

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВАО и ОЯТ МЕТОДОМ ГАЗОСТА- ТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ В ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОМ ЗАМКНУТОМ ГАЗОВОМ ЦИКЛЕ

И.М. Неклюдов, В.П. Канцедал, В.П. Ашихмин, А.Г. Лаврук, Ю.А. Линник, В.В. Степина
Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт",
Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий
г. Харьков, Украина

Приведены сведения о состоянии электроэнергетики Украины, обосновывается необходимость дальнейшего развития атомной энергетики страны. Рассмотрены концепции путей обращения с радиоактивными отходами, принятыми в других странах и в Украине. Приведены результаты работ по созданию технологии и оборудования для кондиционирования ВАО и ОЯТ газостатического прессования.

Развитие производительных сил и, в целом, любого общества в значительной степени зависит от состояния его энергообеспеченности и, в частности, от наличия достаточного количества доступных для использования энергоносителей. Производственный процесс в любой области деятельности человека - в промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте, в сфере обслуживания - связан со все возрастающими масштабами использования энергии. При этом непрерывно совершенствуются источники и виды энергии, используемые в производстве и в быту.

Состояние энергетики, ее структура, динамика развития, направления и перспективы развития зависят от ряда обстоятельств экономического, политического и социального характера, а также от природных условий, в которых находится то или иное общество. В Украине сегодня электроэнергетика представляет собой развитую на современном уровне мощную энергетическую отрасль, имеющую большие производственные возможности. Так, по состоянию на 1999 г. мощность электростанций Минэнерго составляла $48,9 \cdot 10^3$ МВт, из них ТЭС - 57,5%, АЭС-26,4 %, ГЭС-ГАЭС - 9,4%, ТЭЦ - 6,7% [1]. В это же время потенциальные возможности электроэнергетики Украины задействованы далеко не полностью.

Одной из центральных, отрицательно сказывающихся на работе этой отрасли, является топливная проблема. Данные, приведенные в ряде источников, свидетельствуют о том, что Украина не располагает достаточными (промышленными) запасами таких видов органических энергоносителей, как нефть и природный газ, а имеющийся уголь - плохого качества [2,3]. В связи с этим сегодня в Украине наблюдается следующая ситуация с обеспечением энергоносителями. В то же время уже разведанных запасов урана в расчете на обеспечение работы двадцати таких ядерных энергоблоков как ВВЭР-1000 хватит на сто лет [2].

Вид энергоносителя	"Добыча"	Импорт
Нефть и газовый конденсат, млн.т.	4,13	12,3
Природный газ, млрд.м ³	18,13	62,3
Уголь, млн.т.	75,9	9,0

Сегодня 14 работающих энергоблоков АЭС производят 46,7% всей производимой в Украине электроэнергии [2]. В 2001 г. с вводом в строй действующих ядерного блока № 2 на Хмельницкой и ядерного блока № 4 на Ровенской АЭС процент электроэнергии, вырабатываемой на АЭС, превысит 50% [2].

По данным, приведенным в источнике [2], в 1999 г. в Украине было произведено электроэнергии энергоносителями:

на основе урана	44,6%
на основе угля	26,1%
на основе газа	21,1%
на основе нефти	2,6 %

Очевидно, что по мере выхода Украины из кризиса приведенное соотношение должно меняться в пользу энергоносителей на основе урана.

В связи с изложенным следует полагать, что в Украине ядерной энергетике, как энергетической области долгосрочной стратегии, нет альтернативы. Широким развитием ядерной энергетике решается вопрос как долгосрочного энергообеспечения Украины, так и ее государственной безопасности и экономической независимости.

Важнейшим условием, которое необходимо обеспечить для нормального функционирования и развития ядерной энергетике, является комплексное решение вопросов, связанных с обращением с радиоактивными отходами, включая окончательное удаление их из биосферы.

На территории Украины накопились значительные объемы радиоактивных отходов (РАО). Наибольшую опасность представляют долгоживущие РАО высокой и средней активности, к которым относятся технологические отходы АЭС, обработав-

шее ядерное топливо (ОЯТ), топливосодержащие массы объекта "Укрытие" и другие отходы. Ситуация обострится, как только Россия откажется принимать отработавшее ядерное топливо украинских АЭС на переработку и сохранять отходы от переработанного ранее украинского ядерного топлива. Эти отходы могут начать поступать из России с 2013 года [4]. Кроме этого, наступила необходимость вывода из эксплуатации ядерных реакторов ЧАЭС, а в недалеком будущем ядерных реакторов, отслуживших свой срок других АЭС. При этом появится дополнительное количество РАО различных категорий [5].

Существует много предложений по решению проблемы удаления радиоактивных отходов из биосферы. Некоторые из них, на наш взгляд, сомнительные, например, рассеяние в морях, удаление в космическое пространство и др. Некоторые предложения могут быть реализованы не ранее чем через 50, а то и более лет, например, трансмутация долгоживущих радионуклидов в стабильные посредством нейтронного, протонного или γ "выжигания".

Проблема хранения отходов ядерного топливного цикла стала актуальной для Украины, как и проблема их удаления из биосферы, со времени распада СССР, так как осуществлять эти операции в дальнейшем необходимо будет Украине на ее территории. Согласно рекомендациям МАГАТЭ и в соответствии с позициями, занимаемыми сегодня странами с развитой ядерной энергетикой, предварительно подготовленные путем концентрирования и последующего кондиционирования долгоживущие высоко- и среднеактивные отходы подлежат удалению в подземные хранилища, расположенные в устойчивых (стабильных) геологических формациях.

Применительно к отработавшему ядерному топливу, наибольшее распространение в кругу стран, развивающих ядерную энергетику, получили следующие концепции обращения с ним: [6].

1. Радиохимическая переработка после кратковременного (в течение 5...10 лет) хранения; выделенные при этом уран и плутоний возвращаются в ядерный цикл; продукты активации и продукты деления после кондиционирования отправляются на захоронение.

В порядке дальнейшего развития этого направления, по мере создания соответствующих условий и производственных возможностей, предполагается продукты активации и деления фракционировать на продукты, содержащие короткоживущие и долгоживущие нуклиды и трансураниевые элементы. Короткоживущие отходы после соответствующей подготовки отправлять на контролируемое хранение, которое осуществлять в течение времени, достаточного для их распада до уровня, позволяющего освободить их от контроля со стороны государственного регулирующего органа; долгоживущие и трансураниевые элементы отправлять на "выжигание" в специальных реакторах или других установках.

Далее с материалами, полученными в результате

таких видов подготовки и обработки, необходимо будет поступать в соответствии с правилами и нормами, действующими в это время в государстве.

2. Кондиционирование и последующее захоронение отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) без радиохимической переработки тепловыделяющих элементов.

3. Кондиционирование отработавшего ядерного топлива и организация его длительного (в течение 50...100 лет) контролируемого хранения.

Предполагается, что в этот период могут быть созданы новые процессы и материалы, приняты более гибкие и обоснованные решения о путях обращения с отработавшим ядерным топливом и высокоактивными отходами с учетом научно-технического прогресса, сложившейся конъюнктуры рынка, экономических возможностей страны, высших государственных интересов и т.д.

Выбор конкретной стратегии обращения с высокоактивными отходами является сложной задачей, решение которой для каждого государства определяется его техническими, экономическими, экологическими, правовыми и политическими возможностями и категориями. В настоящее время из 32-х "ядерных" государств Мира 18 отложили свое решение выбора пути обращения с ОЯТ и ВАО, став на путь организации их длительного контролируемого хранения. В числе этих государств находится и Украина [7].

В практике обращения с РАО одним из важных элементов, препятствующих их утечке и неконтролируемому распространению в экологической среде, явилось кондиционирование радиоактивных отходов. Наибольшее распространение в практике кондиционирования РАО получил так называемый метод остекловывания. Первые эксперименты по использованию этого метода были проведены в Канаде около 30 лет назад. Затем он стал широко использоваться во Франции Бельгии, Германии, Великобритании, США, СССР и других странах. Стекло, содержащее радиоактивные отходы, помещают в специальные стальные баки. Такая система рассчитана на то, что должно быть найдено место глубоко под землей, в геологических формациях для окончательного захоронения таких баков [8].

Хотя метод остекловывания получил широкое признание и распространение, в ряде стран велись и продолжают работы по созданию (или использованию) других материалов, отличающихся повышенной радиационной и коррозионной стойкостью и предназначенных для использования при кондиционировании РАО.

Так, в качестве процесса альтернативного остекловыванию, австралийские ученые из Национального института в Канберре предложили так называемый Synroc-процесс. Материал Synroc является синтетическим аналогом минерала, типичные фазы которого $\text{BaAl}_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}$; CaTiO_3 ; $\text{CaZrTi}_2\text{O}_7$ могут включать в твердый раствор почти все нуклиды высокоактивных отходов общим содержанием до 20вес.% [9,10]. Имеется немало данных и о других

разработках и предложениях, касающихся вопросов кондиционирования высокоактивных отходов. Так, например, оригинальный метод иммобилизации радиоактивных отходов в минералоподобные материалы в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза предложен в работе [11].

В ИФТТМТ ННЦ ХФТИ на протяжении ряда лет ведутся исследования и опытно-конструкторские разработки, направленные на создание "матричных" и "барьерных" материалов, пригодных для использования с целью иммобилизации и кондиционирования высокоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива, разрабатываются технологические процессы и оборудование для проведения такого типа работ.

При этом изучается возможность применения для иммобилизации ВАО и кондиционирования ОЯТ различных природных минералов, их синтетических аналогов, керамических, металлокерамических и стеклокерамических материалов, разрабатываются методы изготовления и обработки таких материалов, создания на их основе соответствующих изделий, ведутся исследования их физических и химических свойств, определяются их эксплуатационные характеристики [12-16].

Эффективным видом оборудования для создания материалов на основе различного рода минералов и керамики, а также изготовления изделий из них, являются высокотемпературные газостатические установки. Серия таких установок типа ГАУС разработана и изготовлена в ИФТТМТ ННЦ ХФТИ [17].

Проведенными расчетами и экспериментами была определена оптимальная структурная схема семейства газостатических установок типа ГАУС, основными элементами которой являются:

1. Криогенный газовый термокомпрессор (КРИТ), рабочими органами которого являются термокомпрессионные элементы (ТКЭ).
2. Газостат, состоящий из водоохлаждаемого корпуса с торцевыми затворами и уплотнениями, и печи внутреннего нагрева.
3. Системы электропитания и автоматического управления технологическим процессом.
4. Система обеспечения безопасной эксплуатации газостатической установки.

Отличительными особенностями и достоинствами газостатических установок типа ГАУС конструкции ИФТТМТ ННЦ ХФТИ являются:

1. Применение в конструкции установок в качестве источника газа высокого давления криогенного газового термокомпрессора типа КРИТ [18].

Криогенный газовый термокомпрессор типа КРИТ разработан в ИФТТМТ ННЦ ХФТИ и имеет оригинальную конструкцию, свободную от ряда недостатков, присущих поршневым и мембранным компрессорам, а также различного рода мультипликаторам. Действие его основано на последовательном сжижении и испарении рабочего газа-аргона. Давление возрастает в результате изменения агрегатного состояния рабочего газа.

В конструкции термокомпрессора отсутствуют

какие-либо механизмы и движущиеся части, а, следовательно, и источники загрязнения компрессируемого газа смазочными материалами и продуктами износа деталей. Варьированием количества, схемы подключения, а следовательно, и порядка работы термокомпрессионных элементов, легко обеспечиваются необходимые эксплуатационные характеристики термокомпрессора типа КРИТ. Предельно достижимые давления газа, создаваемые такого типа компрессорами, составляют ~ 2000 МПа.

Особенности и простота конструкции, обусловленная ими технологичность, высокие рабочие характеристики, а также сравнительно небольшие габариты выгодно отличают компрессоры типа КРИТ от компрессоров других типов.

2. В связи с небольшими габаритами для размещения газостатической установки не требуется крупногабаритного здания или помещения; установка может быть размещена в соответствующей горячей камере.

Этому способствует также автоматизированная система управления технологическим процессом газостатирования, предусмотренная проектом установки

3. Для обеспечения высокой надежности, необходимой при работе с радиоактивными отходами, корпус газостата выполняется двухслойным из сталей, обладающих сочетанием высоких прочностных свойств и высокой трещиностойкостью [19]

4. Конструкция установок позволяет использовать рабочий газ в замкнутом цикле.

Переработка радиоактивных отходов или отработавшего ядерного топлива с целью их последующего длительного хранения или окончательного удаления из экологической сферы методом высокотемпературного газостатического прессования включает в себя, как правило, следующие операции:

Подготовка иммобилизующего или барьерного материала для иммобилизации радиоактивных отходов или кондиционирования отработавшего ядерного топлива путем дробления естественных минералов или их искусственных аналогов с последующим их помолом и фракционированием.

Смешение подготовленных порошков иммобилизующих материалов соответствующих фракционных составов с порошкообразными отходами.

Заполнение такой смесью специальной канистры или порошком минералов свободного объема, образовавшегося после размещения в соответствующем контейнере отработавшего ядерного топлива в виде сборок твэлов или набора твэлов.*

Обезгаживание заполненных систем.

Герметизация контейнера или канистры.

Размещение снаряженного контейнера или канистры в рабочей зоне газостата и его герметизация.

Создание в рабочей зоне газостата необходимых давления газа (200...600 МПа) и температуры (800...1500°C).

Выдержка газостатируемых объектов в этих условиях расчетное время.

Охлаждение газостатируемых объектов по задан-

ному режиму.

Вскрытие газостата, извлечение газостатированных объектов, их контроль и передача для дальнейшего обращения в соответствии с принятым технологическим регламентом.

*Примечание: Прорабатываются также варианты кондиционирования ОЯТ с использованием многослойного защитного барьера, слои которого изготавливаются из различных материалов.

ИФТТМТ изготовил более десяти криогенных термокомпрессоров и высокотемпературных газостатических установок типа ГАУС различных модификаций, эксплуатация которых ведется в ИФТТМТ ННЦ ХФТИ и в ряде промышленных предприятий и исследовательских организаций Челябинска, Златоуста и Санкт-Петербурга. Данные анализа опыта их эксплуатации учитываются ИФТТМТ при выполнении новых разработок, в частности, при разработке газостатической установки для кондиционирования ОЯТ реактора РБМК-1000.

В этом плане немаловажную ценность представляет опыт работы изготовленной ИФТТМТ ННЦ ХФТИ газостатической установки с предельным давлением рабочего газа 400 МПа, используемой в НПО "Радиевый институт" (Санкт-Петербург) для отработки методов иммобилизации высокоактивных отходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. И.В. Плачков. Итоги работы энергетической отрасли за 1998 год и первое полугодие 1999 года, перспективные направления развития энергетики // *Энергетика и электрификация, спецвыпуск*, 1999, с.3.
2. М.П. Уманец. Роль международного сотрудничества в выполнении программ Минэнерго Украины // *Атомна енергетика та промисловість України*. 1999, № 2, с.6.
3. И.Дьяк . Энергетическая безопасность государства // *Голос України*. 2000, № 9.
4. А.Гудыма., В.Пинчук., В.Хрущев. Что делать с радиоактивными отходами // *Голос України*. 1999, № 108.
5. А.В. Носовский. Технические и социальные аспекты досрочного вывода из эксплуатации энергоблоков Чернобыльской АЭС. // *Атомна енергетика та промисловість України*. 1999, №2, с.34
6. П.Х.Дик, М.Й.Крейнс. Потребности растут. Обращение с отработавшим топливом атомных электростанций // *Бюллетень МАГАТЭ*. Вена, Австрия. 1998, том 40, № 1.
7. Н.Р. Нигматуллин В.В.Ким, И.Н.Власенко, И.М.Коротенко. Обращение с отработанным ядерным топливом в Украине // *Атомна енергетика та промисловість України*. 1999, № 1, с.29.
8. В.П.Шведов, В.М.Седов, И.П.Рыбальченко, И.Н.Власов. *Ядерная технология*. М.: "Атомиздат", 1979, с.240-246.
9. И.Николич. Исследования синтетической горной породы SYNROC // *Экспресс-информация* № 16,(1384). 1984,М.: ЦНИИАтоминформ ГКАЭ.
10. D.Coleby. SYNROC ^Secand generation immobilisation of radwaste // *Nuclear Shectrum*. 1986, v 2, № 2, p 22.
11. Д.С.Глаговский, А.В. Куприн и др. Иммобилизация высокоактивных отходов в устойчивые минералоподобные материалы в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // *Атомная энергия*. 1999, т. 87, вып.1, с.57-60.
12. В.П.Канцедал, В.Л.Капустин и др. Газофторидная переработка и минерализация радиоактивных отходов - новые экологически чистые технологии национального научного центра "Харьковский физико-технический институт" // *Атомна енергетика та промисловість України*. 1999, № 2, с.20-23.
13. В.Г. Шабалин., В.П. Канцедал., С.Ю. Саенко. Синтез и исследование свойств кристаллических матриц типа SYNROC для иммобилизации радиоактивных отходов. // *Вопросы атомной науки и техники. Серия "Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение"*. 1998, вып. 3(69), 4 (70), с. 89-91.
14. С.В. Габелков., Э.П. Шевякова, Р.В. Тарасов. Матрицы на основе алюминатов лантаноидов для иммобилизации нуклидов трансурановых элементов. // *Труды XIV Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению*. Харьков. 2000, с. 300-301.
15. С.Ю.Саенко , Р.В.Тарасов и др. Коррозионная стойкость в водной среде стеклокерамических матриц, полученных методом ГИП. // *Труды XIV Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению*. Харьков. 2000, с. 298-299.
16. В.П. Канцедал, В.В.Кириченко и др. О применении композиционной керамики в контейнерах "Украина" и строительных конструкциях хранилищ РАО. // *Труды XIV Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению*. Харьков. 2000, с. 291-292.
17. Ж.С. Ажажа , В.П.Ашихмин и др. Создание газостатической установки для кондиционирования высокоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива // *Труды XIV Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению*. Харьков. 2000, с. 287-289.
18. А.Г.Лаврук, Ю.А.Линник и др. Усовершенствованный криогенный термокомпрессор КРИТ-6М для замкнутой схемы газостатической установки // *Труды XIV Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению*. Харьков. 2000, с. 360-361.
19. А.Г. Лаврук, Ю.А.Линник и др. Концепция газостата установки горячего изостатического прессования для капсулирования ОТВС РБМК // *Труды XIV Международной конференции по*

- физике радиационных явлений и радиационному материаловедению. Харьков. 2000, с. 304-305.*
20. В.П. Канцедал, А.Г.Лаврук, А.В.Старченко и др. Разработка и создание технологического исследовательского комплекса на базе ГИП-оборудования для иммобилизации высокоактивных отходов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия "Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение".* 1999, вып. 3 (69), 4 (70), с. 92-93.