

УДК 621.039

МАЛЫЕ АЭС НА БАЗЕ КОРАБЕЛЬНЫХ ЯЭУ

Уласевич В.К. (НИКИЭТ)

Использование в народнохозяйственных целях технологии корабельных ЯЭУ с их большим опытом эксплуатации в последние годы стало предметом активных публикаций и обсуждений. В условиях значительного удорожания как самого органического топлива, так и его транспортировки, особенно в удаленные и труднодоступные районы Севера и Востока страны, на смену волне послечернобыльского неприятия ядерной энергетики постепенно приходит осознание преимуществ столь энергоемкого топлива, каким является ядерное. Немаловажным является и формирующееся понимание экологических преимуществ АЭС для уязвимой и почти не восстанавливаемой северной природы.

Настоящая статья представляет собой обзор выполненных в 1991—1994 гг. в НИКИЭТе разработок в этой области ядерной энергетики. В основу положены результаты проведенных ранее и ведущихся в настоящее время исследований, которыми установлено, что сложившаяся на основной части территории упомянутых районов России промышленная и социальная структура, неразвитость транспортных и энергетических связей в них обуславливают большую потребность в атомных энергоисточниках малой (в основном до 30 МВт) тепловой мощности с выработкой, как правило, и электрической, и тепловой энергии. Если в качестве таких источников рассматривать мини-АЭС, то специфика сооружения и эксплуатации определяет очевидные основные свойства, которыми должны обладать как сами станции, так и их ЯЭУ:

- максимум заводской готовности всех блоков АЭС и минимум строительно-монтажных работ на месте размещения;

- транспортабельность блоков для труднодоступных районов как при доставке, так и удалении после окончания эксплуатации станции;

- высокие маневренные характеристики ЯЭУ и полная автоматизация процесса работы при минимуме квалифицированного обслуживающего персонала;

- возможность эксплуатации АЭС в маловодных (или безводных) районах, в том числе при больших сезонных перепадах температуры окружающего воздуха;

- длительная работа станции без замены ядерного топлива;

- экономическая выгода использования ядерного топлива по сравнению с традиционным.

Естественно, наличие у АЭС перечисленных свойств должно сопровождаться обеспечением всех аспектов ее безопасности по имеющимся и постоянно совершенствующимся нормативам.

Длительный опыт работы НИКИЭТа в области корабельной ядерной энергетики, последовательно развиваемые специалистами института в ходе этих работ принципы повышения автономности и уровня безопасности установок и особенно степени их интегральности, реализовавшиеся в последние годы в проектах ЯЭУ с моноблочными парогенерирующими агрегатами, дают возможность совместно с многолетним партнером АО «Калужский турбинный завод» предложить некоторые из них как основу для АЭС малой мощности в диапазоне от 0,5 до 12 МВт(эл.).

Как видно из таблицы, предлагаемые АЭС могут быть созданы на базе ЯЭУ, либо имеющих прототипы с продолжительным опытом эксплуатации, либо спроектированных с использованием отработанных на практике технических решений. Это позволяет обойтись минимальным объемом опытно-конструкторских работ и в результате сократить стоимость и сроки создания головной станции.

Основные потребительские качества АЭС на базе корабельных ЯЭУ

Характеристика	Условное название АЭС			
	«Крот»	«Кедр»	«УниTERM»	«Шельф-3»
Наработка прототипа ЯЭУ, лет	15	10	Основные технические решения проверены практикой создания и эксплуатации транспортных установок малой мощности	
Электрическая мощность, МВт	До 1	До 2	До 6,5	До 12
Производство тепла, Гкал/ч	До 3	До 5	До 7,5	До 15
Число реакторов	2	1	1	1
Срок службы без перегрузки активной зоны, год	8	10	20	20
Число защитных барьеров на пути распространения радиоактивных веществ	4	4	5	5
Вид охлаждения конденсаторов турбогенераторной установки и систем безопасности	Воздушное. Использование местных источников воды не требуется			
Сейсмостойкость	8 баллов по шкале MSK-64. Защита от выхода радиоактивных веществ в окружающую среду обеспечена при 9 баллах			
Обслуживание реакторной установки при эксплуатации	Не требуется. Планово-предупредительное обслуживание осуществляется выездной бригадой один раз в год в течение двух недель			
Обслуживание турбогенераторной установки при эксплуатации	Не требуется. Планово-предупредительное обслуживание осуществляется выездной бригадой один раз в год в течение двух недель		Требуется. Персонал работает вне зоны облучения (категория Б). Исключено попадание радионуклидов в турбогенераторную установку за счет трехконтурной схемы АЭС	
Число транспортируемых блоков и их масса с учетом транспортных платформ	10, 80 т	4, 50—150 т	15, 100—180 т	3, 250—600 т

Указанные в таблице станции близки по облику, схемным и компоновочным решениям, а также подходам к безопасности. Полезно рассмотреть их на примере АЭС «УниTERM» электрической мощностью от 1,5 до 6,5 МВт. При необходимости ее использования не только для электро-, но и теплоснабжения отбор тепла может составлять 20—30% номинальной тепловой мощности.

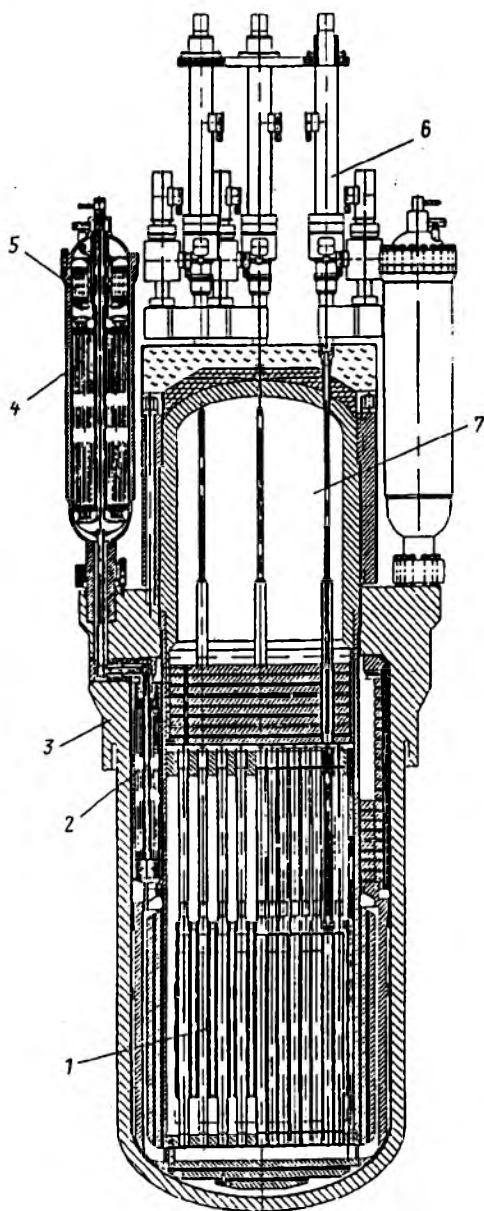
Источником тепловой энергии АЭС «УниTERM» является моноблочный ядерный парогенерирующий агрегат (рис. 1), объединяющий в одном корпусе основные элементы системы первого контура — активную зону, парогенератор, компенсатор объема, органы регулирования и аварийной защиты. Кроме того, конструктивно объединены с агрегатом и теплообменники, передающие тепло из первого в промежуточный контур. Это позволяет почти полностью исключить из состава ЯЭУ трубопроводы этих контуров и достичь предельно компактного размещения источников ионизирующего излучения и потенциально опасной рабочей среды — теплоносителя первого контура. Конструктивное исполнение парогенерирующего агрегата обеспечивает охлаждение активной зоны и передачу тепла в парогенератор за счет естественной конвекции теплоносителя первого контура, что позволяет не вводить в состав оборудования средства,

необходимые для создания принудительной циркуляции. Такой подход к проектированию основного элемента АЭС — ядерного реактора обусловлен стремлением к достижению его предельной надежности и простоты конструкции за счет исключения активных элементов с постоянно движущимися механическими частями. Единственными подвижными элементами в составе парогенерирующего агрегата являются группы рабочих органов СУЗ с их приводами, выполняющих функции аварийной защиты и компенсации изменения реактивности. Эти элементы перемещаются один раз за период непрерывной работы АЭС при пуске парогенерирующего агрегата в условиях нормальной эксплуатации. В случае возникновения аварийных ситуаций возможно срабатывание органов СУЗ, выполняющих функции аварийной защиты.

Теплогидравлическая схема АЭС «Уни-терм» (рис. 2) предусматривает использование трех взаимосвязанных технологических контуров, в последнем из которых размещены все потребители тепловой энергии (турбогенераторная установка или потребители тепла).

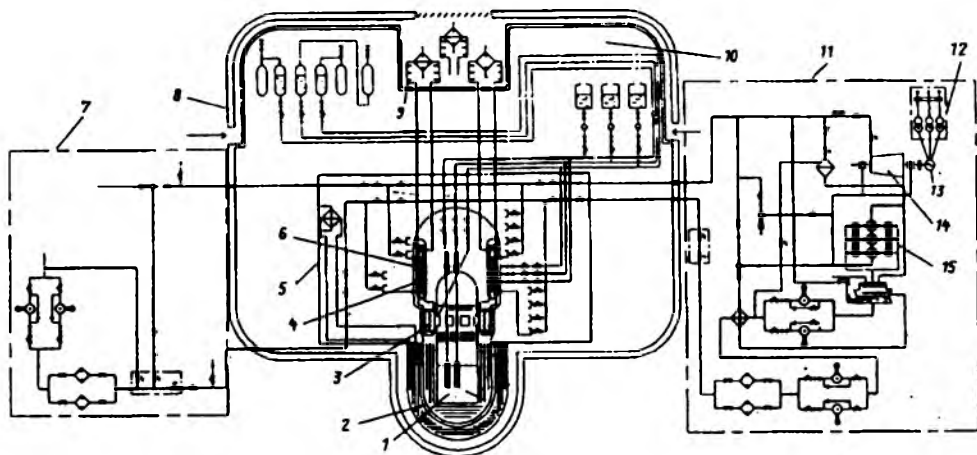
Тепловая энергия первого контура передается промежуточному контуру и контуру аварийного расхолаживания при фазовых переходах теплоносителей, что уменьшает их потребный расход и увеличивает движущий напор естественной циркуляции.

Технологические параметры теплоносителя первого контура выбирались из надежно освоенного диапазона рабочего давления и температуры, характерного для первого контура АЭС с водоохлаждаемыми реакторами, а также опыта эксплуатации транспортных ЯЭУ в режимах работы при естественной циркуляции теплоносителя. Кроме того, учитывались пределы изменения параметров теплоносителя в период работы активной зоны без компенсации ее реактивности с помощью перемещения органов регулирования. На выбор рабочей температуры и давления теплоносителей в промежуточном контуре и контуре паротурбинной установки оказали существенное влияние условия, связанные с необходимостью получения присланных значений к.п.д. установки, и ориентация на использование опыта создания и эксплуатации паротурбинных установок, которые можно рассматривать как действующие прототипы. Анализ теплотехнических характеристик паротурбинных установок подобного типа позволил выбрать с учетом изложенных соображений параметры теплоносителя в технологическом контуре потребителей тепловой энергии, а стремление рационально распределить перепад температуры теплоносителей первого контура и контура потребителей тепловой энергии обусловило па-



Р и с. 1. Моноблочный парогенерирующий агрегат: 1 — активная зона; 2 — парогенератор; 3 — корпус; 4 — теплообменник промежуточного контура; 5 — теплообменник аварийного расхолаживания; 6 — исполнительный механизм СУЗ; 7 — компенсатор объема

ротурбинной установки оказали существенное влияние условия, связанные с необходимостью получения присланных значений к.п.д. установки, и ориентация на использование опыта создания и эксплуатации паротурбинных установок, которые можно рассматривать как действующие прототипы. Анализ теплотехнических характеристик паротурбинных установок подобного типа позволил выбрать с учетом изложенных соображений параметры теплоносителя в технологическом контуре потребителей тепловой энергии, а стремление рационально распределить перепад температуры теплоносителей первого контура и контура потребителей тепловой энергии обусловило па-



Р и с. 2. Принципиальная схема АЭС «Универм»: 1 — активная зона; 2 — моноблочный парогенерирующий агрегат; 3 — парогенератор; 4 — теплообменник промежуточного контура; 5 — защитная оболочка; 6 — страховочный корпус; 7 — оборудование системы теплоснабжения; 8 — противоударная защита; 9 — воздухоохлаждаемый теплообменник системы аварийного расхолаживания; 10 — реакторная установка; 11 — турбогенераторная установка; 12 — трансформаторы; 13 — электрогенератор; 14 — паровая турбина; 15 — воздухоохлаждаемый конденсатор турбины

параметры теплоносителя промежуточного контура. На основе перечисленных соображений и расчетных исследований определены параметры теплоносителей в технологических контурах АЭС «Универм»:

Теплоноситель первого контура (вода высокой чистоты с показателями качества теплоносителя первого контура АЭС):

давление, МПа

16—16,5

температура на входе/выходе в активную зону, °С

245—225/325—305

Теплоноситель промежуточного контура (вода с показателями качества теплоносителя второго контура АЭС):

давление, МПа

2,4

температура, °С

220

Теплоноситель контура потребителей тепловой энергии (вода с показателями качества теплоносителя второго контура АЭС):

давление, МПа

1—1,2

температура пара/питательной воды, °С

207—210/45—60

Необходимо отметить, что сравнительно высокий энергетический потенциал теплоносителя контура потребителей АЭС «Универм» позволяет использовать теплоноситель не только в бытовых, но и при необходимости в технических целях.

При выборе характеристик и структуры активной зоны и органов ее регулирования в качестве приоритетных были приняты следующие положения:

максимально возможное снижение оперативного запаса реактивности и, в частности, доли общей эффективности рабочих органов СУЗ, приходящейся на одну группу органов, перемещаемых индивидуальными приводами;

обеспечение оптимальных для безопасности коэффициентов обратных связей по мощности, температуре теплоносителя и топлива;

реализация в проекте удельной энергонапряженности, гарантированно обеспечивающей принятую длительность работы активной зоны без разгерметизации оболочек твэлов, а также уровень остаточного тепловыделения, необходимый для надежного охлаждения твэлов и других элементов активной зоны в случае тяжелых аварий;

повышение надежности системы аварийной остановки реактора за счет использования в системе управления дополнительных каналов аварийной защиты пассивного действия с отличающимся от основных функциональных органов принципом действия.

Для снижения общего запаса реактивности реактора приняты такие технические решения, которые почти исключают необходимость извлечения рабочих органов СУЗ из активной зоны в течение всего периода непрерывной работы АЭС в энергетическом режиме. Это достигается благодаря тому, что активная зона работает в режиме саморегулирования мощности и реактивности за счет изменения средней температуры теплоносителя и выгорания поглотителей нейтронов.

Безопасность АЭС «УниTERM» обеспечивается комплексом технических решений, среди которых необходимо отметить следующие.

В составе АЭС используется установка с реактором водо-водяного типа, обладающая свойствами внутренней самозащищенности, которые отражают ее способность сохранять безопасность на основе внутренних обратных связей, естественных физических процессов, применения пассивных систем отвода остаточного тепловыделения и автоматических устройств защиты, обеспечивающих гашение цепной реакции деления без вмешательства оператора. Реакторная установка обладает также свойством саморегулирования мощности и приведения ее в соответствие с нагрузкой за счет оптимальных отрицательных температурного, мощностного и пустотного коэффициентов реактивности. Физические характеристики активной зоны выбраны таким образом, что указанные коэффициенты находятся в оптимальной области во всем диапазоне температуры в течение всей кампании активной зоны как в нормальных условиях эксплуатации, так и в случае возникновения и развития аварий. Благодаря этому исключается самопроизвольный разгон реактора в процессе пуска и разогрева и стабилизируется работа в стационарных и переходных режимах при изменении режимов работы контура потребителей тепловой энергии, что не требует перемещения рабочих органов регулирования реактивностью. После пуска и вывода парогенерирующего агрегата на заданный уровень мощности извлечение всех рабочих органов механически блокируется, что исключает возможность несанкционированного увеличения реактивности.

Конструктивное исполнение парогенерирующего агрегата таково, что потенциально возможные места возникновения течей расположены в его верхней части, причем предельный эквивалентный диаметр таких течей мал и не превысит 20 мм. Применение интегральной компоновки парогенерирующего агрегата с размещением эффективной железобетонной радиационной защиты между активной зоной и корпусом агрегата предотвращает хрупкое разрушение корпуса из-за воздействия на металл нейтронного облучения. Все это дает возможность исключить из рассмотрения аварии, определяемые большими и средними течами, а также избежать опасного развития аварий, связанных с нарушениями режима охлаждения активной зоны. Последнее обеспечивается страховочным корпусом, рассчитанным на локализацию утечек теплоносителя первого контура в пределах своего внутреннего объема. Наличие трехсекционной системы подачи жидкого поглотителя гарантирует заливку страховочного корпуса в рассматриваемых аварийных ситуациях жидкой средой до уровня, расположенного выше возможных мест разгерметизации первого контура, что исключает возможность обезвреживания активной зоны при любых учитываемых в проекте исходных событиях и сценариях развития аварий. Таким образом, в качестве максимальной проектной аварии реакторной установки АЭС «УниTERM» можно рассматривать аварию с появлением течи в первом контуре условным эквивалентным размером не более 20 мм.

Оценки показали, что развитие подобной аварии происходит по сценарию, характерному для малых течей, а ее последствия удастся локализовать в пределах страховочного корпуса без нарушений герметичности и повреждений элементов активной зоны. Этому способствует рациональное резервирование системы аварийного охлаждения и пассивный характер ее работы без использования каких-либо принудительных средств циркуляции.

Включение в состав АЭС «УниTERM» дополнительного пассивного локализирующего барьера безопасности — страховочного корпуса позволило даже в условиях запроект-

ных аварий предотвратить выбросы радиоактивных веществ в окружающую среду и опасность обезвоживания активной зоны. Запроектная авария, обусловленная разгерметизацией страховочного корпуса при постулированном разрушении 10% твэлов активной зоны и выбросом теплоносителя первого контура и радионуклидов в защитную оболочку, не приводит к существенному радиационному ущербу для населения: индивидуальная дозовая нагрузка не превышает в этом случае 0,11 бэр/год.

Трехконтурная теплогидравлическая схема АЭС «УниTERM», при которой потребители тепловой энергии даже при двух последовательных межконтурных течах могут быть надежно защищены с помощью рационально резервированной запорно-отсечной арматуры, предотвращающей выбросы радионуклидов в контур потребителей тепловой энергии, исключает вредное воздействие ионизирующего излучения на персонал. Благодаря этому персонал АЭС не подвержен радиационной опасности. При нормальных условиях эксплуатации мощность дозы ионизирующего излучения на поверхности защитных конструкций АЭС меньше дозы естественного фона, а при максимальной проектной аварии на расстоянии 100 м от парогенерирующего блока она превышает фон только на 10%.

При разработке АЭС «УниTERM» особое внимание было уделено системе аварийного расхолаживания реактора, которая играет важную роль в обеспечении безопасности. В значительной степени это обусловлено тем, что использование традиционных технических решений оказалось неэффективным. Поэтому были разработаны новые решения, которые учитывали специфические условия эксплуатации АЭС и климатические особенности предлагаемых мест ее размещения.

Система аварийного расхолаживания, предназначенная для отвода остаточного тепловыделения из активной зоны, выполнена в виде автономного технологического контура, взаимосвязанного с промежуточным контуром. В аварийных условиях тепло, отводимое от активной зоны через парогенераторы, которые размещены в корпусе парогенерирующего моноблока, поступает в промежуточный контур, а затем через теплообменники этого контура отводится в автономный контур системы аварийного расхолаживания к его теплообменным поверхностям, охлаждаемым атмосферным воздухом. Низкий уровень зимней температуры в районах использования АЭС определяет необходимость выбора низкокипящего теплоносителя автономного контура. Для этой цели может быть применен, например, аммиак. Особенностью системы аварийного расхолаживания является полное отсутствие запорно-отсечной арматуры, т.е. система постоянно находится в работе. Для уменьшения потерь тепла, отводимого с помощью этой системы в атмосферу, предусмотрено сезонное регулирование потока воздуха через теплообменники. Дополнительно к основной функции система аварийного расхолаживания обеспечивает возможность поддержания ЯЭУ в «горячем» резерве, т.е. на минимально возможном уровне мощности активной зоны.

Еще одно техническое решение, направленное на повышение надежности и безопасности АЭС «УниTERM», заключается в пассивности системы управления и защиты активной зоны. Так как в процессе работы АЭС при изменении нагрузки мощность реактора саморегулируется, а изменение реактивности в течение периода непрерывной работы компенсируется выгорающим поглотителем и температурным эффектом, реактивность корректируется лишь один раз в год путем дистанционного изменения положения поглощающих стержней. Аварийная остановка реактора и поддержание его в подкритическом состоянии осуществляются введением рабочих органов СУЗ под действием гравитационных сил и сжатых пружин, т.е. независимо от наличия источников энергии в момент аварии.

Для количественной оценки уровня безопасности эксплуатации АЭС «УниTERM» были рассмотрены возможные сценарии развития наиболее тяжелых аварий (разгерметизация первого контура, полное прекращение подачи электроэнергии на собственные нужды АЭС). Результаты расчетов показали, что вероятность повреждения ак-

тивной зоны при разгерметизации первого контура находится на уровне 10^{-11} л/год, при полном прекращении подачи электроэнергии на собственные нужды не превосходит 10^{-7} л/год, т.е. в обоих случаях существенно меньше рекомендуемого нормативными документами значения 10^{-5} л/год.

Конструктивное исполнение АЭС обеспечивает ее полное изготовление, сборку и наладку на машиностроительных предприятиях с последующей доставкой крупных блоков к месту будущей эксплуатации, где выполняется лишь минимальный объем монтажных и пусконаладочных работ. Для транспортировки блоков могут быть использованы плавучие средства (баржи, понтоны и т.д.). После выгрузки блоков с плавсредств их можно транспортировать с помощью большегрузных платформ и автотракторных тягачей. После выработки установленного срока службы блоки АЭС демонтируются и доставляются на специализированное предприятие для разборки и утилизации. Отрабатывшее топливо может быть либо переработано, либо передано на захоронение.

Работы по монтажу АЭС «УниTERM» целесообразно проводить на заранее подготовленной и обустроенной площадке. После установки и закрепления блоков на фундаментах монтируются соединительные трубопроводы и кабельные трассы, в том числе к теплофикационной и электрическим сетям потребителя, технологические контуры заполняются рабочими средами, проводятся пусконаладочные испытания систем и оборудования. Планируемая длительность работ по монтажу АЭС «УниTERM» оценивается в 4—5 мес со дня доставки блоков станции.

Из особенностей других указанных в таблице станций следует отметить положенные в основу предложений по АЭС «Шельф-3» проработки автономного подводного энергоблока, выполненные НИКИЭТом в процессе поиска решения проблемы энергообеспечения, разведки, добычи и транспортировки нефти и газа на российском арктическом шельфе в условиях сложной ледовой обстановки. Разумным и экономически целесообразным для определенных пунктов размещения может оказаться формирование АЭС «Шельф-3», а также «Кедр» и «УниTERM» как плавучих станций с небольшой осадкой или их использование в качестве стационарных энергоисточников для эксплуатации наземных нефте- и газопроводов.

Как уже отмечалось, потребность в подобных блочно-транспортных АЭС малой мощности для северных и восточных районов России представляется в перспективе значительной. Уже сейчас выявлено большое число пунктов, где их применение экономически целесообразно, тем более что по предварительным оценкам замена органического топлива ядерным возмещает за период эксплуатации стоимость малых АЭС. В свою очередь, эта перспектива позволяет прогнозировать возможность создания региональных структур обслуживания парка таких АЭС, призванных обеспечивать их транспортировку к местам размещения, монтаж, пусконаладочные работы, профилактическое обслуживание во время эксплуатации, ремонт и эвакуацию после выработки установленного срока службы.

Возможности трансформации в народнохозяйственных целях опыта и знаний, полученных при создании корабельных ЯЭУ, использования научно-технического задела широки и оправданы. Они позволяют рассчитывать на активное внедрение атомных станций различной мощности при решении перспективных задач развития энергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сборник докладов научного семинара ЯО СССР по автономным атомным энергоисточникам малой мощности для децентрализованного теплоснабжения. М., 1991.
2. Коваленко В.К., Тарасов В.К., Уласевич В.К. Плавучая атомная электростанция мощностью 70 МВт (эл.). (Новая концепция строительства. Вопросы экологии.) — Морской флот, 1991, № 11.
3. Головой отчет НИКИЭТа, 1993.

4. Митенков Ф.М. Перспективы использования корабельных реакторных установок. — Атомная энергия, 1994, т. 76, вып. 4, с. 318—326.
5. Адамович Л.А., Гречко Г.И., Румянцев В.В. и др. Автономная атомная станция с ядерным реактором моноблочного типа, предназначенная для электро- и теплоснабжения отдаленных труднодоступных районов. Докл. на ТК МАГАТЭ, Обнинск, 1994.

Поступила в Редакцию 12.09.94

УДК 527.165:539.16

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУБМИКРОКОЛИЧЕСТВА ТЕХНОГЕННОГО ПЛУТОНИЯ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ И ЖИВЫХ ОРГАНИЗМАХ

Перелыгин В.П., Чубурков Ю.Т. (ОИЯИ)

Плутоний, в частности α -активный ^{239}Pu ($T_{1/2} = 24 \cdot 10^4$ лет), содержится в природных образцах в крайне малом количестве. Его концентрация в граните из сверхглубокой скважины ФРГ определена равной $(2-6)10^{-16}$ г/г, геотермальных водах оз. Солтон-Си США $(2-3)10^{-16}$ г/г [1, 2].

В богатых урановых рудах отношение ^{239}Pu к урану достигает $10^{-12}-10^{-11}$ г/г. Очевидно, что в урановых рудах ^{239}Pu непрерывно образуется за счет нейтронов, генерируемых нуклонным компонентом космического излучения в реакциях (α, n) на легких ядрах, которые затем поглощаются ^{238}U .

Интенсивное загрязнение окружающей среды техногенными трансурановыми нуклидами и, в частности, наиболее долгоживущим ^{239}Pu происходило в последние десятилетия за счет многочисленных испытаний ядерного оружия, крупных аварий на ядерных объектах, несовершенства технологии химической переработки твэлов реакторов, затопления и захоронения на дне мирового океана десятков судовых ядерных двигателей, а также захоронения ядерных отходов. Техногенные трансурановые элементы, в частности ^{239}Pu — основной компонент ядерных зарядов, широко распространялись по поверхности земли, создавая радиационный фон. Они уже включились в атмосферный и почвенный цикл, проникли в биосферу, содержатся в продуктах питания и могут создавать непосредственную угрозу здоровью человека.

Оценки [3, 4] показывают, что содержание плутония в приповерхностных слоях почвы достигает 10^{-13} г/г. Эти оценки согласуются с результатами измерения содержания плутония (Р. Брандт. Частное сообщение, 27 марта 1993 г.) в образцах почв Центральной Европы. Результаты исследования радиоактивных осадков, обусловленных аварией на Чернобыльской АЭС, привели к значительному загрязнению обширных территорий в Восточной и Средней Европе [5, 6] горячими частицами, содержащими изотопы плутония.

Целью настоящей работы является анализ возможностей различных методов определения концентрации плутония в окружающей среде и поиск путей создания экспрессной высокочувствительной методики, которую можно было бы использовать для серийного анализа с чувствительностью $10^{-13}-10^{-15}$ г/г.

Определение концентрации плутония путем регистрации α -частиц. Наиболее простые неdestructивные методики определения концентрации плутония в веществах основаны на применении тресковых детекторов, чувствительных к α -частицам. Пробы почвы и растений района Чернобыльской АЭС анализировали с применением низкочувствительных ядерных эмульсий и высокочувствительных пластиков — нитрата целлюлозы CR-39 [5—8] при экспозиции несколько суток для регистрации α -частиц тяжелых радионуклидов. Для счета тресков α -частиц применяли наряду с оптическими микроскопами искровые пробойные счетчики типа «Аист», «Искра», разработанные в