УДК 621.039

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЧИСТОТЫ ОБЪЕКТОВ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

Одним из радикальных направлений повышения безопасности и экологической чистоты объектов АЭС является использование подземного пространства для их размещения. Опыт эксплуатации подземных атомных станций (ПАС) показал высокую их безопасность, надежность защиты реактора, технологического оборудования и окружающей среды. Безопасность ПАС обеспечивается прочностью и плотностью горного массива, герметичностью реакторной выработки и созданием системы сбора и удаления газов через обделку и системы дренажа. Для снижения длительного теплового воздействия от высоких температур при аварии на стены реакторной выработки предусматривается создание водяной оросительной системы. При наличии аварийного давления в реакторной выработке парогазовая смесь будет проходить через породы массива и, вследствие низкой его температуры, будет происходить конденсация пара и снижение скорости распространения его фронта. Количественная оценка систем безопасности показывает, что наиболее высокий уровень имеют ПАС с двойной оболочкой и ПАС со сбросом давления. Одним из недостатков ПАС является увеличение продолжительности и стоимости строительства станций. По разным оценкам, удорожание строительства ПАС относительно строительства наземной АЭС составляет 15-25 %, срок строительства увеличивается на 1,5-2,5 года. Эффективным путем снижения затрат на строительство ПАС является комбинация ПАС с могильником для захоронения радиоактивных отходов (РАО), приспособленным для переработки и хранения отходов от эксплуатации ПАС и поступающих с других предприятий региона.

One of the drastic measures to increase environmental safety and safety in operation of nuclear power plants is to use underground space for their location. Operating experience of underground nuclear power plants (UNPP) has shown high levels of their safety and reliability of the reactor and processing equipment as well as environmental protection. The rise in UNPP safety is secured by the rock massif strength, its insignificant penetration properties, reactor opening impermeability and system of gas gathering and outgassing through lining and drainage. To reduce long-term exposure of the walls of the reactor opening to high temperatures in case of a failure, a water sprinkling system is provided. In case of an emergency pressure increase in the reactor opening, the gas-vapour mixture will pass through the rack massif and, due to its low temperature, gas condensation will occur and the wave front propagation will decrease in speed. Quantitative assessment of security arrangement demonstrates that the highest level of security is achieved at UNPPs with double casing and UNPPs with pressure release. One of the drawbacks of UNPPs is increase in their cost and construction time. According to different evaluations, the difference in construction cost and construction time are estimated to equal 15-25 % and 1,5-2,5 years respectively as compared to a land-based NPP An effective way of reducing construction costs for UNPP is to combine it with burial grounds for radioactive waste, that are adopted for recycling and storing waste both produced by the UNPP and brought from other nuclear enterprises of the region.

* * *

Решение энергетических и экологических проблем в XXI в. в значительной степени обусловлено созданием и развитием безопасных атомных электростанций (АЭС). Однако в последнее десятилетие в связи с Чернобыльской катастрофой, а также аварией на АЭС «Три-Майл-Айленд» в США и аварийными ситуациями на других атомных станциях наблюдается снижение темпов развития ядерной энергетики. После этих аварий во всех странах была проведена работа по снижению риска аварий с выбросом радиоактивности, повышению безопасности существующих АЭС и созданию новых поколений АЭС.

Одним из радикальных направлений повышения безопасности и экологической чистоты объектов АЭС является использование для их размещения подземного пространства. Наиболее обстоятельные исследования, посвященные проблемам создания подземных атомных станций, проведены в работах [1, 3].

Первая в мире подземная атомная станция (ПАС) была построена в России в 50-60-е гг. прошлого века и проработала без аварий 35 лет. В 1960 г. в Норвегии была введена в эксплуатацию экспериментальная ПАС «Халден» с тяжеловодным кипящим реактором тепловой мощностью 20-25 МВт. В 1964 г. в Швеции была построена ПАС «Агеста» мощностью 60 МВт тепловой энергии. В 1967 г. во Франции начала работать ПАС «Чуз» с мощностью 275 МВт электрической энергии.

Опыт эксплуатации ПАС показал высокую их безопасность, надежность защиты реактора, технологического оборудования и окружающей среды [4, 5].

Подземное размещение АЭС имеет следующие неоспоримые преимущества:

- позволяет создать качественно новый уровень безопасности, обеспечивая локализацию последствий любых внутренних аварий за счет свойств горного массива и существенного снижения выхода радиоактивности в окружающую среду;
- повышает надежность АЭС, поскольку горный массив может выдержать значительные динамические нагрузки и тепловое воздействие при гипотетических авариях, не разрушаясь;
- защищает АЭС от любых внешних воздействий (природных, техногенных, диверсионных);
- существенно снижает нагрузки на сооружения при сейсмических воздействиях от землетрясений;
- сводит к минимуму уровни опасных выбросов радиоактивных веществ в атмосферу при любой аварии;
- упрощает и удешевляет снятие с эксплуатации и захоронение ядерной энергетической установки (ЯЭУ), радиоактивного оборудования и материалов после исчерпания ресурса или аварии;
- позволяет в специальных примыкающих горных выработках перерабатывать низко- и среднеактивные отходы, а также использовать эти выработки для хранения и захоронения радиоактивных отходов;
- исключает последствия даже наиболее опасных аварий, поэтому ПАС можно располагать в непосредственной близости от потребителей, например в подземном пространстве мегаполисов.

По месту расположения станции в подземном пространстве различают ПАС котлованного, шахтного и комбинированного типов. При шахтном типе основными выработками, связывающими станции с поверхностью, могут быть вертикальные и наклонные стволы и штольни в гористой местности. При расположении станций на земной поверхности для их защиты могут быть созданы искусственные сооружения из грунта или скальной породы, по форме напоминающие терриконы пустой породы на угольных шахтах.

Основы концепции повышения безопасности атомных станций путем их подземного размещения рассмотрены в работах [1, 3]. Показано, что наиболее рациональным является совместное расположение в подземном пространстве ядерной энергетической установки АЭС и могильника для захоронения радиоактивных отходов с многобарьерной системой изоляции и защиты станции окружающим массивом и искусственными инженерными преградами и сооружениями.

Надежность нераспространения РАО из зоны захоронения при многобарьерной защите обеспечивается переработкой отходов (их отверждение и упаковка), инженерными барьерами и самой геологической средой – массивом горных пород.

Для строительства ПАС разработан ряд проектов в США, Канаде, ФРГ, Швейцарии, Норвегии, Швеции, Японии и других странах [1, 3, 4], где использованы станции котлованного и шахтного типов.

Глубина заложения выработок при котлованном типе ПАС изменяется от 8 до 30 м, при шахтном – от 20 до 400 м. В первом случае после строительства выработок возможна засыпка котлована породой. Толщина слоя

грунтовой засыпки определяется требованиями защиты станции от внешних воздействий; компенсации давления в реакторной выработке весом грунта; нераспространения радионуклидов через грунтовый массив.

Реакторная выработка имеет пролет от 30 до 60 м и высоту до 90 м. Для крепления реакторных выработок используется бетон и железобетон. Все проекты ПАС имеют полную защищенность от внешних воздействий, в том числе вызванных военными действиями. Повышение безопасности ПАС обеспечивается прочностью горного массива, незначительными его фильтрационными свойствами, герметичностью реакторной выработки и созданием системы сбора и удаления газов через обделку и системы дренажа. Для снижения длительного теплового воздействия на стены реакторной выработки высоких температур при аварии предусматривается создание водяной оросительной системы. При аварийном давлении в реакторной выработке парогазовая смесь будет проходить через породы массива, где вследствие низкой его температуры пар будет конденсироваться, а скорость распространения его фронта снижаться.

Для повышения безопасности ПАС в ряде проектов предусматриваются системы сброса давления при возможных авариях из реакторной выработки в компенсационную, которая заполняется дробленой породой. Реакторная выработка может иметь толщину бетонной крепи до 1 м и стальную облицовку.

Количественная оценка систем защиты безопасности ПАС выполнена только в швейцарском проекте. Для сравнения приняты следующие системы безопасности:

- стандартная наземная оболочка;
- двойная вентилируемая наземная защитная оболочка;
- подземная защитная оболочка;
- подземная защитная оболочка со сбросом давления в пористую горную породу;
- двойная защитная подземная оболочка.

В качестве критерия для сравнительной оценки систем принято количество смертельных случаев в год при гипотетической аварии, пропорциональное величине радиоактивного выброса:

Система безопасности	Число смертельных случаев в год
Стандартная наземная оболочка	$2{,}9 \cdot 10^{-6}$
Двойная защитная оболочка	$9{,}8\ \ 10^{-8}$
Подземная защитная оболочка	$4{,}4\ \ 10^{-}$
Подземная оболочка со сбросом давления	$3{,}3\ \ 10^{-8}$
Двойная защитная подземная оболочка	$2{,}6\ \ 10^{-10}$

Из этих данных следует, что наиболее высокий уровень безопасности имеют ПАС с двойной оболочкой и ПАС со сбросом давления. Подземная АЭС со сбросом давления примерно в 100 раз, а подземная АЭС с двойной защитной оболочкой более чем в 10000 раз снижают выброс радиоактивности при гипотетической аварии по сравнению со стандартной наземной АЭС.

Принципиальная схема безопасной ПАС приведена в работе [3]: ПАС с реакторной выработкой и системами безопасности, состоящими из компенсационной выработки с гравийным фильтром, конденсационного бассейна и системы сбора утечек и очистки газов, размещается в подземном пространстве, а с поверхностью соединяется вентиляционным стволом. Схема станции Горного института КНЦ РАН дополнена технологическим комплексом переработки РАО и могильником, турбогенератором и блоком управления, которые располагаются в подземном пространстве [1].

По нашему мнению, проект компоновки подземных сооружений комплекса полезно теснее увязывать с предполагаемой технологической схемой строительства объекта. Самым сложным является создание

камеры реакторов с расположенными под ними заглубленными «магазинами» для захоронения отработавших свой срок реакторов. Такой комплекс требует, по меньшей мере, трех строительных подходов: на уровне свода камеры, с основного горизонта и на отметке обратного свода «магазина». В проекте [1] камера реактора вскрыта только со стороны выработки для турбогенератора. Строительство камеры при такой схеме затянется, так как для заглубленных выработок (слепого ствола, «магазина») не найдены производительные способы ведения горно-строительных работ. Соответственно, задержится начало монтажа реактора.

В этой связи выглядит неубедительной внешне эффектная идея захоронения отработавшего реактора на месте путем его опускания в «магазин». Помимо очевидных сложностей при строительстве и затрат времени на консервацию реактора, не исключен элемент риска в реализации идеи опускания реактора, что недопустимо для таких ответственных объектов. Имеет смысл еще раз вернуться к варианту захоронения отработавшего реактора на месте путем консервации всей камеры вместе с реактором. В этом случае для поддержания мощности станции к моменту вывода каждого реактора из эксплуатации должен быть подготовлен новый блок с реактором и турбогенератором. Таким способом можно увеличивать и мощность ПАС.

Строительные подходы к сводам камер реактора могут использоваться затем как компенсационные и охлаждающие полости на случай гипотетической аварии.

В проектах ПАС должны тщательно обосновываться вид, количество, размеры поперечного сечения и схемы размещения выработок, служащих для связи с поверхностью. Например, для скорейшего развития фронта горных работ целесообразно вскрывать основной горизонт двумя (грузовым и порожняковым) автоуклонами, проходка которых не требует длительной подготовки. Один из вертикальных стволов должен быть определен под спуск крупногабаритного оборудования. Для этого диаметр ствола надо увеличить до 8 м и оснастить его грузовой платформой, тихоходными подъемными лебедками и канатными направляющими. Сечения выработок от ствола до реакторной камеры должны быть согласованы с габаритами монтажных блоков технологического оборудования. Диаметр вспомогательных стволов лучше увеличить до 6 м, что соответствует возможностям типового стволопроходческого комплекса КС-2у.

С целью снижения стоимости строительства ПАС в подземном пространстве можно расположить только объекты станции, представляющие радиационную опасность: реакторную выработку с системами безопасности, технологический комплекс и хранилище РАО. Все остальные объекты станции можно размещать на поверхности. Для длительного охлаждения массива при возможных авариях вокруг реакторной выработки предусматривается система охлаждения.

Одним из недостатков ПАС является увеличение продолжительности и стоимости строительства станций. Сопоставление затрат на наземное (в числителе) и подземное (в знаменателе) строительство по проектам Норвегии и Швейцарии дало следующие результаты, % [3]:

Подготовка площадки и горно-строительные работы	6,5/11,7
Здания	11,4/12,8
Теплотехническое оборудование	24,2/25,4
Электротехническое оборудование	10,2/12,1
Вспомогательные системы	17,5/19,7
Административные и лицензионные расходы	6,0/7,2
Проценты на капитал (10 % в год)	24,0/43,7
Всего	100,0/123,0

Примечание. Для наземной АС не учтены затраты, связанные с выводом ее из эксплуатации.

Стоимость строительства подземной АЭС, по сравнению с наземной, на 23 % больше. Основное удорожание связано с горно-проходческими работами и увеличением срока строительства станций.

Согласно оценкам японских специалистов, затраты на строительство наземных и

подземных атомных станций различаются незначительно. Технико-экономическое сопоставление вариантов наземного и подземного размещения станций с четырьмя блоками с реактором ВВЭР-1000 (У-87) проведено Горным институтом Кольского научного центра РАН с участием проектных организаций [3]. Относительная стоимость вывода наземной станции из эксплуатации, по зарубежным данным, принята равной 20 %, а подземной – 2 %.

Подземное размещение АЭС, по сравнению с наземным, приводит к удорожанию строительства на 11,1-15,2 %. С учетом стоимости вывода станции из эксплуатации затраты на наземное и подземное строительство АС будут сопоставимыми:

Станция	Наземная	Подземная
Общая стоимость строительства АЭС, млн руб.	1645,8	1896,6/1828,2
Удорожание строительства по сравнению с базовым вариантом, млн руб.		15,2/11,1
Стоимость вывода из эксплуатации, млн. руб.	329,2	37,9/36,6
Общая стоимость строительства АС с учетом вывода станции из эксплуатации, млн руб.	1975,0	1934,5/1864,8

Примечание. В числителе и знаменателе – по расценкам Гидроспецпроекта и Союзгидроспецпроекта соответственно.

Итак, по разным оценкам удорожание строительства ПАС относительно строительства наземной АЭС составляет до 15-25 %, срок строительства увеличивается на 1,5-2,5 года. Эффективным путем снижения затрат на строительство ПАС является комбинация ПАС с могильником для захоронения РАО, приспособленным для переработки и хранения отходов от эксплуатации ПАС и отходов, поступающих с других предприятий региона. Такой комплекс экономичнее, чем сооружение ПАС и хранилища в виде отдельных объектов. Сократятся затраты на геологическую и гидрогеологическую разведку, подготовку к строительству, на наземные сооружения. Широкий фронт работ позволит оптимизировать календарные графики строительства, повысить эффективность использования горнопроходческого оборудования и трудовых ресурсов, снизить удельные эксплуатационные расходы. С вводом мощностей по переработке РАО начнут окупаться средства, вложенные в строительство комплекса, за счет приема РАО со стороны.

Накопленные мировой и отечественной наукой наработки, опыт строительства и эксплуатации ПАС подтверждают, что будущее атомной энергетики за подземным размещением АЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Котенко Е.А.* Создание подземных атомных станций / АГИ. М., 1996.

2. *Котенко Е.А.* Научно-технические основы геоэкологического обеспечения радиационной безопасности ядерных энергокомплексов // Горный вестник. 1996. № 2.

3. *Мельников Н.Н.* Подземные атомные станции / Н.Н.Мельников, В.П.Конухин, В.А.Наумов / Горный ин-т КНЦ РАН. Апатиты, 1991.

4. *Мостков В.М.* Проектирование и строительство подземных атомных электростанций: Обзор / В.М.Мостков, А.П.Кириллов, Ю.Б.Николаев, В.Г.Богопольский / Информэнерго. М., 1985.

5. *Шищиц И.Ю.* Основы инженерной георадиоэкологии / М.: Изд-во МГГУ, 1998.