гора служила лишь гигантской внешней скорлупой для полноценного завода.

Хальден: исследовательский реактор в скале

В 1959 году эстафету подхватила Норвегия, запустив в Хальдене тяжеловодный кипящий реактор. Его тепловая мощность была невелика — всего 25 мегаватт. Эту машину разместили в частично подземном скальном зале, и она стала сердцем важнейшего международного проекта. По данным Агентства по ядерной энергии, на этом реакторе ученые десятилетиями обкатывали новые виды ядерного топлива, испытывали металлы и доводили до совершенства системы безопасности. Станция проработала вплоть до 2018 года.

Хальденский реактор никогда не претендовал на звание коммерческой АЭС и не гнался за мегаваттами для населения. Тем не менее, его долгая и успешная жизнь подтвердила, что скальный монолит может стать надежной частью конструкции ядерного объекта.

Но и здесь есть принципиальное отличие от скважинного проекта. Прямо над крышкой реактора в Хальдене находился просторный обслуживаемый зал. Инженеры могли свободно осматривать оборудование, проводить ремонт и вытаскивать топливные кассеты обычными цеховыми кранами.

Агеста: атомное отопление пригорода Стокгольма

Швеция пошла еще дальше и построила один из первых в мире гражданских энергетических реакторов прямо в скале. Станция Агеста проработала десять лет, с 1964 по 1974 год, и вошла в историю как первая шведская установка, которая давала не только электрический ток, но и тепло. Кипяток от этого реактора по трубам направлялся прямо в систему центрального отопления тихого пригорода Стокгольма.

Машина работала на тяжелой воде и пряталась в просторной камере, вырубленной в скальной породе. Такое инженерное решение гарантировало прекрасную защиту от радиации, что и позволило разместить атомную станцию в пугающей близости от жилых кварталов.

Проект Агеста доказал жизнеспособность очень красивой идеи: малые подземные станции могут не только светить, но и греть, снабжая спальные районы горячей водой, а заводы — технологическим паром. Но, как и в предыдущих случаях, это была классическая, просторная станция, бережно укрытая внутри холма, а не запаянная намертво в узкой трубе.

Промышленный водо-водяной реактор в скальной камере во Франции

Самым близким историческим аналогом крупных подземных АЭС можно по праву считать французский энергоблок Chooz A.

Это был первенец французской водо-водяной школы. Станция начала давать ток в 1967 году и прослужила до начала девяностых, выдавая солидные 305 мегаватт электричества. Самое интересное, что сам реакторный котел и всё тяжелое оборудование первого контура инженеры спрятали в исполинских пещерах, вырубленных прямо в крутом склоне горы.

Этот проект особенно ценен для истории. В отличие от норвежских и шведских экспериментов, это был уже не исследовательский малыш, а полноценный промышленный водо-водяной гигант — прямой предок тех самых машин, которые сегодня составляют основу атомной энергетики во всем мире.

В годы активной работы скала действительно служила надежным щитом, защищая реактор от любых внешних угроз и экономя деньги на заливке колоссальных бетонных куполов. Но когда станция отработала свой век и ее остановили,

подземное расположение показало свой звериный оскал.

Французская энергетическая корпорация EDF в своих отчетах прямо признает: расположение реактора в тесной скальной пещере превратило демонтаж в настоящий кошмар. Узкие проходы чудовищно усложнили доступ к фонающему оборудованию, вывоз тяжелого лома и откачку грязной радиоактивной воды. Разборка станции внутри горы оказалась в разы сложнее и дороже аналогичных операций на обычных АЭС, стоящих под открытым небом.

Опыт французов служит грозным предупреждением для всех современных стартапов: пряча реактор под землю, вы можете сэкономить на строительстве, но рискуете разориться на его демонтаже.

Авария внутри швейцарского подземного реактора

История подземного атома знает не только инженерные триумфы, но и серьезные провалы. Самым известным инцидентом стала авария на швейцарской экспериментальной станции Lucens.

Этот крошечный реактор мощностью в несколько мегаватт также разместили в рукотворной пещере внутри зеленого холма. Он работал по хитрой схеме, используя тяжелую воду для замедления нейтронов и углекислый газ для отвода тепла.

Зимой 1969 года в одном из топливных каналов случилась беда: нарушилась циркуляция спасительного газа. Уран мгновенно раскалился, его оболочка лопнула, а скачок давления разорвал внутренние трубы реактора. Топливо начало плавиться, и радиоактивная грязь выбросилась прямо в подземный зал.

В этот момент скальная пещера сыграла свою главную роль. Тяжелые каменные своды надежно заперли радиацию внутри, и жители соседних городков даже не узнали об инциденте — ни малейшего выброса наружу зафиксировано не было. Однако саму станцию спасти не удалось, она была разрушена навсегда.

Ликвидация последствий затянулась на десятилетия. Расплавленное топливо собирали по кускам, оборудование аккуратно резали на металлолом, а зараженные участки скалы вырубали и мыли химикатами. Понадобилось больше тридцати лет, чтобы власти наконец признали эту площадку абсолютно безопасной и сняли с нее статус ядерного объекта.

Авария в Швейцарии — это лучшая иллюстрация к спору о подземных АЭС. Скала действительно работает как идеальный барьер, способный сдержать расплавленную активную зону. Но гора — это не панацея. Она не способна заменить собой надежные насосы, умную автоматику и качественные трубы внутри самого реактора.

Почему подземные АЭС не стали массовыми

Глядя на все эти реализованные проекты, возникает резонный вопрос: если идея так хороша, почему девяносто девять процентов всех атомных станций в мире все равно строят на открытом воздухе?

Ответ кроется не в физике, а в экономике. Прорубать в монолитной скале огромные залы, армировать своды, прокладывать многокилометровые тоннели и тянуть на глубину мощные вентиляционные шахты оказалось немыслимо дорого. При этом сам реактор не становился проще — ему все так же требовался прочный стальной корпус, насосы и системы аварийного глушения.

Скала защищала от падающих самолетов, но создавала ворох новых, бытовых проблем. Загнать в пещеру огромный парогенератор было почти невозможно. Любой пожар в замкнутом тоннеле превращался в смертельную ловушку для рабочих. Эвакуация усложнялась в разы, а вывоз тяжелого, фонащего оборудования превращался в логистический ад. Французская история с мучительным демонтажем стала последним гвоздем в крышку гроба этой концепции для большой энергетики.

Чем проект в скважине отличается от предшественников

Все исторические подземные станции строились по одной и той же простой философии: сначала нужно вырубить в горе огромный подвал, а затем собрать в нем обычную атомную станцию.

Концепт Deep Fission переворачивает эту логику с ног на голову.

Американские инженеры предлагают вообще отказаться от подземного строительства. Вместо этого они хотят собирать тонкий, длинный реактор-карандаш на обычном заводе, а затем просто опускать этот готовый цилиндр в готовую, глубокую буровую скважину, до краев заполненную водой.

Это различие меняет всё.

В шведских или французских пещерах оператор мог спуститься на лифте, пройти по коридору, послушать гудение турбины, принести лестницу и гаечным ключом затянуть подтекающий клапан. В скважинном реакторе этот номер не пройдет. Человек просто физически не сможет подобраться к машине, висящей в узкой трубе на глубине полутора километров. Любое, даже самое пустяковое обслуживание придется выполнять либо умными роботами с поверхности, либо полностью вытаскивая многотонный радиоактивный ци-

цилиндр наружу.

В обмен на эту чудовищную сложность в обслуживании, проект получает беспрецедентную защиту: километры глухой породы не пробьет ни один бункерный снаряд и не достанет ни одно цунами.

Главный урок прошлого

Если внимательно прочитать историческую летопись подземного атома, можно вынести четыре железобетонных правила, которые будут актуальны для любых новых стартапов.

Первое: толща земли и камня — это действительно лучшая, бесплатная и абсолютно непробиваемая защита от любых внешних катастроф и радиационных утечек.

Второе: прячась под землей, вы не защищаете реактор от самого себя. Трубы будут рваться, а насосы клинить одинаково часто как на поверхности, так и на глубине тысячи метров.

Третье: чем глубже и надежнее вы закопаете свою атомную станцию, тем больше слез и денег вы потратите через сорок лет, когда придет время резать ее на металлолом.

Четвертое: концепт скважинного реактора не является безумной фантазией с чистого листа. Это прямое, смелое развитие идей, которые советские, французские и швейцарские инженеры обкатывали еще полвека назад. Просто теперь атомный котел пытаются засунуть не в просторную пещеру, а в узкое горлышко буровой трубы.

Глава 2. Реактор под километром воды - может ли скважина заменить защитную оболочку АЭС

Большинство атомных электростанций хорошо заметны издалека. Огромные здания реакторных отделений, дышащие паром градирни, исполинские машинные залы и резервные системы охлаждения занимают площадь, сравнимую с небольшим городом. Но американская технологическая компания Deep Fission предлагает радикально изменить эту привычную индустриальную картину: она намерена опустить небольшой водо-водяной реактор в вертикальную скважину глубиной около одной мили, что составляет примерно полтора километра.

На поверхности земли останутся лишь турбина, генератор, электрооборудование и пульт управления. А вот самое сердце станции — сам реактор, активная зона и часть теплообменного оборудования — будет надежно спрятано глубоко под землей.

В популярной прессе эту установку поспешили окрестить ядерной батареей, однако такое определение в корне неверно. Это не радиоизотопный источник, который десятилетиями выдает крошечные порции электричества просто за счет естественного распада. Проект Deep Fission представля-

ет собой настоящий, полноценный реактор деления с ядерным топливом, циркулирующим теплоносителем и сложной системой преобразования тепла в киловатты.

Что происходит в Канзасе

Летом 2026 года в штате Канзас, на площадке в городе Парсонс, произошло важное событие. Специалисты Deerp Fission доставили туда собранный на заводе стальной прототип реакторного контейнера. Эта блестящая конструкция уже успешно прошла жесткие гидростатические испытания, но ядерного топлива внутри нее пока нет.

Контейнер привезли не для того, чтобы зажечь атомный огонь, а для отработки земной логистики. Инженерам нужно доказать, что они способны без заминок собрать эту махину, безопасно переместить ее над устьем, плавно опустить в скважину, а затем безошибочно подключить все километровые трубопроводы и кабели. Сама компания называет этот этап программой подтверждения концепции. По сути, это генеральная репетиция, призванная ответить на главный вопрос: можно ли в принципе оперировать таким массивным и сложным оборудованием на глубине полутора километров.

До прибытия контейнера на этой же площадке успели пробурить исследовательскую скважину глубиной почти в тысячу восемьсот метров. Правда, ее диаметр составляет всего около восьми дюймов, поэтому опустить туда реактор физически невозможно. Этот узкий прокол в земле нужен исключительно геологам: они изучают температуру, гидрологию и устойчивость местных каменных пород. Следующим,

куда более сложным и дорогим шагом должно стать бурение настоящей, широкой коммерческой скважины.

Поэтому громко заявлять о начале строительства действующей подземной АЭС пока преждевременно. Компания изготовила металлический макет, изучила грунты и только готовится к самой непредсказуемой части проекта — созданию глубокого, широкого колодца и погружению в него оборудования.

Как должен работать подземный реактор

Официальное название проекта звучит интригующе — гравитационный ядерный реактор. Но слово гравитационный здесь указывает не на какой-то экзотический метод расщепления атома, а на элегантное использование чудовищного давления, которое создает высокий столб воды в скважине.

Внутри стального контейнера скрывается давно знакомая, проверенная десятилетиями технология классического водо-водяного реактора. В таких машинах самая обычная, но идеально очищенная вода выполняет сразу две жизненно важные функции: она уносит жар от раскаленного урана и одновременно тормозит быстрые нейтроны, поддерживая ровное дыхание цепной реакции.

Вода внутри реактора нагревается до трехсот градусов, но физически не может закипеть, потому что находится под колоссальным давлением. На классических наземных АЭС это давление искусственно нагнетают гигантские насосы и специальные компенсаторы, а удерживают его невероятно толстые стальные стенки реакторного корпуса.

Инженеры Deep Fission предлагают изящно переложить эту работу на плечи самой природы. Прямо над реактором в

скважине будет стоять столб воды высотой в полтора километра. Этот водяной столб давит на дно с силой примерно в сто шестьдесят атмосфер, что идеально совпадает с рабочим давлением большинства современных атомных станций.

Приблизненно это можно представить по школьной формуле: давление равно плотности воды, умноженной на ускорение свободного падения и умноженной на высоту столба воды. Каждые десять метров глубины добавляют в копилку примерно одну атмосферу. На глубине тысячи шестисот метров мы как раз и получаем искомые сто шестьдесят атмосфер.

Однако это вовсе не означает, что вода из скважины будет просто протекать сквозь урановые таблетки. Радиоактивный теплоноситель надежно заперт и циркулирует исключительно внутри своего закрытого контура. Свой жар он отдает глубинному теплообменнику, который, в свою очередь, нагревает чистую воду второго контура, и уже она устремляется на поверхность к турбинам. Сама компания метко сравнивает эту схему с геотермальной электростанцией: кипящий источник спрятан глубоко в недрах, а чистое электричество рождается под открытым небом.

Что останется на поверхности

Красивая картинка, на которой вся атомная станция исчезает в узкой скважине, немного грешит против истины. Под землю уйдет лишь реакторный модуль, урановые кассеты, насосы первого контура и теплообменник.

На поверхности неизбежно останется внушительный индустриальный парк. Здесь будут гудеть турбина и электрогенератор, выбрасывать лишнее тепло конденсаторы, возвышаться трансформаторы и тянуться линии электропередач. Никуда не денутся и диспетчерская с пультами управления, оборудование для сложного обслуживания скважины и защищенные хранилища для свежего и отработавшего ядерного топлива.

Поэтому скважинная АЭС никогда не превратится в неприметный канализационный люк посреди пшеничного поля. И тем не менее, ее наземный след действительно окажется в несколько раз скромнее, чем у традиционной станции с ее исполинскими бетонными куполами.

Какова мощность установки

В предварительных документах, поданных в Комиссию по ядерному регулированию США, первый прототип описывается как водо-водяной микрореактор. Его тепловая мощность заявлена на уровне сорока пяти мегаватт, что на выходе даст около пятнадцати мегаватт чистого электричества. Чтобы почувствовать масштаб, достаточно вспомнить, что один современный энергоблок классической АЭС выдает в сто раз больше энергии.

Одного такого скважинного малыша вполне хватит, чтобы запитать удаленный рудник, небольшой городок на краю географии, военную базу или часть мощного вычислительного центра. Но для энергоснабжения мегаполиса одной дыры в земле явно не хватит.

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.