

**ПОДЗЕМНЫЕ АЭС: ЭФФЕКТИВНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ***О.Э.Муратов**ООО “ТВЭЛ”, Санкт-Петербург*

Розглянуто питання безпеки АЕС та фактори, що впливають на безпеку населення та навколишнього середовища при аваріях. Обґрунтовано можливість уникнути радіоактивного отруєння навколишнього середовища при найбільш важких гіпотетичних аваріях при розміщенні АЕС у підземному просторі. Виконано огляд та класифікацію підземних АЕС та розглянуто типи реакторів, які використовуються для діючих підземних АЕС, а також для тих, що проектуються. Обґрунтоване оптимальне застосування для підземних АЕС реакторів корабельного типу та використання суднобудівних технологій при їх створенні, що значно пудвищує ефективність станції та забезпечує додаткову безпеку населення та навколишнього середовища при позапроектних аваріях та екстремальних зовнішніх чинниках.

Рассмотрены вопросы безопасности АЭС и факторы, влияющие на безопасность населения и окружающей среды при авариях. Обоснована возможность избежать радиоактивного заражения окружающей среды при самых тяжелых гипотетических авариях при размещении АЭС в подземном пространстве. Проведены обзор и классификация подземных АЭС и рассмотрены типы реакторов, используемых в действующих и проектируемых подземных АЭС. Обосновано оптимальное применение для подземных АЭС реакторов корабельного типа и использование судостроительных технологий при их создании, что значительно повышает экономическую эффективность станции и обеспечивает дополнительную безопасность населения и окружающей среды при запроектных авариях и экстремальных внешних воздействиях.

APS operation safety and factors influencing on the population and environment safety at accidents are examined. The possibility to avoid the environment radioactive contamination at heavy hypothetical accident on AES underground location is substantiated. The review and classification of underground APS is carried out; reactor types used in operating and designed underground APS are examined. The operational use of ship type reactors to the underground APS also as the use of ship-building technology are based. It will increase the economical result of APS and will guarantee the additional population and environment safety at accidents and extreme external effects

Решение энергетической проблемы в глобальном масштабе без использования ядерной энергии невозможно. В настоящее время в 32 странах эксплуатируется 437 атомных энергоблоков, на которых вырабатывается электроэнергия суммарной установленной мощностью 350 ГВт (6% всей вырабатываемой энергии в мире). В стадии строительства находится 42 энергоблока, в том числе и в странах, ранее не имевших АЭС (Аргентина, Бразилия, Индия, Иран) [1,2]. Помимо того, США, Россия, Великобритания, Франция и Китай обладают атомным флотом, где число ядерных установок достигает тысячи.

Почти полувековой опыт развития ядерной энергетики подтвердил ее высокие экологоэкономические показатели, надежность и эффективность. Многолетние наблюдения показали, что при нормальной эксплуатации АЭС выбросы радиоактивных продуктов в атмосферу значительно ниже нормативов и составляют: по инертным радиоактивным газам – 22% от допустимых, по  $^{131}\text{I}$  – 1,3% и по долгоживущим радионуклидам – 0,2%. Мощность дозы в районе размещения АЭС составляет 10 – 14 мкР/час (на уровне природного фона), что более чем в 5 раз ниже, чем в районах зольных отвалов угольных ТЭС [3].

Однако для АЭС, как для любой сложной технической системы, всегда существует вероятность отказа, что может привести к аварии, то есть не может быть гарантированной 100% надежности. Анализ вероятностных показателей безопасности показал, что частота повреждений активной зоны от внутренних исходных событий для действующих АЭС составляет  $\sim 10^{-5}$  1/реактор\*год (для АЭС с реактором ВВЭР-1000 –  $1,7 \cdot 10^{-5}$  и для АЭС “Surgy”

(США) с реактором PWR –  $4,1 \cdot 10^{-5}$ ) [4]. За 1999 год на АЭС России произошло 88 нарушений, 2 из которых классифицировались уровнем “1” Международной шкалы INES [5] (“функциональное отклонение, которое не представляет какого-либо риска, но указывает на недостатки обеспечения безопасности”). Такие инциденты: ряд аварийных ситуаций на АЭС в разных странах и, главным образом, тяжелые аварии на АЭС “Тримайл-Айленд” в США и Чернобыльской АЭС в СССР обнажили ряд проблем ядерной энергетики, связанных с безопасностью населения, и подтвердили факт, что авария на АЭС – не исключительное явление, а вполне вероятное событие. Абсолютная безопасность, полностью исключающая аварийные ситуации, не может быть гарантирована даже при создании нового поколения реакторов повышенной безопасности, разработки которых ведутся в разных странах. Разрабатываемые реакторы повышенной безопасности ВПБЭР в России, ABWR, APWR и SBWR в США, SHBWR в Японии и PIUS во Франции сочетают апробированную технологию с принципами самозащитенности (отрицательный коэффициент реактивности, естественная циркуляция). Эти реакторы имеют самые совершенные технические системы безопасности и обладают самыми современными методами контроля за процессами в реакторе, однако их конструктивные решения все равно не могут исключить сложных гидравлических систем [6]. Поэтому возможен отказ технических средств и, соответственно, аварийная ситуация. Анализ вероятностных показателей безопасности для проектируемых АЭС с реакторами повышенной безопасности показал, что вероятность аварии хотя и понижается по сравнению с действующими АЭС

на порядок ( $2 \cdot 10^{-6}$  1/реактор\*год для АЭС с реактором ВВЭР-1000 и  $1,2 \cdot 10^{-6}$  1/реактор\*год для АЭС с реактором APWR) [4], но все равно существует. Авария может произойти и из-за неправильных действий персонала. По этой причине на российских АЭС в 1999 году произошло 6% всех нарушений [5]. Тяжелая ядерная авария при перезарядке реактора на АПЛ К-314 в бухте Чажма также произошла вследствие нарушения технологии персоналом. Кроме того, авария может произойти и из-за внешних воздействий природного или техногенного характера (землетрясение, цунами, падение тяжелого самолета, диверсий и т.д.).

Кардинальным путем повышения безопасности АЭС является их подземное размещение. Опыт проведения подземных ядерных испытаний доказал, что при надлежащем выборе геологических структур и применении специальных технологий укрепления подземных полостей, при ядерных взрывах большой мощности обеспечивается локализация радиоактивных продуктов. При мощности скального массива 30 м газообразные радиоактивные продукты попадают в атмосферу в объеме не более 1% от исходного. При взрыве формируется расплав горных пород, концентрирующийся на дне камеры и содержащий радионуклиды. Глубина проникновения расплава при температуре  $\sim 3000$ °C несколько метров, расплав кристаллизуется в течение месяца с момента взрыва, а образовавшаяся масса инертна и не представляет экологической опасности [7]. Поэтому можно утверждать, что укрытие мощной кровлей из природной породы ядерно- и радиационноопасных блоков станции локализует последствия любой ядерной (даже запроектной) и радиационной аварии в герметичном подземном пространстве. Природная порода является естественным фильтром радиоактивных частиц, поэтому выброс радиоактивности в атмосферу будет в 107 меньше, чем при наземном размещении станции. Даже при попадании радиоактивных продуктов в грунтовые воды задержка переноса с ними радионуклидов составит от нескольких месяцев до десятков лет (в зависимости от скорости движения грунтовых вод). Таким образом, радиационная угроза населению близлежащих регионов многократно ниже, чем при авариях того же класса на наземных АЭС.

Прочностные свойства гранитов, базальтов и некоторых других природных пород в 4...5 раз выше, чем у бетонов, поэтому скальный массив является защитной оболочкой при паровых взрывах, вследствие которых давление повышается до 1,3...1,5 МПа.

При подземном размещении АЭС создается возможность отвода тепла во вмещающий массив при аварийном расхолаживании реактора. Если энергия тепловыделения невелика, она отводится полностью, а в случаях, когда она полностью не может быть отведена без опасных температурных напряжений, частичный отвод тепла дает запас времени для ввода дополнительной системы охлаждения.

Толща земного слоя является надежной защитой и от любого внешнего воздействия – падения тяжелых самолетов, крупных метеоритов, применения бетонобойных снарядов, бомб, средств воздушно-космического нападения, а также диверсий и террористических актов.

Одним из актуальных факторов современной международной политической обстановки является терроризм. Не исключено, что объектом нападения международных террористических организаций могут стать ядерные объекты, в частности АЭС, где недостаточно эффективная защита от диверсий и терроризма очевидна. Подземное размещение АЭС надежно защищает их от поражающего воздействия не только высокоточного реактивного оружия типа «Корнет» или «Атлант», широко используемого международными террористами, но и любого бетонобойного заряда или взрыва боеприпаса мощностью 50 тонн тротила. Даже в случае проникновения террористов во внутренние помещения, где размещены ядерные энергоблоки станции, последствия аварии будут локализованы в подземном пространстве.

Слабой стороной существующих АЭС является и их полная незащищенность от падения тяжелого самолета типа «Боинг-747». Падение такого летательного объекта на блок обычной АЭС, которое может произойти, как показали террористические акты в США, не только в результате авиакатастрофы, приведет к глобальной катастрофе. Поэтому вероятностный подход к оценке такого события неприменим, и в случае целенаправленных действий его вероятность равна единице. Фанатики-камакидзе, захватившие над Америкой самолеты, спокойно могли направить их не на здания Всемирного торгового центра, а на одну из многочисленных американских АЭС. Катастрофой, по масштабам превышающей чернобыльскую, может закончиться и нападение на наземную АЭС небольшой диверсионной группы фанатиков-смертников. Размещенная в земных недрах АЭС полностью защищена и от природных воздействий, например, падение метеорита, цунами и др.

Важным фактором внешнего воздействия на АЭС являются землетрясения. Исследования вероятностных показателей безопасности, проведенные Ливерморской лабораторией для АЭС «Surtgy» (США), показали, что частота повреждений активной зоны от землетрясения составляет  $1,2 \cdot 10^{-4}$  1/реактор\*год, а от внутренних исходных событий –  $4,1 \cdot 10^{-5}$  1/реактор\*год [4], то есть внешние воздействия почти в 3 раза превосходят внутренние исходные события. Так как согласно требованиям МАГАТЭ расчетная вероятность тяжелой аварии не должна превышать  $10 \dots 5$  1/реактор\*год, то требуются огромные затраты на антисейсмические мероприятия при строительстве АЭС, а многие районы вообще непригодны для их размещения.

В Японии проводились экспериментальные исследования сейсмического воздействия на поверхности и в подземных машинных залах гидростанций

“Shiroyama” и “Numahaza”. Измерения показали снижение сейсмических воздействий в 2...3 раза. Детальные исследования проводились в Канаде фирмой “Онтарио Гидро” в связи с проектированием подземной АЭС вблизи озера Онтарио. Теоретические и экспериментальные исследования показали снижение сейсмических воздействий в 1,5...2 раза. Расчеты сейсмического воздействия на реактор, размещенный на глубине 120 метров, выполнены Горным институтом Кольского Научного Центра РАН. С учетом конкретных геологических условий получено снижение сейсмических колебаний в 1,4...1,7 раза [8].

Таким образом, исследования, выполненные независимо друг от друга для разных геологических условий, дали практически одинаковый результат о снижении сейсмического воздействия при подземном размещении АЭС, и вероятность тяжелой аварии от землетрясения становится сопоставимой с вероятностью от внутреннего исходного события. Приведенные результаты позволяют сделать однозначный вывод о значительном сокращении затрат на антисейсмические мероприятия для подземных АЭС по сравнению с наземными.

Факторы природного и техногенного характеров, влияющие на безопасность различных видов АЭС, приведены в табл. 1.

Важным преимуществом подземного размещения АЭС является и возможность хранения жидких и твердых радиоактивных отходов в подземном пространстве в течение всего периода эксплуатации станции. Этим исключается необходимость их транспортировки, что неизбежно связано с риском аварии, чревато облучением персонала и населения.

Подземные выработки, где размещены энергоблоки АЭС, могут использоваться как могильник радиоактивных отходов [9] после вывода станции из эксплуатации. Радиоактивные отходы – одна из основных проблем ядерной энергетики, окончательно не решенная ни в одной стране. В большинстве стран принят примерно одинаковый подход к выводу АЭС из эксплуатации, включающий три этапа. Первый этап – выгрузка отработавшего ядерного топлива, блокировка и герметизация трубопроводов и запорной арматуры. Второй этап включает демонтаж радиоактивного и нерадиоактивного оборудования, консервацию оборудования, которое не может быть демонтировано из-за высокой радиоактивности. Наконец, третий этап – окончательная разборка и утилизация оставшихся конструкций и освобождение промплощадки АЭС. Причем, заключительный третий этап может быть выполнен не ранее, чем через 100 лет после останова станции, а МАГАТЭ признает только его в качестве окончательного вывода АЭС из эксплуатации [10]. В настоящее время в мире в разной стадии вывода из эксплуатации находится около 50 энергоблоков АЭС. Анализ проектов вывода из эксплуатации АЭС в разных странах (“Шиппингпорт” (США), “Библис” (Германия), “Ловиса” (Финляндия), 1-й блок ЛАЭС (Россия) и др.) показал, что затраты на вывод энергобло-

ка из эксплуатации достигают 40% стоимости его создания и составляют около 300 \$ на 1 кВт установленной мощности. При выводе из эксплуатации энергоблока с реактором РБМК-1000 (стоимость около 300 млн. \$) образуется примерно 110 тыс. тонн твердых радиоактивных отходов активностью 105 ТБк [11], которые необходимо переработать и захоронить.

При снятии с эксплуатации подземной АЭС ее подземные помещения могут быть использованы как могильник радиоактивных отходов. После выгрузки отработавшего ядерного топлива и слива теплоносителя подземные выработки с радиоактивными отходами и радиоактивным оборудованием заполняются породой и омоноличиваются. Расчеты показали, что в этом случае затраты на вывод АЭС из эксплуатации значительно (более чем в 10 раз) сокращаются [8] и, помимо того, отпадает необходимость контроля радиационной обстановки на промплощадке в течение длительного времени. Кроме того, подземное захоронение радиоактивных отходов в геологические формации рекомендовано МАГАТЭ, как наиболее перспективный метод.

Впервые промышленный реактор в подземном пространстве был введен в эксплуатацию в 1958 году в г. Железнодорожске (бывший Красноярск-26). Глубина залегания подземных выработок – 250 м. Это был уран-графитовый реактор АД на Красноярском Горно-химическом комбинате для наработки оружейного плутония. Затем там же были построены еще два реактора: АДЭ-1 (также для наработки плутония, 1962 г.) и АДЭ-2 – энергетический (1964 г.), для энергоснабжения комбината и для теплоэлектроснабжения и горячего водоснабжения г. Железнодорожска с населением более 100 тыс. человек.

В 1992 году реакторы АД и АДЭ-1 были остановлены, а реактор АДЭ-2 используется для энергообеспечения Железнодорожска [5] и является единственной в России подземной атомной станцией энергоснабжения.

Мировой опыт создания подземных АЭС насчитывает более 30 лет. Первая экспериментальная подземная АЭС “Халден” с тяжеловодным кипящим реактором была введена в эксплуатацию в 1960 году в Норвегии. Ее мощность составила 25 МВт. Подземная выработка, в которой размещен реактор, имеет размеры 30x10 м и высоту 26 м и расположена в скальном массиве на глубине 30 м. АЭС “Халден” была построена в непосредственной близости от населенного пункта [12].

Самая крупная подземная АЭС “Сена-Чуз” (мощностью 275 МВт) с реактором PWR была построена во Франции в 1967 году. Особенностью ее компоновки является то, что реактор, его вспомогательные системы и системы локализации аварии установлены в двух подземных сооружениях, облицованных бетоном, а турбогенераторы, системы управления и вспомогательное оборудование размещены в здании на поверхности. Стены реакторного помещения дополнительно покрыты стальными ли-

стами. Подземные выработки размещены в сланцах на глубине 50 м.

В настоящее время в мире (кроме России) эксплуатируется пять подземных АЭС. Это, кроме упомянутых “Халден” и “Сена-Чуз”, станции “Хамболдт” (США, 1963 г.), “Агеста” (Швеция, 1964 г.) и “Люцерн” (Швейцария, 1968 г.). Еще одна экспериментальная АЭС SA (Швейцария) была построена в 1968 году, однако, после аварии реактора в 1969 году была остановлена.

Опыт эксплуатации подземных АЭС подтвердил высокую степень защищенности технологического оборудования, персонала и населения при подземном размещении станций и их экологическую чистоту. В непосредственной близости от реактора размещаются бассейн выдержки и перегрузки топлива и хранилище отработанных ТВЭЛов. Все работы с радиоактивными материалами ведутся только в подземных помещениях. Помещения для персонала, контрольно-измерительной аппаратуры и служб дозиметрического контроля скомпонованы в отдельный блок с учетом обеспечения необходимых условий для работы.

Накопленный опыт и новые горно-строительные технологии явились основой для проектирования новых подземных АЭС с реакторами большей мощности. Мировой опыт подземного строительства последних десятилетий прошлого века доказал, что не существует никаких технических проблем для создания крупногабаритных сооружений для размещения блоков АЭС, а по данным зарубежных исследований сроки строительства подземных АЭС не превышают 1,5...2 лет (15...25%) по сравнению с наземными. Удорожание строительства подземной АЭС по сравнению с наземной не превышает 25...40% [12] без учета затрат на вывод станции из эксплуатации, а с их учетом стоимости строительства сопоставимы. Проведенные в Японии технико-экономические сравнения подземной и наземной АЭС мощностью 1100 МВт показали экономическую целесообразность подземной АЭС в стране со скудными земельными ресурсами, развитой промышленностью и густонаселенностью. По данным Института энергетики Японии даже делается вывод, что именно создание подземных АЭС позволит решить сложную проблему размещения объектов ядерной энергетики в стране.

Кроме Японии национальные программы развития ядерной энергетики и других стран (Канада, США, Бельгия, Швеция и др.) содержат проекты строительства подземных АЭС. В настоящее время разработано более десятка проектов их создания. Несмотря на разнообразие планировочных решений, глубины размещения, типов реакторов и т.д., все их можно разделить на три типа (см. рис.1) [7]:

АЭС штольневого типа. Все группы оборудования размещены в одной или нескольких подземных штольнях в скальном массиве.

Котлованная АЭС с размещением всех групп оборудования в котловане с последующей засыпкой грунтом или скальной породой.

Комбинированное размещение АЭС. В этом случае реакторное оборудование, его вспомогательные системы и системы локализации аварии размещаются в подземных помещениях, а остальное оборудование размещено в наземных помещениях.

Конкретный выбор типа АЭС и площадки для ее строительства определяется следующими условиями:

- благоприятные горно-геологические и геомеханические характеристики геологической формации;
- удобство подходов и подъездов к площадке;
- особенности рельефа местности;
- сейсмические и тектонические условия;
- наличие источников водоснабжения;
- отсутствие полезных ископаемых в зоне строительства;
- технико-экономические показатели строительства.

В табл.2 приведены основные характеристики некоторых зарубежных проектов подземных АЭС [12]. Глубина заложения подземных АЭС, различающаяся в различных проектах в несколько раз, зависит от величины давления, которое возникает при аварии, и от физических свойств грунта, определяющих распространение радиоактивности при ее выходе из реакторного помещения.

В России Нижегородским институтом “Атомэнергопроект” разработан проект подземной АЭС штольневого типа с реактором ВВЭР-1000 для Кольского полуострова. В этом проекте реактор размещается в вертикальном цилиндрическом подземном сооружении с куполообразным сводом диаметром 59 и высотой 90 м. Глубина заложения – 40 м.

В существующих проектах подземных АЭС применены различные типы реакторов (PWR, BWR, CANDU, ВВЭР). Габаритные размеры таких реакторов требуют создания для них подземных помещений большого объема, как, например, упомянутый проект с реактором ВВЭР-1000 или проект Калифорнийской Энергетической компании, где реактор PWR-1300 размещается в помещении размерами 31x58 и высотой 65 м. Все это влечет, как упоминалось выше, удорожание и увеличение сроков строительства станции. Кроме того, усложняются ремонт и обслуживание оборудования и требуются постоянные вахты значительного количества персонала в подземных помещениях.

Наиболее целесообразно для подземных АЭС использовать высоконадежные наиболее мощные корабельные реакторы типа КН-3, обладающие высокой компактностью. Проведенный анализ показал, что при минимальной модернизации возможно увеличить их номинальную мощность почти вдвое [13]. Уникальный опыт эксплуатации этих реакторных установок на крейсерах типа «Петр Великий» (в настоящее время количество действующих установок типа КН-3 – 8 единиц, наработки – несколько десятков реакторо-лет) позволяет создать АЭС на базе реакторов КН-3 в сжатые сроки и при низком риске использования новых технологий.

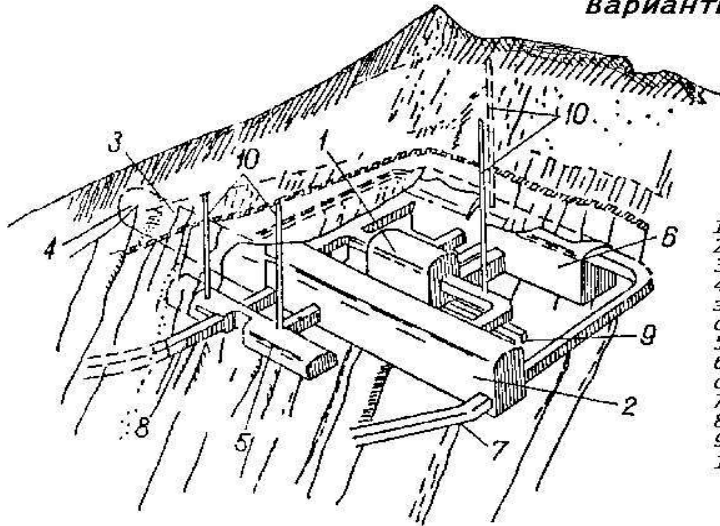
Типовой проект подземной атомной теплоэлектростанции (ПАТЭС) установленной мощностью 300 МВт на базе реактора КН-3 и судостроительных технологий состоит из четырех унифицированных энергомодулей, каждый из которых размещается в одноуровневой штольне размерами 12х16х100 м (см. рис. 2).

Принятые в проекте конструктивные и технологические решения обосновывают привлекательность ПАТЭС по многим причинам. Помимо преимуществ, присущим подземным АЭС, использование корабельных реакторов и судостроительных технологий дополнительно позволяет решить многие актуальные проблемы ядерной энергетики и суще-

ственно повысить экономическую эффективность станции [1,14].

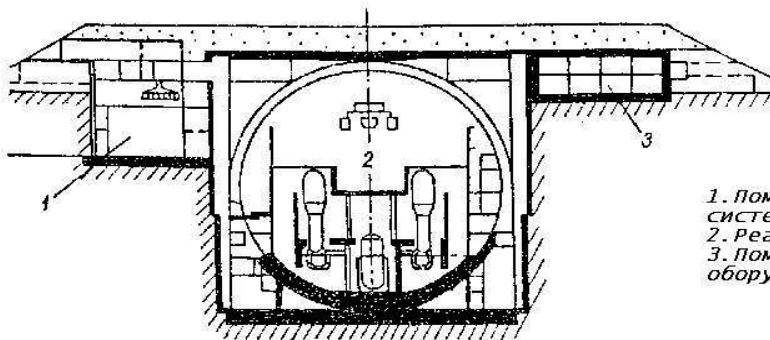
**Сжатые сроки строительства.** При сооружении ПАТЭС возможно одновременное и независимое производство работ по строительству штолен и изготовлению, сборке и испытаниям оборудования энергомодулей в заводских условиях. Готовые «под ключ» энергомодули доставляются к уже построенным штольням и устанавливаются там для эксплуатации. Благодаря этому технологическому приему сроки строительства не превышают 4...5 лет, тогда как строительство стационарных АЭС занимает не менее 8...10 лет, а аналогичных подземных – 10...12.

## Варианты подземного размещения АС



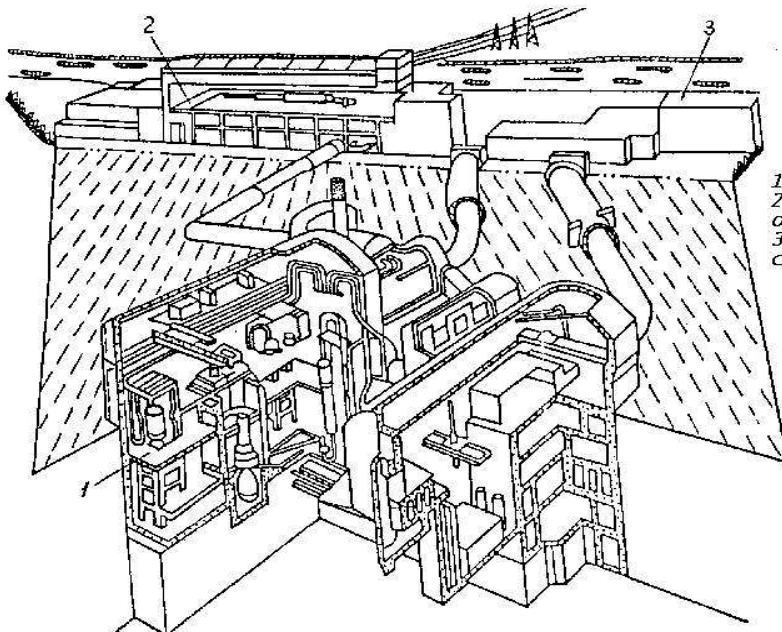
### Подземная АС

1. Реакторное помещение
2. Помещение машинного зала
3. Центр управления
4. Помещение электротехнического оборудования
5. Трансформаторное помещение
6. Помещение вспомогательного оборудования
7. Основной входной тоннель
8. Запасной входной тоннель
9. Расширительный объем
10. Вентиляционные шахты



### Котлованная АС

1. Помещение вспомогательных систем реактора
2. Реакторное помещение
3. Помещение электротехнического оборудования



### АС "Сена-чуз"

1. Реакторное помещение
2. Помещение электротехнического оборудования
3. Помещение вспомогательных систем

Рис.1. Варианты размещения атомных станций

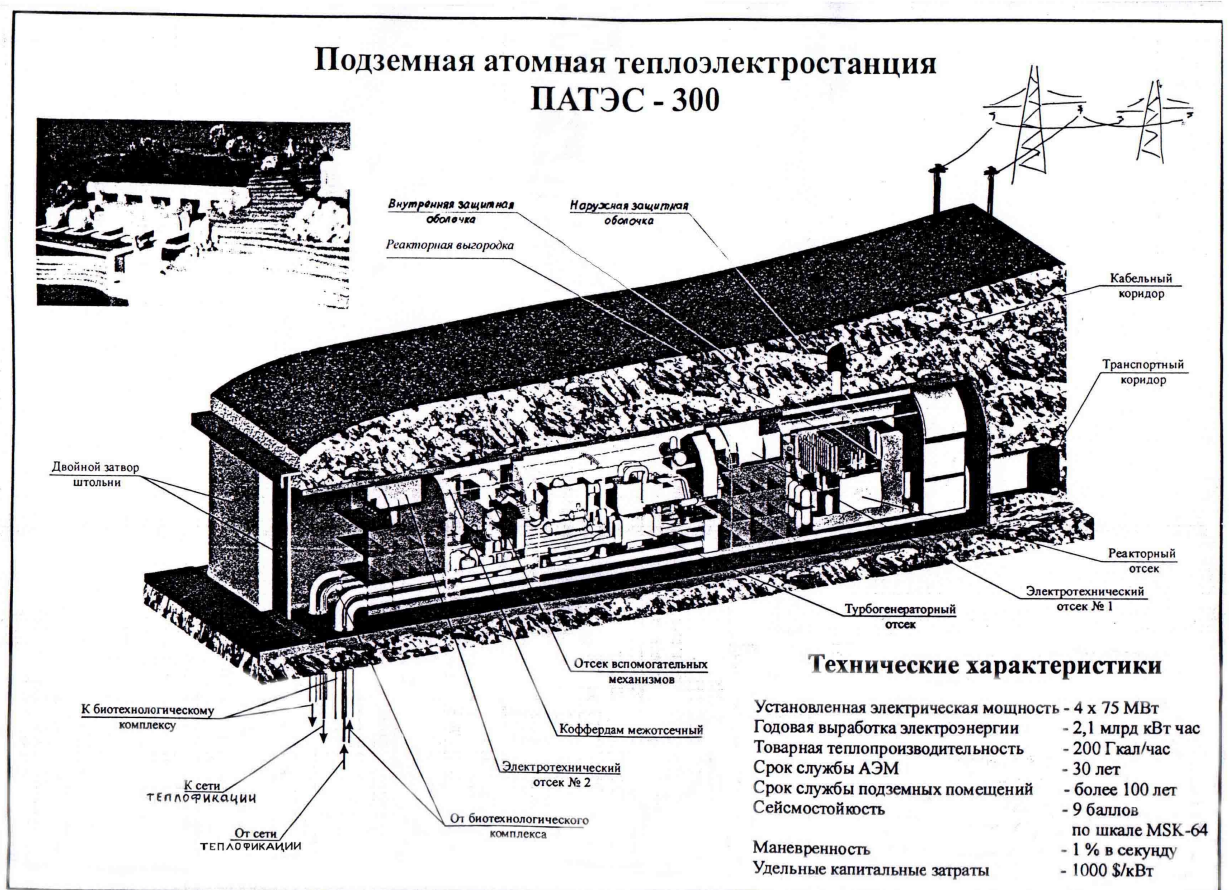


Рис.2. Типовой проект подземной атомной теплоэлектростанции (ПАТЭС)

Таблица 1

#### События, важные для безопасности АЭС

№ пп	Событие	Подземная АЭС	Плавучая АЭС	Наземная АЭС
1	Падение тяжелого летательного аппарата	-	+	+
2	Внешнее затопление	+	+	+
3	Штормовые волны (цунами)	-	+	+
4	Экстремальная скорость ветра (торнадо)	-	+	+
5	Пожар на станции	+	+	+
6	Пожар на территории станции	-	+	+
7	Внутренне затопление	+	+	+
8	Сейсмическая активность	-	+	+
9	Взрывы промышленных и военных объектов за пределами станции	-	+	+
10	Метеориты	-	+	+
11	Молнии	-	+	+
12	Аварии на транспорте	-	+	+
13	Усадка грунта (выравнивание внутреннего напряжения в нем)	+	-	+
14	Аварии на газопроводах вне станции	-	+	+
15	Выделение токсичных газов	+	+	+
16	Воздействие на ЯЭУ осколков при аварии турбины	-	+	+
17	Оползень	+	+	+
18	Навал льда	-	+	-
18	Навигационная авария	-	+	-
20	Применение легкого реактивного оружия	-	+	+
21	Применение фугасных или бетонобойных бомб	-	+	+
22	Диверсии, терроризм	-	+	+

**Многомодульность станции.** Благодаря этому гарантируется стабильность в отпуске электро- и теплоэнергии при проведении профилактических работ на каком-либо энергомодуле. Кроме того, в случае необходимости может быть построена и станция с большим числом энергомодулей и, соответственно, большей мощности.

**Маневренность.** Использование реакторов именно корабельного типа обеспечивает отслеживание мощности в диапазоне 5%...100% номинальной мощности станции и допускает высокую (до 1% в сек) скорость маневрирования по мощности, что позволяет легко адаптироваться к любому графику внешней нагрузки по электрической и тепловой энергиям. Блоки современных стационарных АЭС работают только в базовом режиме, что создает неудобства в региональном энергообеспечении.

**Надежность.** Использование почти полувекового опыта эксплуатации кораблей и судов с ядерными энергетическими установками доказало высокую надежность корабельных ядерных энергетических установок, которая достигается следующими конструктивными решениями:

- применением апробированных на практике материалов для всех узлов и элементов;
- высоким уровнем автоматизации, открывающим реальную перспективу для безлюдной эксплуатации станции – это современный подход к решению проблемы надежной и безопасной эксплуатации АЭС;
- широким использованием самосрабатывающих устройств для введения в действие систем безопасности;
- резервированием элементов и систем безопасности, применением систем безопасности различного принципа действия;
- использованием двойной запорной арматуры в системах, смежных с первым контуром.

Ядерные установки с реакторами корабельного типа после Чернобыля были повторно исследованы на надежность и безопасность и рекомендованы к использованию. Печальный опыт гибели атомных подводных лодок “Комсомолец” и “Курск” подтвердил, что в аварийной ситуации реактор автоматически “глушится”, то есть в нем прекращается цепная ядерная реакция, и покоящиеся на морском дне ядерные реакторы погибших лодок не представляют ни малейшей угрозы для окружающей среды.

**Ядерная безопасность.** Конструктивные решения корабельных реакторов полностью исключают неконтролируемый разгон реактора, а благодаря отрицательному коэффициенту реактивности обеспечивается самогашение цепной ядерной реакции при несанкционированном повышении мощности и температуры в реакторе. Кампания корабельных реакторов составляет 27000 ч, что позволяет им работать без перегрузки около четырех лет, а это, в свою очередь, значительно сокращает число ядерноопасных операций. За срок службы реактора производится не

более 7 перегрузок, что значительно меньше, чем на стационарных АЭС.

**Топливный цикл.** Во всем мире топливный цикл реакторов атомных станций основан на использовании низкообогащенного ядерного топлива (обогащение по U235 2 – 4%). Этот U – Pu ядерный топливный цикл первоначально был разработан для чисто военных целей, так как позволял производить наработку Pu239, применяемого для производства ядерных зарядов и бомб, используя в качестве исходного материала практически природный уран.

Помимо высокофонового оружейного Pu239 в отработавшем ядерном топливе происходит накопление и других, также высокофоновых изотопов плутония (Pu,240,241,243), трансплутониевых элементов (Am241,243 и Cm242,244), а также изотопов Np237 и U233,234,236. Использование этого “военного” топливного цикла для широкомасштабного производства энергии создает серьезную и трудно разрешимую проблему ядерной энергетики – образование огромного количества радиоактивных отходов. Так, при производстве 1 ГВт электроэнергии на традиционных АЭС в год образуется: плутония – 200 кг, трансплутониевых элементов – 4,53 кг и нептуния – 11,25 кг [15].

В настоящее время в мире на АЭС ежегодно вырабатывается до 85 тонн высокофонового оружейного плутония, который, кроме того, является особым веществом в проблеме негативного воздействия на окружающую среду. Помимо высокой  $\alpha$ -активности, плутоний чрезвычайно токсичен химически. При его взаимодействии с силикат-ионами или кремниевой кислотой образуются комплексные соединения, которые не выпадают в осадок и остаются устойчивыми в течение длительного времени, а при гидролизе ионы плутония образуют химические комплексы, аналогичные коллоидам и полимерам.

В корабельных реакторах, топливный цикл которых основан на использовании высокообогащенного ядерного топлива (обогащение по U235 до 99,9%, то есть отсутствие в топливной композиции U238), кроме уже упоминавшегося отрицательного коэффициента реактивности не происходит наработки плутония и трансплутониевых элементов, и поэтому количество радиоактивных отходов в 35 раз меньше, а отработавшее ядерное топливо после технологической переработки подлежит использованию в реакторах типа РБМК обычных АЭС. Ядерные державы (Россия, США, Великобритания, Франция) обладают мощным ядерным потенциалом, включающим единый оружейный и топливный комплекс.

Наличие развитого топливного комплекса и современных технологий обогащения урана делает экономически эффективным использование высокообогащенного топлива в энергетических реакторах. Кроме того, невозможность наработки оружейного Pu239 позволяет создавать атомные станции с корабельными реакторами в любых странах без угрозы распространения оружейных ядерных материалов.



**Сейсмоустойчивость.** Сейсмостойкость ПАТЭС дополнительно к подземному размещению повышается применением ударо- и вибростойкого оборудования, широко используемого в атомном кораблестроении и показавшего себя только с хорошей стороны. Поэтому ПАТЭС можно размещать практически в любом регионе планеты.

**Пожаробезопасность.** Пожары на ядерно- и радиационноопасных объектах, каковыми являются АЭС, могут привести к катастрофам мирового масштаба. По данным МАГАТЭ в мире на АЭС ежегодно происходит от 35 до 50 пожаров, из которых 9% – средние, с выходом радиоактивности в пределах здания реактора, а 0,5% – крупные, с выходом радиоактивности за пределы АЭС [16]. Пожары, имевшие место на российских АПЛ «Комсомолец» и К-219, явились причиной их гибели. Поэтому обеспечение пожаробезопасности – одна из важнейших задач эксплуатации ядерноопасных объектов. Пожаробезопасность ПАТЭС, благодаря высокому уровню автоматизации и безлюдной эксплуатации, обеспечивается за счет методов и средств регулирования атмосферы, ее герметичных отсеков, которые оснащаются системой обеднения воздуха кислородом (до 15%).

Привлекательность предлагаемого проекта ПАТЭС обусловлена не только принятыми конструктивными и технологическими решениями, но и экономической эффективностью станции.

Параметры безопасности ПАТЭС (4-й уровень шкалы INES – “Авария в пределах АЭС”) позволяют размещать их вблизи любого населенного пункта, поэтому потребителю передается не только электроэнергия, но и товарное тепло, что более чем вдвое повышает коэффициент использования тепловой мощности по сравнению с традиционными АЭС и позволяет более рационально использовать ядерное топливо. Практически полная утилизация тепла по-

требителями означает резкое снижение теплового сброса в окружающую среду, что сохраняет природный баланс. Кроме того, наличие постоянного источника теплоснабжения позволит создать тепличные комплексы для круглогодичного выращивания экологически чистой сельхозпродукции в защищенном грунте, что особенно актуально для северных регионов.

**Вывод ПАТЭС из эксплуатации.** Энергомодуль после выработки ресурса выкатывается из штольни, выведенная из эксплуатации реакторная установка после выгрузки облученного ядерного топлива закатывается вглубь штольни для длительного хранения, а остальное нерадиоактивное оборудование отправляется на судоремонтный завод на переработку. Новые энергомодули взамен выработавших ресурс устанавливаются в те же штольни. Таким образом, помимо многократного использования однажды построенных штолен для размещения новых энергомодулей после окончания срока службы выработавших свой ресурс, значительно сокращаются и сроки создания замещающих энергоблоков. Кроме того, не требуется организации специальных мест хранения огромного количества радиоактивных материалов, образующихся при демонтаже выведенных из эксплуатации реакторных установок традиционных АЭС, и не требуется строительства новых подземных сооружений для размещения замещающих блоков подземных АЭС. Согласно оценкам стоимость вывода из эксплуатации ПАТЭС составляет около 300 тыс \$ (определяется практически только затратами на проходку дополнительного пространства в штольнях) [17], что несопоставимо ниже других видов АЭС.

Технико-экономические показатели различных видов АЭС (подземной, плавучей и наземной) приведены в таблице 2 [14].

Таблица  
2

Технико-экономические показатели различных видов АЭС

N	Наименование показателей	ПАТЭС	ПлаАЭС	АЭС (В (ВВЭР))
1	Установленная мощность, МВт	300	70	1000
2	Коэффициент использования установленной мощности	0,82	0,82	0,75
3	Расход эл.энергии на собственные нужды, %	4,7	7	9,5
4	Годовой отпуск эл.энергии, млрд кВт.ч	1,92	0,4	4,41
5	Капитальные вложения, -полные, млн \$ -на 1 кВт установленной мощности, \$	312,9 1043	185 2642	1270 1693
6	Стоимость начальной загрузки, млн \$	19,2	9,1	73,5
7	Годовые затраты на производство эл.энергии, млн \$	21,9	33,58	143,02

8	Себестоимость эл.энергии,цент/кВт.ч	0,69	12	3,24
---	-------------------------------------	------	----	------

Как упоминалось выше, удорожание подземной АЭС по сравнению с наземной составляет 25...40%, поэтому капитальные вложения для строительства подземной АЭС с реактором ВВЭР-1000 составят до 1778 млн \$ (соответственно 2370 \$ на 1 кВт установленной мощности).

В докладе по развитию ядерной энергетики в XXI веке, представленном Министерством Энергетики США Президенту Дж.Бушу, сформулированы основные требования к характеристикам реакторов IV поколения для строительства АЭС после 2020 года [18]:

- себестоимость производства электроэнергии (с учетом затрат на вывод из эксплуатации и удаление РАО) – 3...4 цент/кВт\*ч;

- удельные капитальные затраты на строительство не более 1000 \$/кВт, сроки строительства – 3...4 года;

- вероятность разрушения активной зоны значительно ниже существующих норм;

- полное исключение крупных аварий с выбросом радиоактивности;

- сокращение объемов РАО и решение всех вопросов с их удалением;

- снижение радиационной нагрузки на весь период функционирования.

Предлагаемый проект ПАТЭС удовлетворяет весьма жестким требованиям, предъявляемым к АЭС второй половины XXI века, превосходя по экономическим показателям, как видно из табл.3, другие виды сооружаемых в настоящее время АЭС.

**Таблица 3**

**Примеры зарубежных проектов подземных АЭС и их основные характеристики**

	Проект, страна	Тип реактора и мощность, МВт	Размещение	Глубина заложения, м	Конструктивные особенности систем безопасности
1	Безлайн, США	PWR – 1300 BWR – 1300	Подземное	60	
2	Харпл Инжиниринг, США	BWR, 2x1000	Подземное	135	Железобетонная обделка подземных выработок
3	Сандиа, США	PWR – 1100	Котлованное Подземное	30 90	Бетонная защитная оболочка
4	Калифорнийская Энергетическая Компания, США	PWR – 1300	Котлованное Подземное	15 90	Бетонная обделка толщиной 1 м и стальная облицовка  Бетонная обделка реакторной выработки
5	Саджент энд Лэнди, США	PWR – 1300	Котлованное	15	Реакторное отделение заключено в стальную герметичную оболочку, другое оборудование размещено между этой оболочкой и внешней бетонной оболочкой
6	Германия	PWR – 1300	Подземное	13	Двойная защитная оболочка
7	Онтарио Гидро, Канада	CANDU, 4x850	Котлованное Подземное	10 400	Бетонная обделка реакторной выработки
8	NVE, Норвегия	PWR – 1000	Подземное	100	Двойная защитная оболочка
9	Швеция	BWR – 1050	Подземное	60	Реактор внутри выработки окружен герметичным боксом
10	SECURE, Швеция, Финляндия	PWR – 500	Подземное	20	
11	Великобритания	PWR – 1200	Котлованное	20	Двойная защитная оболочка

12	ЕПР, Швейцария	PWR – 1300	Котлованное Подземное	12 100	Двойная защитная оболочка
13	Япония	PWR-600	Подземное	-	

Благодаря принятым конструктивным решениям значительно повышается экономическая эффективность подземных АЭС при одновременном решении важнейшей задачи ядерной энергетики – обеспечении безопасности проживающего вблизи населения, и еще раз подтверждается, что ядерная энергетика характеризуется как стабильный источник энергии, экономически и экологически более выгодный по сравнению с тепловыми и гидроэлектростанциями. Высокая экологическая чистота проекта отмечена золотыми медалями на Международных выставках в Брюсселе в 1994 и 1996 годах.

Таким образом, ПАТЭС можно считать основой энергетики для энергодефицитных регионов, где требуется обеспечить стабильное энергоснабжение, создать комфортные условия жизни населения и экологическое благополучие, но нецелесообразно развивать централизованное энергоснабжение.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Э.Л.Петров. *Подход к решению проблемы атомных станций* /В кн. А.Г.Шленов. Микромир, Вселенная, Жизнь. Санкт-Петербург, “Ольга”, 1998.
2. *Проблемы безопасного развития атомной энергетики* /Под ред. Л.А.Большова, М.: “Наука”, 1993.
3. В.В.Довгуша, М.Н.Тихонов и др. *Радиационная обстановка на Северо-Западе России*. Мурманск, Книжное издательство, 1999.
4. Л.М.Векслер. “Сопоставление наземного и подземного расположения атомных станций”//*Материалы Международной конференции “Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики”*, Апатиты, 1992.
5. В.В.Довгуша, М.Н.Тихонов и др. *Радиационная обстановка в Восточной Сибири*. Санкт-Петербург, 2001.
6. Е.О.Адамов и др. Концептуальные положения создания подземных АЭС и выбор реакторных установок для них //*Материалы Международной конференции “Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики”*, Апатиты, 1992.
7. Е.А.Котенко *Создание подземных атомных станций*. М.: “ЦНИИАтоминформ”, 1996.
8. Н.Н.Мельников и др. *Общая концепция подземного размещения объектов ядерной энергетики,*

обеспечения безопасности и снижения воздействия на окружающую среду //*Материалы Международной конференции “Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики”*, Апатиты, 1992.

9. Н.Н.Мельников и др. *Подземное захоронение радиоактивных отходов*. Апатиты, 1998.

10. А.М.Паршин, Г.Д.Никишин, Ю.П.Добренякин. *Некоторые экологические аспекты ядерной энергетики, обусловленные обращением с радиоактивными отходами* /В кн.: Радиационная повреждаемость конструкционных материалов. Под ред. А.М.Паршина. Санкт-Петербург, Изд. С-ПбГТУ, 2000.

11. В.И.Бурак, О.Э.Муратов и др. *Обращение с радиоактивными отходами и радиационная безопасность при выводе из эксплуатации ПАТЭС* //*Материалы III Международной конференции “Радиационная безопасность”*, Санкт-Петербург, 2000.

12. Н.Н.Мельников, В.П.Конухин, В.А.Наумов. *Подземные атомные электростанции*. Апатиты, 1992.

13. В.И.Васюков, К.Б.Вешняков и др. Энергоисточники малой мощности и реакторные установки на базе технологий атомного судостроения //*Сборник материалов Международного Форума “Топливо-энергетический комплекс России: региональные аспекты”*, С-Петербург, 2002.

14. О.Э.Муратов, Э.Л.Петров. Особенности создания подземных атомных станций повышенной безопасности //*Научные ведомости БелГУ, серия “Физика”*, №2 (15), 2001.

15. Е.Д.Домашев. О возможности развития атомной энергетики в Украине //*Промышленная теплотехника*, 1998, №3, т.20.

16. В.П.Конухин. *Ядерные технологии и экосфера*. Апатиты, 1995.

17. В.И.Бурак, О.Э.Муратов и др. *Обращение с радиоактивными отходами и радиационная безопасность при выводе из эксплуатации ПАТЭС* //*Материалы III Международной конференции “Радиационная безопасность”*. С.-Петербург, 2000.

18. В.Махова, Л.Преображенская, В.Кудинов. Роль атомной энергетики в XXI веке //*Бюллетень по атомной энергии*, №6, 2002.