

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ ПОВЫШЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

О.Э.Муратов, Э.Л.Петров

С.-Петербург, Центральный научно-исследовательский институт
им. А.Н. Крылова

В современных условиях глобальные проблемы энергетики без ядерной энергетики нельзя будет решить и, несомненно, выход из создавшегося положения будет найден. Он должен основываться на том, что при любой аварии, которая может произойти в реакторе на АЭС, она ни при каких обстоятельствах не должна принять характер катастрофы Хиросимы. Сейчас уже предлагаются решения и заключаются они, например, в том, чтобы помещать ядерные реакторы электростанций под землей, на достаточной глубине.

Академик П.Л. Капица

Устойчивое развитие человечества невозможно без решения энергетической проблемы, а значит, задачи производства и использования энергии имеют первостепенное значение. В настоящее время почти 90 % энергии в мире производится за счет ископаемого топлива – угля, нефти, газа, сланцев – негативные последствия использования которого широко известны. Это, главным образом, экологические проблемы, связанные с выбросом в атмосферу огромного количества парниковых газов, ядовитых, токсичных и радиоактивных веществ при сжигании органического топлива, а также экономические, связанные с колоссальными затратами на добычу топлива, его транспортировку, освоение новых месторождений. Например, в Китае, где энергообеспеченность на душу населения в десятки раз ниже, чем в экономически высокоразвитых странах, свыше 60 % всех железнодорожных перевозок приходится на доставку угля для электро- и тепловых станций. Особенно опасна привязка энергетики страны или региона к какому-либо одному виду ископаемого топлива, когда малейший сбой в цепочке добыча – транспортировка – выработка энергии приводит к непредсказуемым социально-экономическим последствиям. Критическое состояние энергетики Приморского края обусловлено главным образом тем, что она основана на использовании угля, уровень добычи кото-

рого в крае снижается, а поставки из других регионов осложнены.

Гидроэнергетика не может быть использована для решения энергетической проблемы. Во-первых, гидроресурсы на Земле распределены неравномерно, во-вторых, строительство гидроэнергетических комплексов требует создания крупных водохранилищ, что приводит к затоплению обширных территорий, порой имеющих огромное значение для сельского хозяйства, и изменению гидрологического режима рек. Все это в конечном итоге приводит к негативным экологическим и экономическим последствиям.

Поэтому решение энергетической проблемы в глобальном масштабе без использования ядерной энергии невозможно. В настоящее время ядерная энергетика занимает прочное место в энергетическом балансе большинства экономически развитых стран. В тридцати двух странах 429 атомных энергоблоков производят 6 % вырабатываемой в мире энергии, а во Франции на долю атомных станций приходится около 80 % вырабатываемой энергии.

Почти полувековой опыт развития ядерной энергетики и эксплуатации атомного флота доказал ее высокие эколого-экономические показатели, надежность и эффективность, однако, обнажил ряд проблем, связанных с безопасностью населения. При нормальном режиме эксплуатации ядерного энергоисточника радиационная безопасность населения обеспечивается

техническими средствами, биологической защитой, герметизирующими барьерами. Однако в аварийных ситуациях технические средства и барьеры безопасности могут быть разрушены и происходит выброс радиоактивных веществ. Обеспечить радиационную безопасность населения в этом случае затруднительно. Это подтвердили тяжелые аварии, имевшие место на АЭС Тримайл-Айленд в США и Чернобыльской АЭС в СССР. Важно отметить, что тяжелые аварии могут произойти и в результате случайных внешних воздействий техногенного или природного характера, например, падения летательного аппарата, цунами, применения боевых средств.

Важнейшей задачей дальнейшего развития ядерной энергетики должно стать обеспечение безопасности населения при любых вариантах эксплуатации АЭС, включая аварийные ситуации. Второй главной задачей должно стать надежное обращение с радиоактивными отходами, отработавшим ядерным топливом и выработавшим ресурс оборудованием ядерных энергетических установок. Поэтому развитие атомной энергетики в XXI веке связано с освоением АЭС нового поколения.

Одной из таких перспективных станций является подземная атомная теплоэлектростанция (ПАТЭС) [1], проект которой создан Государственным научным центром России ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Этот проект полностью соответствует стратегическим планам развития энергетики России, которые включают в себя создание безопасных и комфортных условий жизни населения и обеспечение экологически безопасной среды обитания. Такая станция не является альтернативой для других атомных энергетических проектов, а ее специфика заключается в технических, экологических и экономических показателях, недоступных для иных проектов не только сегодня, но и в ближайшем будущем.

Ввиду географических особенностей России ее энергетический рынок является гораздо более теплоемким, чем рынки большинства экономически развитых стран

Западной Европы и США, не говоря уже о странах Юго-Восточной Азии. Отопительный сезон в большинстве регионов Севера, Сибири и Дальнего Востока продолжается более полугода.

Кроме того, энергоресурсы на территории России распределены крайне неравномерно, и их транспортировка требует колоссальных затрат.

Разница в плотности населения различных территорий приводит к нецелесообразности повсеместного развития централизованных энергосетей. В результате этого большая часть территорий имеет децентрализованное энергоснабжение, которое жестко зависит от поставок традиционного органического топлива, а из-за его низкого удельного теплосодержания (в $2 \cdot 10^6$ раз уступающего по этому показателю ядерному топливу) на этих территориях постоянно возникают проблемы энергоснабжения. Наглядный пример – ситуация минувшей зимой в Приморском крае.

Поэтому предлагаемый проект ПАТЭС особенно подходит для энергодефицитных регионов, где требуется обеспечить устойчивое теплоэлектроснабжение и экологическое благополучие, и идеален для анклавной Калининградской области, где электроэнергию приходится покупать за рубежом по мировым ценам (в основном в Литве от Игналинской АЭС), а теплоснабжение обеспечивать только за счет привозного топлива.

Типовой проект ПАТЭС [2] установленной мощности 300 МВт, созданный на базе судостроительных технологий, который предлагается ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, состоит из четырех унифицированных энергомодулей мощностью 75 МВт каждый. Энергомодули станции, созданные на базе апробированного оборудования корабельного типа, легко заменяемы и имеют небольшие габариты. Каждый энергомодуль размещается в герметичной штольне размерами (ширина – высота – длина) 12 x 16 x 100 м.

Штольни размещены в скальном побережье над уровнем моря с кровлей около 50 м (например, районы г. Снежногорск Мурманской области и г. Большой Камень

Приморского края) и строятся по технологиям тоннелестроения.

Номинальная электрическая мощность одного энерго модуля с номинальной теплофикационной нагрузкой 50 Гкал/час около 63 МВт. Число часов непрерывной работы составляет 8000 ч/год. Расчетный коэффициент установленной мощности равен 0,8. Срок службы энерго модуля 30 лет, срок службы штолен более 100 лет.

Сравнивая по установленной мощности ПАТЭС с другими энергоисточниками, отметим, что ее мощность 300 МВт, мощность крупнейшей в Европе Ленинградской АЭС с реакторами РБМК – 4000 МВт, мощность работающей на мазуте Киришской ГРЭС – 1800 МВт, мощность первого блока Северо-Западной ТЭЦ, работающей на газе, – 350 МВт.

Принятые конструктивные и технологические решения при проектировании ПАТЭС обосновывают ее привлекательность по многим причинам, а судостроительные технологии позволили решить многие актуальные проблемы ядерной энергетики.

Сжатые сроки строительства. При сооружении ПАТЭС возможно одновременное и независимое производство работ по строительству штолен и изготовлению, сборке и испытаниям оборудования энерго модулей в заводских условиях. Готовые «под ключ» энерго модули 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.

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

Маневренность. Использование водяных реакторов именно корабельного типа обеспечивает отслеживание мощности в диапазоне от 5 % до 100% номинальной мощности станции и допускает высокую

(до 1 %/с) скорость маневрирования по мощности, что позволяет легко адаптироваться к любому графику внешней нагрузки по электрической и тепловой энергии. Блоки же 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:

а) применением апробированных на практике материалов для всех узлов и элементов, применением для корпусов корабельных реакторов теплоустойчивой перлитной стали 15Х2МФА, двухслойной наплавки из коррозионностойкой стали внутри корпуса [3];

б) высоким уровнем автоматизации, открывающим реальную перспективу для безлюдной эксплуатации станции – это новый современный подход к решению проблемы надежной и безопасной эксплуатации АЭС;

в) широким использованием самосрабатывающих устройств для введения в действие систем безопасности;

г) резервированием элементов и систем безопасности, применением систем безопасности различного принципа действия;

д) использованием двойной запорной арматуры в системах, смежных с первым контуром (ГЦН и ВЦН).

Ядерные установки с реакторами корабельного типа после Чернобыля были повторно исследованы на надежность и безопасность и рекомендованы к использованию.

Ядерная безопасность. Конструктивные решения корабельных реакторов полностью исключают неконтролируемый разгон реактора, а благодаря отрицательному коэффициенту реактивности обеспечивается самогашение цепной 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 7–8 перегрузок, что значительно меньше, чем на стационарных АЭС. Надежная физическая защита ядерных материалов обеспечивается за счет их размещения в подземном пространстве.

Топливный цикл. Топливный цикл корабельных реакторов основан на использовании высокообогащенного ядерного топлива (обогащение по U^{235} до 99,9 %), то есть отсутствии в топливной композиции U^{238} . При эксплуатации водо-водяных реакторов обычных АЭС, работающих на низкообогащенном топливе (обогащение по U^{235} 2–4 %), происходит накопление высокофонового плутония ($Pu^{239,240,241,243}$) и трансплутониевых элементов ($Am^{241,243}$ и $Cm^{242,244}$), а также изотопов Np^{237} и $U^{233,234,236}$ [4], что является серьезной и трудноразрешимой проблемой ядерной энергетики. Так, при производстве 1 ГВт электроэнергии на традиционных АЭС в год образуется: $Pu^{239,240,241,243}$ – 200 кг, $Am^{241,243}$ – 3,75 кг, $Cm^{242,244}$ – 0,98 кг и Np^{237} – 11,25 кг. В корабельных реакторах, использующих высокообогащенное топливо, кроме уже упоминавшегося отрицательного коэффициента реактивности не происходит наработки плутония и трансплутониевых элементов, поэтому количество радиоактивных отходов в 35 раз меньше. Кроме того, Pu^{239} является оружейным материалом, и невозможность его воспроизводства позволяет создавать атомные станции с корабельными реакторами в любых странах без угрозы распространения ядерного оружия и оружейных ядерных материалов.

Радиационная безопасность Полный цикл обращения с радиоактивными материалами в подземном пространстве, наличие защитных барьеров между радиационноопасными источниками и природной средой обеспечивает радиационную безопасность при эксплуатации ПАТЭС. При снятии ПАТЭС с эксплуатации энергомодуль выкатывается из штольни, выведенная из эксплуатации реакторная установка после выгрузки облученного ядерного топлива закатывается вглубь штольни для длитель-

ного хранения, а остальное нерадиоактивное оборудование отправляется на судоремонтный завод на переработку. Поэтому не требуется организации специальных мест хранения огромного количества радиоактивных материалов, выведенных из эксплуатации реакторных установок традиционных АЭС. Таким образом, решается одна из главных задач обеспечения безопасности ядерной энергетики – надежное обращение с радиоактивными отходами и выведенными из эксплуатации реакторными установками.

Сейсмоустойчивость Сейсмостойкость ПАТЭС обеспечивается применением ударо- и вибростойкого оборудования, широко используемым в атомном кораблестроении и показавшим себя только с хорошей стороны, поэтому ПАТЭС можно размещать практически в любом регионе планеты.

Пожаробезопасность Пожары на ядерно- и радиационноопасных объектах, каковыми являются АЭС, приводят к катастрофам мирового масштаба. Пожары, имевшие место на АПЛ, явились причиной не только гибели личного состава, но и самих АПЛ, как, например, «Комсомолец» и К-219. 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 %), что невозможно для крупногабаритных и негерметичных помещений стационарных АЭС.

Защищенность от внешних техногенных и природных воздействий Серьезной угрозой для безопасности современных АЭС является применение обычных боеприпасов в случае военного конфликта или террористических актов. Недостаточно эффективная защита существующих АЭС от диверсий и терроризма очевидна. ПАТЭС благодаря подземному размещению надежно защищена не только от высокогочного реактивного оружия, но и от взрыва боеприпаса большой мощности или бетоно-

бойного заряда. Даже в случае гипотетического проникновения террористов во внутреннее помещение, где размещены энергомодули ПАТЭС, последствия террористического акта локализуются в подземном пространстве. Слабой стороной существующих АЭС является и их полная незащищенность от падения тяжелых самолетов типа «Боинг – 747». Известно, что в мире практически еженедельно происходят авиакатастрофы с тяжелыми транспортными или пассажирскими самолетами, и падение такого летательного объекта на блок обычной АЭС приведет к глобальной катастрофе. Размещенная в земных недрах ПАТЭС полностью защищена от падения тяжелых самолетов, а также и от природных воздействий, например, падения метеорита, цунами и др. Факторы, влияющие на безопасность различных видов АЭС, приведены в табл. 1.

Таблица 1

События, важные для безопасности АЭС

№ п/п	Событие	ПАТЭС	ПЛАЭС	Паземная АЭС
1	Падение тяжелого летательного аппарата	-	+	+
2	Внешнее затопление	+	+	+
3	Штормовые волны (цунами)	-	+	+
4	Экстремальная скорость ветра (торнада)	-	+	+
5	Пожар на станции	+	+	+
6	Пожар на территории станции	-	+	+
7	Внутреннее 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 токсических газов	+	+	+
16	Воздействие на ЯЭУ осколков при аварии турбины	-	+	+
17	Оползень	+	+	+
18	Навал льда	-	+	-
19	Навигационная авария	-	+	-
20	Применение легкого реактивного оружия	-	+	+
21	Применение фуласных или бетонобойных бомб	-	+	+
22	Диверсия, терроризм	-	+	+

Примечание: + - учитываемые проектные воздействия.

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

Параметры безопасности ПАТЭС (4-й уровень шкалы NES) 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 потребителями означает резкое снижение теплового сброса в окружающую среду, как это имеет место на обычных АЭС, что сохраняет природный баланс.

Размещение ПАТЭС вблизи пунктов-потребителей значительно снижает затраты на строительство протяженных ЛЭП, как в случае обычных АЭС, расположенных в десятках и сотнях километров от потребителей. Малая протяженность ЛЭП резко снижает и потери электроэнергии в проводах. Кроме того, отсутствие протяженных высоковольтных ЛЭП положительно влияет и на экологическую безопасность окружающей среды, так как не создает мощных наведенных электромагнитных полей и сохраняет природный ландшафт.

Санитарная зона ПАТЭС ограничена только охранной территорией, а поскольку она размещена под землей, то для строительства штолен можно использовать природные неудобья, что уменьшает для нее землеотвод и, соответственно, оплату землепользования по сравнению с традиционными АЭС, которые занимают со своей инфраструктурой, ремонтными цехами, прудами-охладителями, хранилищами свежего и отработавшего ядерного топлива и т.д. несколько сотен гектаров.

Размещение ПАТЭС вблизи населенных пунктов означает и отсутствие необходимости затрат на строительство города-спутника с развитой инфраструктурой для проживания эксплуатационного персонала.

Известно, что затраты на строительство таких городов для эксплуатационников, как Сосновый Бор, Полярные Зори и другие сопоставимы с затратами на строительство самой АЭС.

Штольни многократно используются для размещения новых энергомодулей после окончания срока службы выработавших свой ресурс. При снятии ПАТЭС с эксплуатации, как уже упоминалось, энергомодуль разделяется по корабельной технологии, реакторная установка после выгрузки облученного ядерного топлива закатывается в глубь штольни для длительного хранения. Согласно оценкам, стоимость снятия с эксплуатации одного блока ПАТЭС составляет около \$ 300 000 (менее 1 % первоначальной стоимости) [5]. Тогда как в традиционных АЭС по окончании срока службы требуется полностью разрушить строительные конструкции, хранить и утилизировать огромное количество радиоактивных материалов, что требует колоссальных затрат. По оценкам, при снятии с эксплуатации блока РБМК-1000 образуется более 100 000 тонн радио-

активных отходов активностью 105 ТБк, а стоимость снятия с эксплуатации составляет около \$ 290 млн. Для доведения территории, выведенной из эксплуатации АЭС, до «зеленой лужайки» потребуется более 100 лет и, соответственно, из оборота на такой длительный срок выводятся огромные территории.

Предлагаемый проект ПАТЭС показывает, что ядерная энергетика характеризуется как стабильный источник энергии, экономически и экологически более выгодный по сравнению с тепловыми и гидроэлектростанциями, а по экономическим показателям, как видно из табл. 2, превосходит и другие виды АЭС. Благодаря принятым конструктивным предложениям решается важнейшая задача ядерной энергетики – обеспечивается безопасность проживающего вблизи населения. Особое внимание уделено и архитектуре станции, то есть при ее создании будут решены все теоретические и прикладные вопросы конструирования, изготовления и последующей эксплуатации.

Таблица 2

Технико-экономические показатели различных видов АЭС [2, 5, 6]

№	Наименование показателей	ПАТЭС	ПлАЭС	АЭС (ВВЭР)
1	Установленная мощность, МВт	300	70	1000
2	Коэффициент использования установленной мощности	0,82	0,82	0,75
3	Расход электроэнергии на собственные нужды, %	1,7	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 электроэнергии, цент/кВт.ч	0,69	12	3,24

Ядерная энергетика – беспрецедентный шаг в научно-техническом развитии – одновременно требует и адекватного повышения технологической дисциплины, филигранного инженерного конструирования, неукоснительного исполнения эксплуатационной документации, высочайшей культуры технического мышления. Специфика условий работы конструкционных материалов в составе основных блоков и узлов ядерных энергетических установок требует специального подхода к созданию конструкционных материалов и технологий их изготовления. Имея в виду работоспособность и надежность именно корабельных ядерных энергетических установок, а также созданные конструкционные материалы для их основных узлов и элементов, такие как перлитные стали марок 15Х2МФА и 15Х2МФАА, которые являются лучшими теплоустойчивыми материалами для корпусов водо-водяных реакторов, и коррозионностойкие аустенитные стали марки 06Х18Н10Т и др., применяемые для трубопроводов ядерных энергетических установок, можно считать эти установки наиболее надежными и безопасными, а соз-

данные с их использованием ПАТЭС – основной энергетикой начала XXI века.

Библиографический список

1. Петров Э. Л. Подход к решению проблемы атомных станций // Шленов А.Г. Микромир. Вселенная. Жизнь. – СПб.: Ольга, 1998. – С. 173–193.
2. Строительство подземной атомной теплоэлектростанции (ПАТЭС) “Нерпа” в Мурманской области / ЦНИИ им акад. А.Н. Крылова. – СПб., 2000.
3. Радиационная повреждаемость конструкционных материалов / А.М. Паршин, А.Н. Тихонов, Г.Г. Бондаренко и др.; Под ред. А.М. Паршина и А.Н. Тихонова – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. – 296 с.
4. Домашев Е.Д. О возможности развития атомной энергетикой на Украине // Промышленная теплотехника –1998. – Т. 20. – № 3.
5. Радиационная безопасность и обращение с радиоактивными отходами при выводе из эксплуатации ПАТЭС / Э.Л. Петров, В.М. Паршин, О.Э. Муратов, В.И. Бурак // Радиационная безопасность: Тр. III-ей Международной конф. – СПб, 2000.
6. Плавучие АЭС России: угроза Арктике, мировому океану и режиму нераспространения / В. М. Кузнецов и др. – Рязань. Сервис, 2000.